



**Comportamento ao fogo de vigas de betão armado
reforçadas à flexão com laminados de fibras de
carbono (CFRP)**

Desenvolvimento de sistemas de protecção ao fogo

João Pedro Lage da Costa Firma

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Professor Doutor José Manuel Noronha da Câmara
Orientador: Professor Doutor Paulo Miguel Macedo França
Co-orientador: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia
Vogal: Professor Doutor Fernando António Baptista Branco

Dezembro de 2010

Resumo

Com o aumento da utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) em aplicações na engenharia civil, são inevitavelmente encontrados novos problemas e desafios. De entre esses problemas, existem preocupações legítimas em relação ao comportamento dos materiais FRP quando expostos ao fogo, principalmente em aplicações em edifícios. De facto, está perfeitamente identificado que a tensão, rigidez e propriedades adesivas dos FRP's sofrem uma deterioração assinalável a temperaturas moderadamente elevadas, nomeadamente quando se aproximam da temperatura de transição vítreia (T_g) da resina que, tipicamente, varia entre 50 e 140°C.

Nesta dissertação são apresentados estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono). O principal objectivo foi estudar a viabilidade da sua utilização em pisos de edifícios e avaliar a eficácia de diferentes sistemas de protecção ao fogo – além da protecção da face inferior das vigas, o presente estudo teve como objectivo avaliar o possível efeito benéfico do isolamento térmico das zonas de ancoragem nas vigas reforçadas.

Foram inicialmente realizados ensaios de análise mecânica dinâmica e de calorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria em amostras de CFRP e de adesivo epóxido para determinar as suas propriedades termofísicas. Seguidamente, foram realizados ensaios de resistência ao fogo num forno de dimensões intermédias com o objectivo de estudar o comportamento de uma viga de betão armado e de vigas de betão armado reforçadas com CFRP carregadas e em situação de incêndio (desprotegidas e protegidas com placas de silicato de cálcio e argamassa à base de vermiculite e perlite), simulado através da curva temperatura-tempo definida na norma ISO 834. Estes ensaios permitiram investigar (i) a viabilidade da aplicação dos referidos materiais de protecção ao fogo em vigas de betão armado reforçadas com CFRP; (ii) a resposta térmica das vigas quando expostas ao fogo; (iii) a resposta mecânica e os modos de rotura das vigas quando expostas ao fogo e (iv) a resistência ao fogo das vigas com diferentes sistemas de protecção. O estudo experimental mostrou que a resistência ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com CFRP pode ser consideravelmente incrementada com o recurso a sistemas de protecção adequados. Em particular, os sistemas testados garantiram tempos de protecção do reforço entre 60 e 167 minutos.

Foram ainda elaborados modelos de elementos finitos termoquímicos bidimensionais de todas as vigas ensaiadas utilizando o software comercial ANSYS, com o objectivo de simular a evolução das temperaturas. Os modelos numéricos desenvolvidos permitiram simular a resposta térmica das vigas com uma precisão muito razoável.

Palavras-chave: betão armado, polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP), sistemas de reforço, sistemas de protecção ao fogo, estudo experimental, estudo numérico.

Abstract

While fibre reinforced polymer (FRP) materials are being increasingly used in civil engineering applications, new design issues and challenges are inevitably encountered. Among these issues, there are legitimate concerns regarding the performance of FRP materials when exposed to fire, especially in building applications. In fact, it is well established that the strength, stiffness and bond properties of FRP's are severely deteriorated at moderately elevated temperatures, namely when the glass transition temperature (T_g) of the resins is approached, typically in the range of 50-140°C.

This thesis presents experimental and numerical investigations on the fire behaviour of reinforced concrete (RC) beams flexurally strengthened with CFRP (carbon fibre reinforced polymers) laminates. The main objective was to study the viability of their use in floors of building and to assess the efficacy of different fire protection systems – in addition to insulating the bottom surface of the beams, the present study aimed at evaluating the potential beneficial effect of thermally insulating the anchorage zones of the strengthened beams.

Dynamic mechanical analyses and differential scanning calorimetry and thermogravimetric measurements were first performed in the CFRP material and in the epoxy adhesive in order to determine their thermo-physical properties. Subsequently, fire resistance tests were conducted on an intermediate scale oven to investigate the behaviour of loaded RC and CFRP-strengthened RC beams in a fire situation (unprotected and protected with calcium silicate boards and vermiculite/perlite cement based mortars), simulated by the ISO 834 time-temperature curve. These tests allowed to investigate (i) the feasibility of applying the investigated fire protection materials to CFRP-strengthened RC beams; (ii) the thermal response of the beams when exposed to fire; (iii) the mechanical response and failure modes of the beams when exposed to fire and (iv) the fire resistance of the beams with the different fire protection systems. The experiments showed that the fire endurance of CFRP-strengthened RC beams can be considerably extended provided that appropriate fire protection systems are used. In particular, the tested systems guaranteed a fire resistance of the CFRP reinforcement between 60 and 167 minutes.

Two-dimensional finite element thermochemical models of all tested beams were developed, using commercial package ANSYS, in order to simulate the evolution of the temperature fields. The numerical models developed were able to reproduce the thermal response of the beams tested with fairly good accuracy.

Key-words: reinforced concrete, carbon fiber reinforced polymers (CFRP), strengthening systems, fire protection systems, experimental study, numerical study.

Agradecimentos

A realização da presente dissertação apenas foi possível devido a conjunto de pessoas que, a diversos níveis, me ajudaram ao longo deste último ano.

Ao professor João Ramôa Correia agradeço profundamente a disponibilidade infindável, profissionalismo, incentivo, apoio científico e um entusiasmo contagiente na abordagem e transmissão de conhecimentos sobre o tema, proporcionando uma orientação exemplar.

Ao professor Paulo França agradeço todo o apoio prestado, que apesar da distância física que nos separou, contribuiu com ensinamento e ideias indispensáveis à realização deste trabalho.

Ao pessoal técnico do LERM, especialmente ao Fernando Alves, Fernando Costa e Pedro Claro agradeço todo o apoio prestado, sem o qual a realização dos ensaios e, consequentemente, a elaboração desta dissertação não teria sido possível.

À engenheira Susana Cabral Fonseca do LNEC agradeço o apoio dado na realização dos ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA) e de tracção aos provetes de adesivo, e os conhecimentos transmitidos no tema.

Ao professor Francisco Lemos do Departamento de Engenharia Química e Biológica do Instituto Superior Técnico, agradeço o apoio prestado na realização dos ensaios de calorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA).

À empresa *S&P Clever Reinforcement Ibérica*, na pessoa do Engenheiro Filipe Dourado, agradeço o fornecimento dos materiais de reforço.

Aos meus colegas de curso, Fernando Simões, Bruno Matos, Vasco Fernandes e João Vasco Marques, agradeço toda a amizade, companheirismo e apoio transmitidos ao longo dos últimos anos.

Aos meus pais, à minha irmã e à minha avó agradeço todo o apoio, amor, compreensão e que nos momentos mais críticos sempre me motivaram a continuar, sem os quais a realização desta dissertação era impossível.

Finalmente, agradeço à Carla o apoio, a dedicação e o amor que tanto têm contribuído para a minha felicidade, sentimento essencial à realização de todos os aspectos desta dissertação.

Índice de matérias

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice de matérias	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas.....	xix
Simbologia.....	xxi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objectivos e metodologia	2
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. Utilização de sistemas FRP no reforço de estruturas de betão armado	5
2.1. Introdução	5
2.2. Evolução histórica dos materiais compósitos	5
2.3. Características gerais dos plásticos reforçados com fibras.....	7
2.3.1. Materiais constituintes	8
2.3.1.1. Fibras.....	8
2.3.1.2. Matriz polimérica.....	11
2.3.1.3. Material de enchimento	12
2.3.1.4. Aditivos.....	13
2.3.2. Adesão fibra-matriz	13
2.4. Características gerais dos adesivos de colagem.....	14
2.5. Características gerais dos compósitos de CFRP	15
2.5.1. Formas dos compósitos de CFRP, processos de fabrico e respectivas propriedades	16
2.5.1.1. Laminados	16
2.5.1.2. Mantas e tecidos.....	18
2.5.1.3. Fios	19
2.5.1.4. Varões e cabos	20
2.5.2. Influência da temperatura e humidade	20
2.5.3. Fluênciça e relaxação	20
2.6. Descrição geral do reforço de estruturas de betão armado com sistemas de CFRP	21
2.6.1. Reforços à flexão e ao corte	21
2.6.2. Confinamento	22
2.6.3. Sistemas pré-esforçados	23
2.7. Reforço de vigas à flexão com laminados de CFRP	24
2.7.1. Sistema EBR	24

2.7.2. Sistema NSM	25
2.7.3. Comportamento mecânico	26
2.7.4. Modos de rotura.....	27
2.7.5. Indicações gerais para dimensionamento segundo propostas normativas do ACI 440 e Fib (Bulletin 14).....	29
2.7.5.1. Hipóteses de cálculo	29
2.7.5.2. Propriedades dos materiais	30
2.7.5.3. Limites de reforço/reserva de segurança.....	30
2.7.5.4. Estado limite último de flexão	31
2.7.5.5. Aderência betão-CFRP	33
2.7.5.6. Recomendações em situação de serviço	35
2.7.5.7. Recomendações em situação de incêndio	36
2.8. Bibliografia	37
3. Comportamento ao fogo de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas FRP	41
3.1. Introdução	41
3.2. Processos de transmissão de calor	41
3.2.1. Condução.....	41
3.2.2. Convecção.....	42
3.2.3. Radiação.....	43
3.3 Definição da acção do incêndio.....	44
3.3.1. Desenvolvimento de um incêndio	44
3.3.2. Curvas de incêndio padrão: nominais e paramétricas	45
3.4. Efeito da temperatura nas propriedades dos materiais.....	46
3.4.1. Betão	46
3.4.1.1 Resistência à compressão	47
3.4.1.2. Resistência à tracção.....	48
3.4.1.3. Módulo de elasticidade	48
3.4.1.4. Coeficiente de dilatação térmica	49
3.4.2. Aço.....	50
3.4.2.1. Tensão de cedência	50
3.4.2.2. Módulo de elasticidade	50
3.4.2.3. Coeficiente de dilatação térmica	51
3.4.3. Materiais FRP.....	52
3.4.3.1. Resistência à tracção e módulo de elasticidade	52
3.4.3.2. Coeficiente de dilatação térmica	55
3.4.4. Adesivo de colagem	56
3.4.4.1. Resistência à tracção em flexão.....	56
3.4.4.2. Módulo de elasticidade	56
3.4.4.3. Coeficiente de dilatação térmica	57
3.5. Efeito da temperatura na ligação betão-CFRP.....	57

3.6. Sistemas de protecção ao fogo	60
3.6.1. Sistemas passivos.....	60
3.6.1.1. Revestimentos intumescentes.....	60
3.6.1.2. Revestimentos à base de vermiculite e perlite.....	61
3.6.1.3. Placas de gesso.....	62
3.6.1.4. Placas de silicato de cálcio	62
3.6.1.5. Projecção de fibras minerais.....	63
3.6.1.6. Mantas de fibras cerâmicas e placas de lã de rocha	63
3.7. Estudos experimentais sobre estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP a temperaturas elevadas	64
3.7.1. Vigas reforçadas à flexão	64
3.7.2. Lajes reforçadas à flexão	67
3.7.3. Pilares	70
3.8. Bibliografia	71
4. Estudo experimental do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP.....	75
4.1. Programa experimental.....	75
4.1.1. Objectivos do programa experimental.....	75
4.2. Materiais.....	76
4.2.1. Betão	76
4.2.2. Aço em varão	79
4.2.3. Laminados de CFRP	79
4.2.4. Adesivo.....	80
4.2.4.1. Ensaios de tracção	80
4.2.5. Sistemas de protecção ao fogo	84
4.3. Determinação das propriedades térmicas e termomecânicas do sistema de reforço	85
4.3.1. Análises mecânicas dinâmicas (DMA)	85
4.3.1.1. Objectivo e fundamento dos ensaios.....	85
4.3.1.2. Descrição dos ensaios.....	86
4.3.1.3. Análise e discussão dos resultados	87
4.3.2. Ensaios de DSC/TGA	89
4.3.2.1. Objectivos e fundamento dos ensaios.....	89
4.3.2.2. Descrição dos ensaios.....	90
4.3.2.3. Análise e discussão dos resultados	91
4.3.2.4. Resultados obtidos em estudos anteriores.....	92
4.4. Ensaios de flexão das vigas de referência.....	92
4.4.1. Dimensionamento das vigas de betão armado e do sistema de reforço.....	93
4.4.1.1. Viga VA – sem reforço	93
4.4.1.2. Viga VB – com reforço	95
4.4.2. Fabrico das vigas.....	98

4.4.3. Esquema e procedimento de ensaio	100
4.4.4 Resultados e discussão	101
4.5. Ensaios de resistência ao fogo.....	105
4.5.1. Fabrico das vigas.....	106
4.5.1.1. Colocação dos extensómetros	106
4.5.1.2. Colocação dos termopares	106
4.5.1.3. Aplicação dos sistemas de protecção ao fogo	108
4.5.2. Sistema e procedimento de ensaio.....	109
4.5.2.1. Forno	109
4.5.2.2. Sistemas de apoio e de selagem lateral das vigas.....	110
4.5.2.3. Definição da curva do incêndio padrão.....	112
4.5.2.4. Sistema de carregamento gravítico	113
4.5.2.5. Instrumentação	115
4.5.2.6. Procedimento de ensaio.....	116
4.5.3 Resultados e discussão	116
4.5.3.1. Síntese de resultados	116
4.5.3.2. Evolução da temperatura no interior do forno	117
4.5.3.3. Evolução da temperatura nas vigas.....	118
4.5.3.4. Resposta mecânica.....	123
4.5.3.5. Observações pós-fogo.....	126
4.5.3.6. Análise comparativa	131
4.5.3.7. Regulamentação e campo de aplicação	133
4.5.4. Conclusões.....	135
4.6. Bibliografia	137
5. Simulação numérica da resposta térmica de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP e protecções ao fogo.....	139
5.1. Exemplo de um estudo numérico sobre vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas CFRP a temperaturas elevadas	139
5.2. Modelação das propriedades termofísicas dos materiais.....	141
5.2.1. Betão	142
5.2.1.1. Massa volúmica	142
5.2.1.2. Calor específico	143
5.2.1.3. Condutibilidade térmica	144
5.2.1.4. Emissividade	145
5.2.2. CFRP/adesivo de colagem.....	145
5.2.2.1. Massa volúmica	145
5.2.2.2. Calor específico	146
5.2.2.3. Condutibilidade térmica	146
5.2.2.4. Emissividade	147
5.2.3. Argamassa de vermiculite e perlite	147

5.2.3.1. Massa volúmica	147
5.2.3.2. Calor específico	148
5.2.3.3. Condutibilidade térmica	149
5.2.3.4. Emissividade	150
5.2.4. Placas de Silicato de cálcio.....	150
5.2.4.1. Massa volúmica	150
5.2.4.2. Calor específico	151
5.2.4.3. Condutibilidade térmica	151
5.2.4.4. Emissividade	152
5.2.5. Ar atmosférico	152
5.2.5.1. Massa volúmica	152
5.2.5.2. Calor específico	153
5.2.5.3. Condutibilidade térmica	153
5.3. Descrição do modelo base	154
5.3.1. Tipo de elementos e geometria do modelo.....	154
5.3.2. Condições de fronteira.....	156
5.3.3. Tempo total de simulação e intervalo de tempo de cálculo.....	157
5.4. Estudos paramétricos.....	157
5.4.1. Coeficiente de convecção da face quente	158
5.4.2. Coeficiente de convecção da face fria.....	158
5.4.3. Trocas de calor por convecção e radiação na face fria	159
5.4.4. Imposição directa das temperaturas do incêndio padrão nos nós da face quente	159
5.4.5. Emissividade	160
5.4.6. Conclusões	160
5.5. Apresentação e discussão dos resultados.....	161
5.5.1. Viga RC	162
5.5.2. Viga CFRP	163
5.5.3. Viga VP25.....	165
5.5.4. Viga VP40.....	166
5.5.5. Viga SC25.....	167
5.5.6. Viga SC40.....	169
5.6. Conclusões	170
5.7. Bibliografia	172
6. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros	175
6.1. Conclusões do trabalho realizado	175
6.2. Perspectivas de desenvolvimentos futuros.....	177
Anexos	179
Anexo I. Massa dos provetes de betão ensaiados aos 54, 74 e 116 dias	181
Anexo II.1 Cálculos justificativos do dimensionamento da viga VA	183
Anexo II.2. Cálculos justificativos do dimensionamento da viga VB	187

Anexo III. Gráficos extensão-força das vigas de referência.....	197
Anexo IV. Diagramas temperatura-tempo experimentais das <i>vigas RC</i> a <i>SC40</i>	199
Anexo V. Ficheiros de dados do modelo base aplicado a cada tipo de viga.....	205
Anexo VI. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos obtidos nos estudos paramétricos na <i>viga RC</i>	235
Anexo VII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga RC</i>	241
Anexo VIII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga CFRP</i> ..	245
Anexo IX. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga VP25</i>	249
Anexo X. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga VP40</i>	253
Anexo XI. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga SC25</i>	257
Anexo XII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da <i>viga SC40</i>	261

Índice de figuras

Figura 2.1. a) utilização de compósitos com fibras de vidro no casco de navios militares; b) utilização de FRP em aviões militares; c) utilização de FRP em automóveis de competição.....	6
Figura 2.2. a) “ <i>Monsanto House of the Future</i> ” – revestimentos em compósitos de fibras de vidro; b) “ <i>American Pavilion in Brussels</i> ” – fachadas totalmente em compósito de fibra de vidro.....	6
Figura 2.3. a) utilização de materiais compósitos em planadores; b) barco de recreio com casco totalmente em compósito de fibras de vidro; c) cana de pesca em compósito de fibras de carbono.....	6
Figura 2.4. Diagrama tensão-extensão de diferentes tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço.....	9
Figura 2.5. a) bobina com filamentos contínuos entrelaçados de fibras de carbono; b) manta de filamentos em fibras de vidro contínuas dispostas aleatoriamente; mantas de fibras de aramida contínuas direcionadas.....	10
Figura 2.6. Diagramas tensão-extensão de vários compósitos de FRP e dos aços macio e de pré-esforço.....	16
Figura 2.7. Esquema da linha de fabrico de laminados de CFRP por pultrusão (as mantas de reforço e o véu de superfície são prescindíveis no fabrico de laminados de CFRP).....	17
Figura 2.8. a) aspecto final dos laminados; b) disposição dos materiais constituintes dos laminados; c) laminados armazenados em rolos.....	17
Figura 2.9. a) manta pré-impregnada com fibras de carbono unidirecionais; b) tecidos de fibras de carbono.....	19
Figura 2.10. Rolos de fios de carbono não torcidos.....	20
Figura 2.11. a) reforço à flexão de vigas de um complexo industrial com recurso a laminados de CFRP; b) reforço à flexão de uma laje do tabuleiro de um viaduto com recurso a mantas de CFRP; c) esquema do reforço de um pilar à flexão com laminados de CFRP.....	22
Figura 2.12. a) viga reforçada à flexão e ao corte com laminados de CFRP [2.48]; b) viga reforçada à flexão com laminados e ao corte com manta de CFRP; c) pilar reforçado ao corte com faixas de mantas de CFRP.....	22
Figura 2.13. a) encamisamento com mantas de CFRP para reforço axial de um pilar circular; b) encamisamento com mantas de CFRP para reforço axial de um pilar rectangular; c) mecanismo para encamisamento automático de um pilar circular com fios de CFRP.....	23
Figura 2.14. a) detalhe do macaco na aplicação de pré-esforço em laminados de CFRP numa laje de um edifício; b) cabos de pré-esforço em CFRP no reforço da ponte de Verdasio.....	24
Figura 2.15. Sistema NSM a) aplicação do laminado em rasgos numa laje; esquema do posicionamento de b) laminados em rasgos; c) barras quadradas; e d) varões em rasgos.....	25
Figura 2.16. Diagrama multilinear carga-deslocamento central de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP.....	26
Figura 2.17. Diagramas momento-curvatura a meio vão de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP.....	27
Figura 2.18. Modos de rotura de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP pelo sistema EBR	28
Figura 2.19. Forças de desvio que provocam o destacamento do laminado devido a irregularidades na superfície do betão.....	28
Figura 2.20. a) secção genérica reforçada à flexão com um laminado de CFRP; b) diagrama de extensões simplificado em estado limite último; c) diagrama de tensões simplificado em estado limite último.	31

Figura 3.1. Curva temperatura-tempo de um incêndio real; a) fase de ignição; b) fase de propagação; c) fase de pleno desenvolvimento; d) fase de extinção.....	45
Figura 3.2. Curva de incêndio padrão segundo a norma ISO 834 e curva de incêndio real.....	46
Figura 3.3. Influência da temperatura na resistência do betão à compressão.....	47
Figura 3.4. Influência da temperatura na resistência do betão à tracção.....	48
Figura 3.5. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do betão.....	49
Figura 3.6. Extensão térmica total do betão segundo a parte 1-2 do Eurocódigo 2.....	49
Figura 3.7. Influência da temperatura na tensão de cedência do aço laminado a quente	50
Figura 3.8. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do aço laminado a quente.....	51
Figura 3.9. Extensão térmica total do aço segundo a parte 1-2 do Eurocódigo 2	51
Figura 3.10. Influência da temperatura na resistência à tracção das fibras de vidro, carbono e aramida.....	52
Figura 3.11. a) influência da temperatura na resistência à tracção da resina epóxida; b) influência da temperatura no módulo de elasticidade da resina epóxida.....	53
Figura 3.12. Influência da temperatura na resistência à tracção dos compósitos de CFRP.....	54
Figura 3.13. Influência da temperatura no módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP.....	55
Figura 3.14. Influência da temperatura na resistência à tracção em flexão do adesivo epóxido <i>SikaDur 30</i>	56
Figura 3.15. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do adesivo epóxido <i>SikaDur 30</i>	57
Figura 3.16. a) esquema de uma viga reforçada à flexão com um laminado de CFRP; b) distribuição das tensões de corte na interface betão-CFRP à temperatura ambiente; c) distribuição das tensões normais no laminado à temperatura ambiente; d) pormenor das tensões normais ao laminado na zona de extremidade à temperatura ambiente	58
Figura 3.17. a) influência da temperatura na tensão de corte máxima; b) diagrama tensão de corte-escorregamento para várias temperaturas.....	59
Figura 3.18. a) aspecto inicial de tubos metálicos protegidos com tinta intumescente; b) acção do fogo nos tubos metálicos; c) aspecto final da tinta intumescente após a acção do fogo.....	61
Figura 3.19. a) projecção de argamassa de vermiculite para protecção de perfis metálicos; b) placas de vermiculite; c) estrutura metálica protegida com argamassa projectada de vermicute e perlite.....	62
Figura 3.20. Projecção de fibras minerais num pavimento metálico.....	63
Figura 3.21. a) rolo de manta de fibras cerâmicas; b) perfil metálico envolvido com mantas cerâmicas; c) placas de lã de rocha.....	64
Figura 3.22. a) secção transversal das vigas (adaptado de [3.36]); b) localização dos termopares na secção central das vigas.....	65
Figura 3.23. Evolução da temperatura com o tempo na interface betão-CFRP.....	68
Figura 3.24. a) evolução das temperaturas com o tempo no pilar com isolamento de 32 mm; b) evolução das temperaturas com o tempo no pilar com isolamento de 57 mm	70
Figura 4.1. Dimensões dos moldes dos provetes (em mm).....	81
Figura 4.2. Máquina hidráulica e pormenor do sistema de garras de aperto.....	82

Figura 4.3. Localização dos extensómetros nos provetes EP5 a EP7.....	82
Figura 4.4. Diagrama força-deslocamento dos provetes ensaiados.....	82
Figura 4.5. Rotura de todos os provetes ensaiados.....	83
Figura 4.6. Pormenor da rotura do provete EP4 numa zona com vazios.....	83
Figura 4.7. Diagrama tensão-extensão determinado para os provetes EP5, EP6 e EP7.....	83
Figura 4.8. Determinação da temperatura de transição vítreia de acordo com a norma ASTM E1640-99.....	86
Figura 4.9. Aparelho para ensaios DMA.	87
Figura 4.10. Sistema de garras de fixação.....	87
Figura 4.11. Resultados dos ensaios de DMA aos provetes de CFRP: módulo de armazenamento, módulo de perda e factor de perda em função da temperatura, para diferentes taxas de aquecimento.....	88
Figura 4.12. Resultados dos ensaios de DMA aos provetes de adesivo: módulo de armazenamento, módulo de perda e factor de perda em função da temperatura, para diferentes taxas de aquecimento.....	88
Figura 4.13. Curva típica massa-temperatura de um polímero reforçado com fibras.....	90
Figura 4.14. Analisador DSC/TGA.	90
Figura 4.15. Cadiños de platina para colocação de amostras de referência e de análise.....	90
Figura 4.16. Massa remanescente em função da temperatura e respectiva derivada.	91
Figura 4.17. Fluxo de energia em função da temperatura.	91
Figura 4.18. Modelo de cálculo adoptado.	93
Figura 4.19. Distribuição longitudinal das armaduras das vigas.	93
Figura 4.20. Pormenorização de armaduras numa secção genérica das vigas.....	93
Figura 4.21. Diagrama de esforço transverso (ao meio) e de momento fletor (em baixo) para o carregamento indicado.	94
Figura 4.22. Corte longitudinal da viga VB.	96
Figura 4.23. Pormenorização da secção de meio vão da viga VB.	96
Figura 4.24. a) pormenor dos extensómetros nos varões longitudinais; b) esquemas com a nomenclatura utilizada ao longo do documento; c) pormenor das armaduras no interior das cofragens com os espaçadores do tipo roseta.	98
Figura 4.25. a) betoneira basculante eléctrica; b) colocação e vibração simultânea do betão; c) regularização da superfície do betão.	99
Figura 4.26. a) vigas após descofragem; b) preparação da superfície do betão com martelo de agulhas; c) aspecto da superfície do betão após preparação com martelo de agulhas.	99
Figura 4.27. a) aplicação de uma camada de resina sobre a superfície de betão; b) aplicação de uma camada de resina sobre a superfície do laminado; c) rolo metálico a realizar pressão sobre o laminado.....	100
Figura 4.28. Esquema de ensaio das vigas de referência. A - macaco hidráulico; B - célula de carga; C - viga de distribuição de carga; D - apoio fixo; E - apoio móvel; F – deflectómetro.....	100
Figura 4.29. Diagramas força-deslocamento das vigas VA e VB na secção de meio vão.	102
Figura 4.30. Diagramas momento-curvatura das vigas VA e VB na secção de meio vão.	102
Figura 4.31. a) vista geral da rotura da viga VA; b) pormenor da rotura da armadura longitudinal inferior.....	104

Figura 4.32. a) vista geral da rotura da viga VB; b) pormenor do descolamento da extremidade do laminado com arrancamento de betão.	104
Figura 4.33. a) localização esquemática dos termopares; b) pormenor da fixação dos termopares ao espeto de madeira; c) fixação dos conjuntos de termopares à armadura com braçadeiras de serrilha.	107
Figura 4.34. a) execução dos furos para colocação dos termopares T1" e T2" com berbequim eléctrico; b) instrumentos utilizados para limpeza dos furos; c) selagem dos furos com calda de cimento.	107
Figura 4.35. Localização dos termopares adicionais na Viga SC40.	108
Figura 4.36. a) vista geral das vigas SC25 e SC40, protegidas com painéis de SC fixados mecanicamente; b) Pormenor do sistema de fixação mecânica.	108
Figura 4.37. a) vista geral da cofragem e rede metálica para aplicação da protecção de VP; b) parafusos inseridos em buchas metálicas; c) pormenor da fixação da extremidade da rede metálica.	109
Figura 4.38. a) preparação da argamassa de VP com recurso a misturadora eléctrica; b) preenchimento das cofragens com ajuda de uma colher; c) vista geral do sistema de protecção.	109
Figura 4.39.a) Vista exterior do forno; b) vista interior do forno através da abertura frontal.	110
Figura 4.40. a) pórtico envolvente ao forno e campânula aplicada na travessa; b) vista geral da viga sobre o forno; c) pormenor dos apoios da viga.	110
Figura 4.41. Corte esquemático do isolamento lateral das vigas (dimensões em metros - sem escala).....	111
Figura 4.42. a) selagem da interface lã mineral-viga com mástique resistente a altas temperaturas; b) selagem das arestas inferiores da viga; c) aspecto geral do sistema de isolamento lateral das vigas (excepto vigas VP40 e SC40).	111
Figura 4.43. a) aparafusamento das placas de silicato de cálcio para isolamento lateral; b) disposição das diferentes placas de isolamento lateral nos ensaios das vigas VP40 e SC40; c) pesos nas extremidades das placas de isolamento lateral.	112
Figura 4.44. Curva do incêndio padrão de acordo com a norma ISO 834.	113
Figura. 4.45. Esquema do sistema de aplicação de carga (vista frontal; dimensões em metros; sem escala;..	113
Figura. 4.46. Pormenor da viga de distribuição de carga.	114
Figura 4.47. Sistema de suspensão dos pesos numa das extremidades da viga de distribuição (nesta figura são visíveis os pesos utilizados nos ensaios às vigas CFRP a SC40).	114
Figura 4.48. a) pormenor da fixação do fio do deflectómetro na face superior das vigas; b) pormenor dos termopares adicionais na Viga SC40.	116
Figura 4.49. Curvas temperatura-tempo do forno nos ensaios às vigas RC a SC40.	118
Figura 4.50. a) localização dos termopares na secção de meio vão das vigas RC a SC40; b) localização dos termopares adicionais na Viga SC40.	119
Figura 4.51. Diagrama temperatura-tempo da Viga RC.	119
Figura 4.52. Diagrama temperatura-tempo da Viga CFRP.	119
Figura 4.53. Diagrama temperatura-tempo da Viga VP25.	119
Figura 4.54. Diagrama temperatura-tempo da Viga VP40.	119
Figura 4.55. Diagrama temperatura-tempo da Viga SC25.	120
Figura 4.56. Diagrama temperatura-tempo da Viga SC40.	120
Figura 4.57. Perfis de temperatura na Viga RC.	122

Figura 4.58. Perfis de temperatura na Viga CFRP	122
Figura 4.59. Perfis de temperatura na Viga VP25	122
Figura 4.60. Perfis de temperatura na Viga VP40	122
Figura 4.61. Perfis de temperatura na Viga SC25	123
Figura 4.62. Perfis de temperatura na Viga SC40	123
Figura 4.63 Deslocamento a meio vão das vigas em função do tempo de exposição ao calor.....	123
Figura 4.64. Diagrama extensão-tempo da Viga CFRP	126
Figura 4.65. Viga RC: a) destruição do sistema de isolamento lateral; b) fendilhação na zona central da viga e desagregação de betão nas arestas inferiores.	127
Figura 4.66. Viga CFRP: a) descolamento da extremidade do laminado; b) comprimento do laminado que ficou protegido; c) isolamento do laminado na zona da parede do forno; d) zona central do laminado completamente destacada da viga.	128
Figura 4.67. Viga CFRP: a) rotura por flexão da viga, onde se observa a resina de colagem ainda aderente ao laminado; b) decomposição da matriz polimétrica do laminado deixando expostas as fibras de carbono...	128
Figura 4.68. Viga VP25: a) rotura por flexão da viga; b) vista inferior do sistema da argamassa de vermiculite e perlite após o ensaio de resistência ao fogo.	129
Figura 4.69. Viga VP25: a) rotura do reforço por descolamento da extremidade; b) pormenor dos cortes nas fibras numa secção central.	129
Figura 4.70. Viga VP40: a) perda de aderência betão-resina na zona central da viga; b) comparação do aspecto do sistema de protecção nas zonas de extremidade do laminado e central da viga.....	130
Figura 4.71. Viga SC25: a) aspecto geral da Viga SC25 após o ensaio; b) detalhe da zona central da viga com colapso eminente do sistema de protecção.	130
Figura 4.72. Viga SC40: a) vista inferior da Viga SC40 e do sistema de isolamento lateral após o ensaio; b) detalhe da rotura do sistema de reforço na zona de extremidade do laminado.	131
Figura 4.73. Tempos até atingir T_g e rotura do reforço.	132
Figura 4.74. Tempo de protecção do reforço e campo de aplicação das vigas testadas.	134
Figura 5.1. Malha de elementos finitos utilizada no modelo	140
Figura 5.2. Módulo de elasticidade normalizado dos vários materiais em função da temperatura.....	140
Figura 5.3. Calor específico normalizado dos vários materiais em função da temperatura.....	140
Figura 5.4. Condutibilidade térmica normalizada dos vários materiais em função da temperatura.....	140
Figura 5.5. Comparação entre os valores de temperatura em função do tempo medidos no ensaios e obtidos no modelo.....	141
Figura 5.6. Comparação entre os valores do deslocamento a meio vão em função do tempo medidos no ensaios e obtidos no modelo	141
Figura 5.7. Variação da massa volúmica do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2.....	143
Figura 5.8. Variação do calor específico do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2.....	144

Figura 5.9. Variação da condutibilidade térmica do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2	144
Figura 5.10. Variação da massa volúmica do CFRP em função da temperatura.	145
Figura 5.11. Variação do calor específico do CFRP em função da temperatura.	146
Figura 5.12. Variação da condutibilidade térmica do CFRP em função da temperatura.	147
Figura 5.13. Variação da massa volúmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura..	148
Figura 5.14. Variação do calor específico da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura...	148
Figura 5.15. Variação da condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura.	149
Figura 5.16. Variação da massa volúmica dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.....	150
Figura 5.17. Variação do calor específico dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.....	151
Figura 5.18. Variação da condutibilidade térmica dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.	152
Figura 5.19. Variação da massa volúmica do ar atmosférico em função da temperatura.	153
Figura 5.20. Variação do calor específico do ar atmosférico em função da temperatura.	153
Figura 5.21. Variação da condutibilidade térmica do ar atmosférico em função da temperatura.....	154
Figura 5.22. Representação esquemática do elemento <i>PLANE55</i> de a) quatro nós e b) três nós.....	155
Figura 5.23. Representação esquemática do elemento <i>SURF151</i> de três nós.	155
Figura 5.24. a) discretização do modelo da viga SC25 e b) respectivo pormenor na zona do reforço e camada de ar atmosférico.	156
Figura 5.25. Condições de fronteira admitidas no modelo base.	157
Figura 5.26. Localização dos termopares na secção de meio vão das vigas RC a SC40.....	161
Figura 5.27. Diagrama temperatura-tempo da viga RC: valores experimentais e numéricos (modelo 50).....	163
Figura 5.28 Diagrama temperatura-tempo da viga CFRP: valores experimentais e numéricos (modelo 50)....	164
Figura 5.29. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga VP25.....	166
Figura 5.30. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga VP40.....	167
Figura 5.31. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga SC25.....	168
Figura 5.32. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga SC40.....	170

Índice de tabelas

Tabela 2.1. Principais propriedades das fibras (sintéticas) mais utilizadas em engenharia civil para reforçar FRP's.....	8
Tabela 2.2. Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis.....	12
Tabela 2.3. Propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente dos adesivos epóxidos à temperatura ambiente.....	15
Tabela 2.4 Principais características físicas e mecânicas dos laminados de CFRP comercializados em Portugal (valores médios, segundo a direcção das fibras, à temperatura ambiente).....	18
Tabela 2.5. Propriedades físicas e mecânicas (à temperatura ambiente) de mantas de fibras de carbono unidirecionais <i>SikaWrap 230 C</i> , em bruto e após a impregnação com resina.....	19
Tabela 2.6. Factor de redução ambiental para as propriedades do reforço de CFRP de acordo com as condições de exposição.....	30
Tabela 3.1. Coeficientes de dilatação térmica de laminados de CFRP.....	55
Tabela 3.2. Propriedades aproximadas da argamassa leve Tyfo VG à temperatura ambiente	65
Tabela 3.3. Características do reforço e da protecção ao fogo das vigas ensaiadas.....	65
Tabela 3.4. Descrição do isolamento das lajes ensaiadas por Williams <i>et al.</i>	68
Tabela 4.1. Composição do betão das vigas ensaiadas.....	76
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias em cubos.....	76
Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de resistência à tração aos 28 dias por compressão diametral.....	78
Tabela 4.4. Propriedades mecânicas do betão aos 28 dias.....	78
Tabela 4.5. Propriedades mecânicas do betão com diferentes idades.....	78
Tabela 4.6. Propriedades mecânicas do aço das armaduras ordinárias.....	79
Tabela 4.7. Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP a utilizar no dimensionamento.....	80
Tabela 4.8. Dimensões médias da secção e comprimento inicial livre dos provetes.....	81
Tabela 4.9. Força, tensão e extensão na ruptura, e módulo de elasticidade em tracção dos provetes de adesivo.....	84
Tabela 4.10. Resumo das propriedades em tracção dos provetes de adesivo.....	84
Tabela 4.11. Dimensões médias das secções dos provetes ensaiados.....	87
Tabela 4.12. Temperaturas de transição vítreas obtidas pelas diferentes curvas e para cada taxa de aquecimento.....	89
Tabela 4.13. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VA.....	95
Tabela 4.14. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VB.....	98
Tabela 4.15. Comparação entre as estimativas de carga e os valores obtidos experimentalmente.....	103
Tabela 4.16. Abertura de fendas a meio vão das vigas para os carregamentos indicados.....	104

Tabela 4.17. Descrição geral das vigas utilizadas nos ensaios de resistência ao fogo.....	105
Tabela 4.18. Comparaçao entre o carregamento utilizados nos ensaios e as estimativas anteriormente efectuadas.....	115
Tabela 4.19. Valores medidos do deslocamento a meio vão ($\delta_{meio\ v\u00e3o}$) das vigas para t=0 segundos.....	124
Tabela 4.20. Estimativas das flechas a meio vão das vigas ap\u00f3s correc\u00e7\u00e3o dos valores de carregamento e posicionamento das cargas.....	124
Tabela 4.21. Resumo de alguns dos resultados dos ensaios de resist\u00eancia ao fogo das vigas refor\u00e7adas (valores obtidos a meio v\u00e3o).....	132
Tabela 5.1. Tempo total de simula\u00e7\u00e3o de cada tipo de viga.....	157
Tabela 5.2. Influ\u00eancia do coeficiente de convec\u00e7\u00e3o da face quente.	158
Tabela 5.3. Influ\u00eancia do coeficiente de convec\u00e7\u00e3o da face fria.	159
Tabela 5.4. Influ\u00eancia das trocas de calor por convec\u00e7\u00e3o e radia\u00e7\u00e3o na face fria.	159
Tabela 5.5. Influ\u00eancia das trocas de calor por convec\u00e7\u00e3o e radia\u00e7\u00e3o na face quente.	160
Tabela 5.6. Nomenclatura utilizada para os valores de temperatura obtidos por via experimental e num\u00e9rica.	161
Tabela 5.7. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga RC</i>	162
Tabela 5.8. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga CFRP</i>	164
Tabela 5.9. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga VP25</i>	165
Tabela 5.10. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga VP40</i>	167
Tabela 5.11. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga SC25</i>	168
Tabela 5.12. Erro m\u00e9dico por termopar e erro m\u00e9dico global dos modelos da <i>viga SC40</i>	169

Simbologia

Notações romanas

Símbolo	Descrição
A_f	Área de laminado
a_L	Translação do diagrama de momento fletor
A_s	Área de armadura
b	Largura da secção de betão
b_f	Largura do laminado
b_p	Largura do provete de adesivo
C	Força resultante das tensões de compressão no betão
C_E	Factor de redução ambiental
c_p	Calor específico
C_V	Coeficiente de variação
c_2	Distância entre a fibra superior da secção e a posição da linha neutra
d	Distância entre a fibra superior da secção e o centro de gravidade das armaduras
E'	Módulo de armazenamento
E''	Módulo de perda
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do betão
(EI)	Rigidez de flexão elástica
$(EI)_2$	Rigidez de flexão em estado fendilhado
E_f	Módulo de elasticidade do laminado
E_s	Módulo de elasticidade das armaduras
E_t	Módulo de elasticidade à tracção do adesivo
f_c'	Resistência característica do betão à compressão (simbologia do ACI)
f_{cbd}	Tensão de corte resistente do betão
$f_{ck,cilindros}$	Resistência característica do betão à compressão em cilindros
$f_{ck,cubos}$	Resistência característica do betão à compressão em cubos
$f_{cm,28\ dias}$	Resistência média do betão à compressão em cubos aos 28 dias
$f_{cm,cubos}$	Resistência média do betão à compressão em cubos
f_{ct}	Resistência à tracção do betão por compressão diametral
$f_{ctm,28\ dias}$	Resistência média do betão à tracção aos 28 dias
f_s	Tensão de tracção nas armaduras
F_{T,f,X'_1}	Força de tracção instalada no laminado na secção de dispensa
F_{tu}	Força de rotura à tracção do adesivo
f_{um}	Tensão de rotura média das armaduras
f_x	Fluxo de calor transmitido por unidade de área na direcção x
f_{yd}	Tensão de cedência de cálculo das armaduras
f_{yk}	Tensão de cedência característica das armaduras
f_{ym}	Tensão de cedência média das armaduras
H	Altura do edifício

h_c	Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção
h_f	Distância entre a fibra superior da secção e o centro do laminado
h_r	Coeficiente de transmissão de calor por radiação
I	Inércia
k	Condutibilidade térmica
k_b	Factor que tem em conta a geometria da amarração
k_c	Factor de redução que tem em conta o estado de compacidade do betão
k_o	Coeficiente que entra em consideração com o efeito das armaduras e da fendilhação
L	Comprimento do vão da viga
l_b	Comprimento de amarração
$l_{b,\text{máx}}$	Comprimento de amarração máximo
M	Momento fletor (genérico)
M_{cr}	Momento de fendilhação
M_i	Temperatura no termopar i obtida numericamente
M_n	Momento fletor resistente nominal
M_{rd}	Momento resistente de cálculo
M_{rm}	Momento resistente médio
M_u	Momento fletor actuante de cálculo
$P_{\delta=L/250}$	Carga que provoca a flecha de valor $L/250$
P_{cr}	Carga de fendilhação
P_{rd}	Carga resistente de cálculo
P_{rm}	Carga resistente média
$P_{rd}^{\text{flexão}}$	Valor de cálculo da carga que provoca a rotura por flexão
$P_{rm}^{\text{flexão}}$	Valor médio da carga que provoca a rotura por flexão
$P_{rd}^{\text{aderência}}$	Valor de cálculo da carga que provoca a rotura por perda de aderência
$P_{rm}^{\text{aderência}}$	Valor médio da carga que provoca a rotura por perda de aderência
$Q_{S1 \rightarrow S2}$	Calor transmitido da superfície S1 para a superfície S2
R_n	Resistência nominal
S_{DL}	Acções permanentes
S_{LL}	Acções variáveis
S_n	Desvio padrão
t	Tempo
T	Temperatura
T_d	Temperatura de decomposição
T_f	Força resultante das tensões de tracção no laminado
t_f	Espessura do laminado
T_{fa}	Força de amarração resistente na zona de ancoragem
$T_{fa,\text{máx}}$	Força de amarração resistente máxima na zona de ancoragem
T_g	Temperatura de transição vítreo
T_i	Temperatura no termopar i obtida experimentalmente
t_p	Espessura do revestimento de adesivo

T_s	Força resultante das tensões de tracção nas armaduras
V	Esforço transverso
V_{rd}	Esforço transverso resistente de cálculo
V_{rm}	Esforço transverso resistente médio
w_{DL}	Carga permanente
W_{el}	Módulo de flexão elástico
w_k	Abertura de fendas
w_{LL}	Carga variável
w_u	Carga de dimensionamento
z	Distâncias entre as resultantes das forças de compressão e tracção

Notações gregas

Símbolo	Descrição
α	Factor de redução da resistência da ligação que tem em conta a influência das fendas de corte
ρ	Massa volúmica
ρ_f	Percentagem de reforço
ρ_s	Percentagem de armadura
β_1	Rácio entre a distância entre a fibra superior da secção e a posição da linha neutra e altura do diagrama de compressões no betão
δ	Ângulo de fase
$\delta_{el.}$	Flecha elástica
δ_i	Percentagem de erro de cada valor numérico
δ_o	Flecha instantânea
γ_c	Coeficiente minorativo da resistência do betão
ε	Emissividade
ε_{bi}	Extensão de tracção inicial do betão
ε_c	Extensão de compressão do betão
ε_{cu}	Extensão última de compressão do betão
ε_f	Extensão no laminado
$\varepsilon_f^{exp.}$	Extensão experimental no laminado
ε_{fd}	Valor limite da extensão no laminado
ε_{fu}	Extensão última de cálculo do laminado
ε_{fu}^*	Extensão última nominal do laminado
ε_s	Extensão nas armaduras traccionadas
$\varepsilon_s^{exp.}$	Extensão experimental nas armaduras traccionadas
ε_{syd}	Valor de cálculo da extensão de cedência das armaduras
ε_{syk}	Valor característico da extensão de cedência das armaduras
ε_{sym}	Valor médio da extensão de cedência das armaduras
ε_{tu}	Extensão de rotura à tracção do adesivo
f	Factor de redução da capacidade mecânica do laminado
λ_c	Condutibilidade térmica do betão

σ	Constante de Stefan-Boltzmann
σ_{fu}	Tensão última de cálculo do laminado
σ_{fu}^*	Tensão última nominal do laminado
σ_{tu}	Tensão de rotura à tracção do adesivo
θ	Ângulo de inclinação das bielas de compressão
\emptyset	Facto de redução da resistência

Siglas

Símbolo	Descrição
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFRP	Polímero reforçado com fibras de aramida (do termo inglês <i>aramid fibre reinforced polymer</i>)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEB	<i>Comité Euro-International du Béton</i>
CFRP	Polímero reforçado com fibras de carbono (do termo inglês <i>carbon fibre reinforced polymer</i>)
DIBt	<i>Deutches Institut fur Bautechnik</i>
DMA	Análise mecânica dinâmica (do termo inglês <i>Dynamic mechanical analysis</i>)
DSC	Calorimetria diferencial de varrimento (do termo inglês <i>differential scanning calorimetry</i>)
EBR	<i>Externally bonded reinforcement</i>
EC2	Eurocódigo 2
ESPI	<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i>
Fib	<i>Fédération Internacionale du béton</i>
FRP	Polímero reforçado com fibras (do termo inglês <i>fibre reinforced polymer</i>)
GFRP	Polímero reforçado com fibras de vidro (do termo inglês <i>glass fibre reinforced polymer</i>)
HM	Rigidez elevada (do termo inglês <i>high modulus</i>)
HS	Resistência elevada (do termo inglês <i>high strength</i>)
IM	Rigidez intermédia (do termo inglês <i>intermediate modulus</i>)
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Standards Organization</i>
IST	Instituto Superior Técnico
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência de materiais
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NSM	Near surface mounted
RC	Betão armado (do termo inglês <i>reinforced concrete</i>)
SIA	<i>Swiss Society of Engineers and Architects</i>
SC	Silicato de cálcio
TGA	Análise de termogravimetria (do termo inglês <i>thermogravimetric analysis</i>)
UHM	Rigidez ultra elevada (do termo inglês <i>ultra high modulus</i>)
UHS	Resistência ultra elevada (do termo inglês <i>ultra high strength</i>)
VP	Vermiculite e perlite

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

A primeira metade do século XX é caracterizada por uma evolução extraordinária na utilização do betão e na compreensão do seu comportamento, tornando-se rapidamente o principal material de construção em aplicações estruturais. No entanto, ao contrário do que se pensava no início desse século, o betão armado não é um material eterno, apresentando-se, pelo contrário, sensível a determinados ambientes, podendo apresentar elevada deterioração ao longo do tempo. A consequente perda de resistência mecânica associada a este comportamento a longo prazo, o aumento das solicitações das estruturas, a ocorrência de acidentes (incêndios ou sismos), a existência de erros de concepção e/ou construção, a necessidade das estruturas antigas cumprirem uma filosofia de segurança mais recente ou um deficiente comportamento em serviço são alguns dos factores que têm motivado o reforço de estruturas de betão armado.

Ao longo das últimas décadas têm sido utilizadas várias técnicas de reforço de estruturas de betão, nomeadamente a adição de armaduras em aço exteriores ao elemento inicial, quer seja por simples colagem ou por aplicação de pré-esforço. No entanto, nestas técnicas são utilizados materiais (principalmente o aço) que, tal como os do elemento inicial, são susceptíveis à deterioração, necessitando, igualmente, de manutenção. Recorrendo a estes materiais de construção tradicionais, torna-se praticamente impossível conceber técnicas de reforço que consigam, simultaneamente, minimizar os efeitos na arquitectura, apresentar elevadas características de durabilidade e resistência mecânica, e ser fáceis e rápidas de aplicar. No sentido de criar técnicas que respeitassem as características anteriormente referidas, surgiram em meados dos anos oitenta os primeiros estudos sobre a utilização de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP's, do termo inglês "*Fiber Reinforced Polymers*") no reforço de estruturas de betão. Estes materiais, que até àquela data eram utilizados com grande sucesso em diversas indústrias (naval, aeroespacial e automóvel), são constituídos por fibras de carbono, vidro ou aramida embebidas numa matriz polimérica, em geral de poliéster, viniléster ou epóxida. Face aos materiais tradicionais, e principalmente ao aço, os FRP's apresentam como principais vantagens a elevada resistência à tracção, a reduzida massa volémica, a elevada resistência à corrosão e à fadiga e uma notável facilidade de transporte e de aplicação. Desde então, os FRP's têm sido utilizados em inúmeras operações de reforço de estruturas de betão armado, destacando-se os reforços à flexão e ao esforço transverso de vigas e ao esforço axial de pilares, quer sejam elementos da estruturas de edifícios ou pontes. Dos vários tipos de FRP's, os constituídos por uma matriz à base de resina epóxida na qual são embebidas fibras de carbono (CFRP's, do termo inglês "*Carbon Fiber Reinforced Polymers*") são os que apresentam características que melhor se adaptam à maioria das situações de reforço, principalmente pelo seu módulo de elasticidade mais elevado, registando valores próximos dos do aço. Assim, são necessárias menores deformações dos elementos em que estes materiais estão aplicados para que seja mobilizada a sua elevada tensão resistente à tracção, que tipicamente varia entre 1200 MPa e 3000 MPa, dependendo do tipo e forma do CFRP.

Os CFRP's constituem uma alternativa possível à utilização de materiais tradicionais no reforço de estruturas de betão, apresentando a seu favor as vantagens referidas anteriormente. No entanto, o seu custo relativamente elevado e alguns aspectos específicos do seu comportamento impedem que sejam uma alternativa incontestável às técnicas e materiais tradicionais. O facto de a relação constitutiva dos CFRP's ser linear até à rotura faz com que este material apresente um comportamento frágil. Além disso, e apesar de a sua tensão resistente à tracção ser bastante elevada, os mecanismos de rotura prematuros do sistema de reforço na ligação betão-CFRP são relativamente frequentes, impedindo que a capacidade resistente do CFRP seja completamente explorada. Estes dois aspectos têm como consequência uma diminuição da ductilidade dos elementos reforçados com este tipo de sistemas. Contudo, ao longo dos últimos anos, o

comportamento mecânico de elementos de betão armado reforçados com CFRP's foi alvo de estudos relativamente profundos, existindo, por isso, verificações de segurança nos diversos regulamentos/normas que, directa ou indirectamente, tentam minimizar a ocorrência de roturas prematuras e a redução de ductilidade dos elementos.

O comportamento dos sistemas de reforço com CFRP a temperaturas elevadas (quer sejam sistemas por simples colagem ou que recorrem a dispositivos de fixação que possibilitam o pré-esforço) constitui uma das suas principais desvantagens. Quando a temperatura atinge o valor que caracteriza o fenómeno de transição vítreo do material mais susceptível a este tipo de acção (geralmente a resina de colagem ou de impregnação, dependendo do tipo de sistema), que se situa entre 50°C e 140°C, verifica-se a passagem de um estado vítreo para um estado viscoso. A esta transformação está associada uma redução considerável das propriedades mecânicas do material e uma consequente perda de resistência do sistema de reforço, o que pode colocar em risco a própria segurança do elemento e da estrutura da qual faz parte. Esta situação é problemática, sobretudo, quando o sistema de reforço é sujeito à acção do fogo. Apesar de este comportamento estar identificado, ainda não foram desenvolvidos estudos conclusivos que indiquem quais as metodologias mais eficazes que permitam ultrapassar esta limitação. Esta falta de informação é notória quando se observam as recomendações dos diversos regulamentos/normas dirigidas a este tipo de reforço. Tipicamente, é referido que nas verificações de segurança que envolvam a acção do incêndio deve-se desprezar a contribuição para a resistência do sistema de reforço, excepto em casos que se elaborem estudos que comprovem que através da aplicação de sistemas de protecção ao fogo a temperatura de transição vítreo dos materiais não é atingida. De facto, a susceptibilidade dos materiais que constituem os sistemas de CFRP a temperaturas elevadas, associada à escassez de informação sobre medidas adequadas que permitam melhorar esse comportamento, constituem os principais motivos pelos quais este tipo de sistemas não apresenta uma maior expressão no reforço de estruturas de edifícios, onde o incêndio constitui uma acção de projecto.

1.2. Objectivos e metodologia

O principal objectivo desta dissertação consistiu no estudo do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP.

Como referido no ponto anterior, a susceptibilidade deste tipo de sistemas de reforço à acção do fogo constitui uma das suas principais desvantagens. No entanto, este tema carece de investigações conclusivas sobre metodologias que permitam melhorar o desempenho destes sistemas quando sujeitos a altas temperaturas. Com o objectivo de contribuir para o avanço do conhecimento nesta área, foram realizados ensaios de resistência ao fogo a uma viga de betão armado e a cinco vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP colados na face inferior da viga (técnica EBR - *externally bonded reinforcement*), nos quais se testou a eficácia, medida através do tempo até à rotura do reforço e/ou da viga, de dois sistemas de protecção (painéis de silicato de cálcio e argamassa à base de vermiculite e perlite) com duas espessuras diferentes (25 e 40 mm), comparando os resultados entre si e com os obtidos numa viga sem qualquer tipo de isolamento térmico. Simultaneamente com a protecção da face inferior das vigas, foi estudado o possível efeito benéfico do isolamento térmico das zonas de ancoragem dos laminados, garantido pelas paredes laterais do forno que impediram a acção directa do fogo num comprimento de cerca de 20 cm nas extremidades do reforço. As vigas foram sujeitas à acção simultânea do incêndio padrão definido na norma ISO 834 na sua face inferior e de um carregamento típico de condições de serviço aplicado na sua face superior. Refira-se que para validar o dimensionamento do reforço, realizaram-se ensaios de flexão (sem acção do calor) a duas vigas de referência. Para complementar os ensaios anteriores, foram realizados estudos experimentais para a caracterização dos seguintes materiais: (i) betão, (ii)

CFRP e (iii) adesivo de colagem. Para o material betão foram efectuados ensaios que permitiram avaliar a sua resistência a esforços de compressão e tracção. Realizaram-se ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA) e de calorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA) a amostras de CFRP e de adesivo com o objectivo de determinar, respectivamente, o valor das temperaturas de transição vítreia e de decomposição de ambos os materiais. Foram ainda realizados ensaios de tracção a provetas de adesivo em que se determinaram o módulo de elasticidade e extensão e tensão últimas para este tipo de esforço.

Os ensaios referidos foram precedidos de um estudo bibliográfico, em que se analisaram as principais características dos FRP's, a metodologia regulamentar utilizada para o dimensionamento do reforço à flexão e os principais ensaios realizados por outros autores sobre este tema, fornecendo informações essenciais para a compreensão e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados no âmbito da presente dissertação.

Esta dissertação teve ainda como objectivo o desenvolvimento de um modelo numérico termoquímico, através do programa comercial ANSYS, para simular a resposta térmica de secções de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP e respectivos sistemas de protecção ao fogo, em particular das secções-tipo das vigas ensaiadas. A elaboração deste modelo numérico envolveu um estudo bibliográfico sobre a variação com a temperatura das propriedades termofísicas de todos os materiais constituintes das vigas referidas e das opções de modelação mais aconselháveis neste tipo de estudos.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. Seguidamente, procede-se à descrição sumária de cada capítulo.

No presente capítulo pretende-se introduzir o tema desenvolvido no contexto geral da engenharia civil, apresentar os objectivos do trabalho realizado e a metodologia utilizada para alcançar esses objectivos.

No segundo capítulo são apresentadas as principais características dos materiais FRP's em geral, e dos CFRP's em particular, descrevendo a sua evolução histórica, as propriedades dos materiais constituintes, o processo de fabrico, as formas estruturais, as principais propriedades físicas e mecânicas e técnicas de reforço de estruturas de betão em que são aplicados. Nesse capítulo é ainda abordado o reforço de vigas de betão armado à flexão com CFRP's, descrevendo-se as principais técnicas e as indicações gerais para o dimensionamento segundo propostas normativas actuais.

No terceiro capítulo é apresentado o efeito das temperaturas elevadas nas principais propriedades físicas e mecânicas dos materiais que constituem as vigas estudadas na presente dissertação, nomeadamente o betão, as armaduras em aço, os laminados de CFRP e o adesivo de colagem. É referido o efeito da temperatura no comportamento da ligação betão-CFRP e são apresentados diversos sistemas de protecção ao fogo, susceptíveis de serem utilizados em elementos de betão armado reforçados com FRP's. Finalmente, são apresentados os principais estudos realizados por outros investigadores sobre o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP a temperaturas elevadas, incluindo os seus resultados e principais conclusões.

O quarto capítulo refere-se ao estudo experimental realizado no âmbito deste trabalho, onde se descrevem todos os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos e a respectiva análise, de entre os quais se destacam: os ensaios de caracterização do betão, CFRP e adesivo utilizados nas

vigas; os ensaios de flexão (sem calor) às vigas de referência; e, principalmente, os ensaios de resistência ao fogo realizados a seis vigas.

O quinto capítulo aborda o modelo numérico termoquímico elaborado para simular a evolução das temperaturas ao longo do tempo de exposição ao fogo das secções-tipo das vigas ensaiadas. Numa primeira fase é apresentado um exemplo de estudo numérico realizado por outros investigadores, com objectivos idênticos aos do modelo elaborado no presente trabalho. Na segunda fase é apresentada a modelação efectuada para a variação das propriedades termofísicas dos materiais com a temperatura, à qual se segue a descrição do modelo e posterior comparação com os resultados experimentais, sendo, para isso, calculados os respectivos erros médios.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões decorrentes dos estudos experimental e numérico, sugerindo-se aspectos passíveis de serem melhorados e abordados em estudos futuros e que permitirão melhorar o conhecimento sobre o comportamento ao fogo de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP.

2. Utilização de sistemas FRP no reforço de estruturas de betão armado

2.1. Introdução

Neste capítulo sintetiza-se o actual estado do conhecimento sobre o reforço de estruturas de betão armado com materiais compósitos reforçados com fibras (do inglês, “Fiber Reinforced Polymers” ou FRP’s), em particular com fibras de carbono (do inglês “Carbon Fibre Reinforced Polymers” ou CFRP’s).

Numa primeira fase resume-se a evolução histórica dos compósitos, à qual se segue a descrição sumária dos materiais que os constituem. Seguidamente, são abordados, exclusivamente, os compósitos de CFRP, nomeadamente a descrição das suas formas e respectivos processos de fabrico, bem como a sua aplicação no reforço de estruturas de betão. Finalmente, são expostas as técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados com CFRP, indicando-se as principais recomendações para o seu dimensionamento segundo os documentos normativos actuais.

2.2. Evolução histórica dos materiais compósitos

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais que, utilizados isoladamente, podem não ser adequados como materiais de construção mas que, quando combinados, e mantendo uma superfície de interface identificável, podem constituir um novo material, que conjuga as melhores propriedades de cada um dos materiais que lhe deram origem [2.1]. Cedo o Homem aprendeu a juntar diferentes materiais entre si, recorrendo a outros para concretizar essa ligação (propriedade adesiva), como, por exemplo, a argila, o barro, as resinas vegetais, a clara do ovo, entre outros. Existem registos de que, há mais de sete mil anos atrás, os artesãos utilizavam o piche natural (hidrocarbonetos que surgiam livres à superfície terrestre) para colar o juncos com o qual fabricavam barcos. Nas antigas civilizações, Gregos e Romanos utilizavam nas suas construções, à base de madeira e pedra, misturas adesivas como o sangue de animais e resinas de árvores. Os Egípcios utilizavam palha misturada com argila para fabricar tijolos, com o objectivo de melhorar o seu desempenho estrutural. De facto, estas são evidências de que os materiais compósitos acompanharam a evolução da humanidade desde os seus primórdios [2.2].

Enquanto que o conceito de materiais compósitos existe há vários séculos, a incorporação de fibras de reforço numa matriz polimérica é uma tecnologia relativamente recente, e só se tornou possível com o desenvolvimento da indústria dos plásticos, a partir do início do século XX. A primeira aplicação conhecida dos materiais poliméricos reforçados com fibras data de meados da década de 1930, quando, num projecto experimental, foram utilizados no casco de um barco [2.3].

Na década de 1940, as indústrias de defesa naval e aeroespacial foram as grandes impulsionadoras do desenvolvimento dos materiais compósitos (figuras 2.1 a e 2.1 b), destacando-se as aplicações de fibras de vidro embebidas em poliéster em cascos de navios e em coberturas de radares, sobretudo devido à elevada resistência a ambientes agressivos, ao bom comportamento térmico e electromagnético e à sua leveza [2.4]. Ainda nessa década, a indústria petrolífera torna-se num dos maiores consumidores de FRP’s, quer para elementos estruturais de plataformas em alto mar, quer para tubagens, onde era essencial uma elevada resistência química [2.5]. No início da década de 1950, as propriedades particulares dos FRP’s tornaram-nos materiais competitivos para as indústrias químicas, da pasta do papel, estações de tratamento de águas e esgotos e estações eléctricas.



Figura 2.1. a) utilização de compósitos com fibras de vidro no casco de navios militares [2.6]; b) utilização de FRP em aviões militares [2.7]; c) utilização de FRP em automóveis de competição [2.8].

A indústria automóvel introduziu materiais compósitos nos seus componentes, pela primeira vez, no início da década de 1950 (figura 2.1 c) e, na década de 1970, era já a principal consumidora de compósitos, suplantando a indústria naval [2.3]. Neste período, na área da construção, destacam-se dois projectos experimentais denominados “*Monsanto House of the Future*” (figura 2.2 a) e “*American Pavilion in Brussels*” (figura 2.2 b), em que foram utilizados compósitos de fibra de vidro como revestimentos de fachada, conferindo a estes edifícios um aspecto vanguardista.

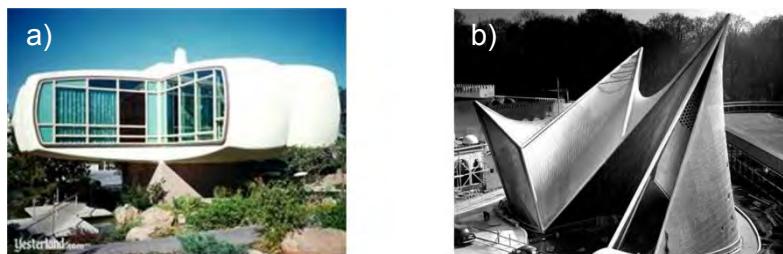


Figura 2.2. a) “*Monsanto House of the Future*” – revestimentos em compósitos de fibras de vidro [2.9]; b) “*American Pavilion in Brussels*” – fachadas totalmente em compósito de fibra de vidro [2.10].

Na década de 1960 começaram a ser produzidos os “materiais compósitos avançados”, constituídos por fibras de elevado módulo de elasticidade e resistência, como as fibras de carbono. Contudo, o elevado preço destes materiais nessa época, não permitia a sua utilização fora das aplicações espaciais e da aviação militar.

Na década de 1970, no contexto da crise energética, houve um esforço da indústria dos compósitos para reduzir o custo de produção, permitindo alargar o seu campo de aplicação a outros mercados, de que são exemplo os aviões, barcos de recreio (figuras 2.3 a e b) e artigos desportivos, incluindo produtos tão diversos como canas de pesca (figura 2.3 c), raquetes de ténis, tacos de golfe ou equipamentos de esqui.



Figura 2.3. a) utilização de materiais compósitos em planadores [2.11]; b) barco de recreio com casco totalmente em compósito de fibras de vidro [2.12]; c) cana de pesca em compósito de fibras de carbono [2.13].

Na década de 1980 desenvolveram-se novos processos de fabrico de fibras de carbono com excelentes propriedades mecânicas e a preços inferiores. Nesta fase, pensava-se que a sua produção poderia ultrapassar a das fibras de vidro, mas estas continuaram a ser o principal material utilizado como reforço em materiais compósitos para aplicações estruturais. Em paralelo, ocorreu um impulso na produção de plásticos reforçados com fibras de aramida [2.14].

No final da década de 1980 e na década de 1990, a descida de custo dos FRP's (associada à evolução tecnológica de processos de fabrico como a pultrusão) acompanhou a necessidade de renovar um conjunto de infra-estruturas, sobretudo rodoviárias, com exigências de funcionalidade crescentes. O desenvolvimento de projectos-piloto, apoiados pela indústria e por organizações governamentais, em paralelo com o crescimento do esforço de investigação, contribuiu para uma aceitação cada vez maior destes materiais em aplicações do sector da construção. Este assunto despertou frentes de trabalho em localizações distintas, destacando-se o Japão, interessado na pré-fabricação e no pré-esforço por pré-tensão, a América do Norte, motivada nas soluções para problemas de durabilidade, e a Europa, preocupada com a necessidade de preservar o património histórico.

Na década de 1990 tiveram início uma série de conferências internacionais que visavam discutir aspectos específicos do uso destes materiais compósitos na Engenharia Civil.

Desde então, têm sido desenvolvidos produtos muito diversificados (incluindo varões e cabos de pré-esforço para o reforço interior de estruturas de betão, laminados e mantas para o reforço exterior de estruturas de betão, cabos para pontes suspensas, perfis estruturais e painéis de laje pré-fabricados), que têm tido um número crescente de aplicações, quer em obras de reparação, quer em construções novas.

2.3. Características gerais dos plásticos reforçados com fibras

Os FRP's utilizados no reforço estrutural são constituídos, fundamentalmente, por duas fases: as fibras e a matriz polimérica. As fibras garantem ao compósito a necessária resistência e rigidez, enquanto a matriz, envolvendo completamente a primeira fase, protege-a da acção directa de agentes ambientais, assegura uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evita a micro-encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão. Por estas razões diz-se que a matriz tem características sinergéticas [2.15]. Para além disso, os plásticos reforçados com fibras podem incorporar material de enchimento (*filler*) e uma série de aditivos, que permitem melhorar certas propriedades e o próprio processo de fabrico. Assim, de uma forma geral, o comportamento destes materiais compósitos depende da composição, orientação e comprimento das fibras (curtas ou longas), da forma como se dispõem no seio da matriz, das propriedades mecânicas da própria matriz, assim como da ligação entre estes dois materiais.

A combinação criteriosa destes materiais tem permitido o desenvolvimento de uma vasta gama de produtos, que têm sido utilizados em aplicações estruturais muito diversas. Nos pontos seguintes apresenta-se um resumo das principais características das matérias constituintes dos FRP's e dos adesivos utilizados para a sua colagem.

2.3.1. Materiais constituintes

2.3.1.1. Fibras

As fibras¹⁾ são o elemento estrutural principal dos materiais compósitos de FRP, na medida em que garantem resistência e rigidez. Os parâmetros que influenciam o comportamento das fibras são a forma, o comprimento, a orientação, o grau de concentração e a composição química. A forma contínua é aquela que permite, numa situação de reforço estrutural, um melhor desempenho do compósito devido à possibilidade de orientar as fibras em direcções específicas. A orientação das fibras é uma condicionante do seu comportamento, já que influencia o valor do módulo de elasticidade e da resistência à tracção. Estes atingem valores máximos para a direcção principal das fibras e vão diminuindo, progressivamente, à medida que o ângulo em análise se afasta daquela direcção. Sendo o material compósito constituído por fibras e pela matriz, que garante a impregnação daquelas, o valor máximo da percentagem de fibras (grau de concentração) está associado aos compósitos constituídos por fibras contínuas [2.17].

As fibras contínuas mais correntes são as de vidro (G), as de aramida (A) e as de carbono (C), com os respectivos compósitos denominados internacionalmente por GFRP (polímeros reforçados com fibras de vidro), AFRP (polímeros reforçados com fibras de aramida) e CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono), respectivamente. Na tabela 2.1 apresentam-se as principais propriedades destes três tipos de fibras.

Tabela 2.1. Principais propriedades das fibras mais utilizadas em engenharia civil para reforçar FRP's
(adaptado de [2.1], [2.18], [2.19]).

Propriedades	Designação	Unidades	Vidro	Carbono	Aramida
Mecânicas	Resistência à tracção	MPa	1800 - 4800	2000 – 6000	2900 - 4100
	Módulo de elasticidade	GPa	69 - 90	160 – 700	60 – 190
	Extensão na rotura	%	3.0 – 5.5	0.2 – 2.3	2.0 – 5.0
	Coeficiente de Poisson	-	0.4	0.3 – 0.4	0.2
Físicas	Massa volúmica	g/cm ³	2.5	1.7 – 2.1	1.5
	Diâmetro das fibras	µm	3 – 120	4 – 10	12
	Estruturas das fibras	-	Isotrópica	Anisotrópica	Anisotrópica
Térmicas	Coef. dilatação térmica	10 ⁻⁶ /K	5.0 – 6.0	Axial: -1.3 a -0.1 Radial: 18.0	-2.0
	Condutibilidade	W/(m°C)	1.3	8.5 – 70.0	-
Eléctricas	Resistividade	Ω	4.0(x10 ¹⁴)	9.5 – 18.0(x10 ⁻⁶)	-

Dos três tipos de fibras apresentadas na tabela 2.1, as de vidro são as que apresentam um preço mais reduzido, fazendo com que sejam bastante utilizadas na indústria da construção. Apresentam uma resistividade bastante elevada, conferindo-lhes boas propriedades isolantes. Existem vários subtipos de fibras de vidro (com as designações E, S, AR, C), que, embora apresentem todos o mesmo módulo de elasticidade, diferem nos valores da resistência mecânica e da resistência à corrosão. De uma forma geral, apresentam os inconvenientes de serem susceptíveis à rotura por fadiga, exibirem pouca resistência à humidade e a ambientes alcalinos, além de o módulo de elasticidade ser relativamente reduzido [2.20].

¹⁾ De acordo com a "American Society for Testing and Materials" (ASTM) [2.16] entendem-se por fibras os materiais alongados com dimensões na razão mínima de 10/1 (comprimento/espessura), com uma área mínima da secção transversal de 0.05 mm² e uma espessura máxima de 0.25 mm.

As fibras de aramida são mais resistentes do que as de vidro e podem apresentar um módulo de elasticidade bastante superior. No entanto, a sua resistência a esforços de compressão é reduzida, são susceptíveis à rotura por fadiga e à degradação pela acção dos raios ultravioleta [2.20]. Este tipo de fibras, através de operações típicas de tecelagem, permite obter reforços na forma de filamentos contínuos ou na forma plana (mantas e tecidos de reforço), estes últimos vulgarmente conhecidos pela denominação comercial de "Kevlar". São aplicadas, sobretudo, em protecções balísticas, cordas e cabos, nas indústrias aeroespacial, marítima e automóvel [2.21]. No ramo da construção destacam-se as aplicações em protecções de pilares para acções de explosão ou impacto [2.22].

As fibras de carbono, apesar do seu custo considerável, apresentam como principais vantagens os elevados valores de tensão última e do módulo de elasticidade, associados a um reduzido peso próprio. Contudo, em virtude do seu comportamento anisotrópico, a resistência na direcção radial é reduzida. À temperatura ambiente as fibras de carbono não são afectadas pela humidade e acção de vários solventes, ácidos e bases. Tal como se pode observar na tabela 2.1, este tipo de fibras apresenta uma diversidade de características físicas e mecânicas que lhes permite formar compósitos que apresentam grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia.

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico de precursores orgânicos ricos em carbono, já existentes na forma de fibras. O precursor mais comum é o poliacrilonitrilo, pois proporciona fibras com melhores características, designadas de *PAN*. É ainda usual a utilização de fibras *pitch*, as quais provêm do petróleo destilado, apresentando maior rigidez relativamente a outras fibras comercializadas. As fibras de carbono possuem coloração preta, têm bom comportamento à fluência e fadiga, no entanto, em relação às fibras de vidro e aramida, exibem pior comportamento ao impacto. De acordo com a sua característica mecânica determinante, as fibras de carbono classificam-se de resistência elevada (*HS – high strength*), resistência ultra elevada (*UHS – ultra high strength*), rigidez elevada (*HM – high modulus*), rigidez ultra elevada (*UHM – ultra high modulus*) e rigidez intermédia (*IM – intermediate modulus*). Em relação à aplicação no reforço estrutural dos diferentes tipos de fibras de carbono, as fibras de elevada resistência (*HS*) são as mais utilizadas [2.23]. Na figura 2.4 apresentam-se os diagramas tensão-deformação representativos do comportamento uniaxial dos seguintes materiais: aço convencional tipo A500, cordões de armadura de pré-esforço, fibras de carbono HM e HS, fibras de vidro e fibras de aramida.

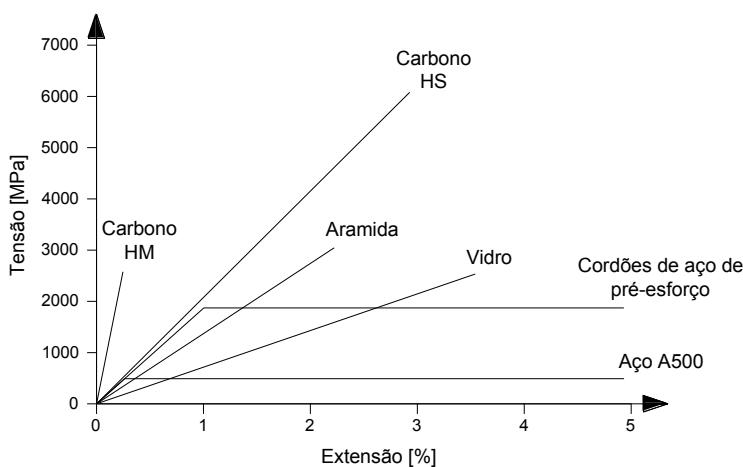


Figura 2.4. Diagrama tensão-extensão de diferentes tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (adaptado de [2.23]).

Na figura 2.4 destaca-se o comportamento linear até à rotura das fibras de carbono, aramida e vidro. Apesar de tal constituir uma desvantagem face ao comportamento dúctil do aço, verifica-se que as tensões de rotura são consideravelmente superiores às atingidas no aço de pré-esforço. Dos materiais fibrosos apresentados, as fibras de vidro são as que apresentam a extensão na rotura mais

elevada, ainda que menor do que a atingida no aço. Relativamente ao módulo de elasticidade, tal como referido anteriormente, verifica-se que este é menor nas fibras de vidro, maior nas de carbono e intermédio nas fibras de aramida. Neste aspecto, as fibras de carbono apresentam uma clara vantagem, dado que é necessária uma menor deformação da estrutura em que estão inseridas para que seja mobilizada a sua tensão resistente. Esta é uma das principais razões que justifica a maior utilização deste tipo de fibras no reforço de estruturas de betão armado.

As fibras de reforço estão disponíveis na forma de conjuntos de filamentos contínuos quase paralelos não torcidos (*rovings*) ou torcidos (*yarn*), ou na forma de fibras curtas (*chopped*), com 3 a 50 mm de comprimento.

O comprimento das fibras tem um efeito importante nas suas propriedades mecânicas. Tal como referido anteriormente, as fibras contínuas (figura 2.5 a) permitem obter valores máximos da resistência e da rigidez. Os compósitos constituídos por fibras curtas distribuídas aleatoriamente têm propriedades quase isotrópicas e apresentam como desvantagem uma menor redução da fluênci da matriz, que apresenta geralmente um comportamento mais visco-elástico [2.24].

Para se obterem reforços com uma forma plana (*mantas de reforço*), as fibras são trabalhadas em produtos tecidos, sendo dispostas em várias direcções. Existe uma grande diversidade de produtos disponíveis, com fibras curtas ou contínuas dispostas aleatoriamente (figura 2.5 b) (*chopped strand mat* ou *continuous strand mat*, respectivamente), fibras contínuas direcionadas (figura 2.5 c), que podem ou não ser entrelaçadas (*woven fabrics* ou *non-woven fabrics*, respectivamente).

Estes produtos podem ainda ser combinados, resultando mantas de reforço contendo fibras contínuas direcionadas e fibras curtas ou contínuas dispostas aleatoriamente.

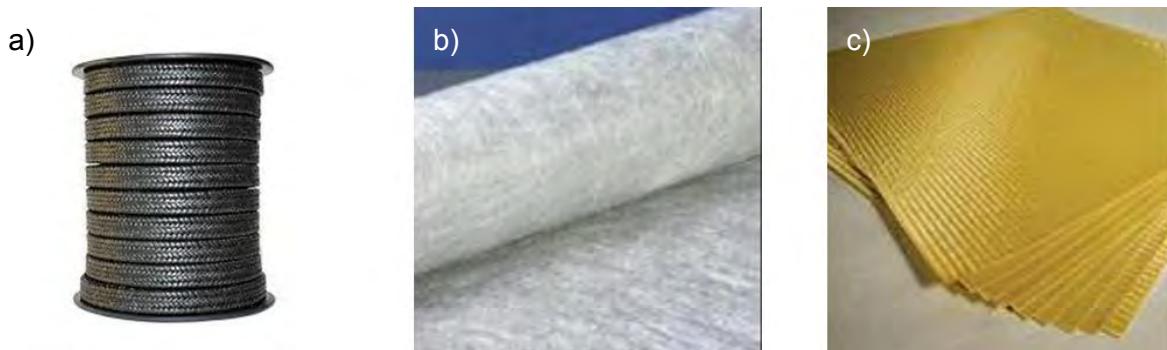


Figura 2.5. a) bobina com filamentos contínuos entrelaçados de fibras de carbono [2.18]; b) manta de filamentos em fibras de vidro contínuas dispostas aleatoriamente [2.25]; mantas de fibras de aramida contínuas direcionadas [2.18].

A maior parte das fibras recebe um tratamento químico superficial com produtos como o amido, o óleo ou a cera (*sizings*), que funcionam como lubrificantes e agentes anti-estáticos, protegendo as fibras dos danos provocados durante o processo de fabrico. São também utilizados produtos aglutinadores resinosos (*binders*), que contribuem para que as fibras se mantenham aglomeradas em mechas. Para além disso, estes tratamentos superficiais promovem a adesão entre as fibras e a matriz do compósito e, no caso das fibras de vidro, fornecem também uma protecção à degradação devido aos agentes ambientais [2.24].

2.3.1.2. Matriz polimérica

Apesar de as fibras serem as principais responsáveis pela resposta do compósito às solicitações mecânicas, a matriz polimérica também desempenha funções importantes, nomeadamente as seguintes [2.26 – 2.28]:

- protege as fibras das agressões exteriores (físicas e químicas);
- envolve as fibras e garante uma adequada transferência e distribuição de tensões entre estas;
- protege a superfície das fibras do desgaste;
- oferece resistência à encurvadura das fibras, quando estas estão sujeitas a compressão;
- impede deslocamentos horizontais e transversais das fibras por propagação de microfissuração, ou seja, aumentar a tenacidade do material;
- assegura um afastamento entre fibras, assim como meios para reduzir a concentração de tensões.

A matriz polimérica é constituída essencialmente por resina, à qual podem ser adicionados os materiais de enchimento e os aditivos referenciados nos pontos 2.3.1.3 e 2.3.1.4, respectivamente. Relativamente à resina, podem definir-se dois grandes grupos, as termoplásticas e as termoendurecíveis. A decisão de utilizar um dos tipos de resina na composição do material compósito é condicionada pelas propriedades que se pretendem obter, pelo custo de produção e pelo modo de cura a adoptar.

As resinas termoplásticas, embora revelem uma menor resistência ao calor (a temperatura de transição vítreia, T_g , é mais reduzida, devido ao menor grau de cristalinidade), podem ser aquecidas e moldadas sucessivamente sem sofrer quaisquer alterações químicas, pelo que mantêm a sua forma original após arrefecimento. Assim, com uma estrutura naturalmente reversível, são recicláveis, reprocessáveis e mais facilmente armazenáveis (dispensam refrigeração); contudo, devido à elevada viscosidade, são difíceis de fabricar e não apresentam pior adesão às fibras [2.1, 2.23]. Os exemplos mais comuns de resinas termoplásticas são o polietileno, o polipropileno, o polibutileno e a poliamida [2.23].

As resinas termoendurecíveis resultam de um processo de cura (tratamento térmico ou químico) que, desencadeando reacções de polimerização, conduz à formação de uma rede molecular (rígida) muito resistente ao calor. Não obstante, ultrapassando a temperatura de transição vítreia, ocorrem alterações significativas e irreversíveis na sua estrutura química [2.1, 2.29, 2.30]. Assim, são não recicláveis (infusíveis e insolúveis) e não reprocessáveis, revelando contudo uma maior facilidade de manuseamento e de impregnação das fibras [2.29, 2.30]. As resinas termoendurecíveis mais vulgarmente utilizadas em FRP's são as de poliéster (insaturado), epóxidas, de viniléster e fenólicas [2.1, 2.30].

As resinas termoendurecíveis são largamente as mais utilizadas, entrando na constituição de praticamente todos os produtos compósitos comercializados. Apresentam-se na tabela 2.2 as principais propriedades das resinas de poliéster, viniléster, epóxidas e fenólicas.

Tabela 2.2. Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (adaptado de [2.1], [2.20], [2.31]).

Propriedade	Unid.	Poliéster Não-saturado	Viniléster	Epóxida	Fenólicas
Resistência à tracção	MPa	20 - 100	68 - 90	55 - 130	30 - 50
Módulo de elasticidade	GPa	2.0 - 4.1	3.5 - 5.2	2.0 - 4.1	3.6
Extensão na rotura	%	1.0 - 6.0	3.0 - 5.2	1.0 - 9.0	1.8 - 2.5
Massa vomúmica	g/cm ³	1.20 - 1.30	1.12 - 1.16	1.20 - 1.30	1.00 - 1.25
Temperatura de transição vítreia	°C	55 - 120	102 - 280	50 - 270	260

As resinas de poliéster apresentam um bom equilíbrio entre as suas propriedades (mecânicas, químicas e eléctricas), estabilidade dimensional, facilidade de processamento (viscosidade reduzida, associada a um razoável período de utilização), versatilidade (permitem alterações na composição da matriz durante as reacções de polimerização) e baixo custo. A principal desvantagem é a sua elevada retracção volumétrica durante o processamento, o que pode provocar tensões residuais internas [2.3].

As resinas époxidas são normalmente associadas às fibras de carbono em aplicações com elevados requisitos de exigência (resistência, rigidez, temperaturas mais elevadas, durabilidade). Apesar de apresentarem um processamento mais difícil (devido à sua elevada viscosidade) e uma cura mais demorada, sofrem uma retracção mais reduzida do que as resinas de poliéster (1.2 a 4.0 % contra 8.0 %, respectivamente), o que justifica as suas excelentes propriedades adesivas [2.3, 2.24].

As resinas de viniléster foram desenvolvidas para combinar as melhores propriedades das resinas epóxidas com o fácil processamento do poliéster, apresentando igualmente um preço intermédio. Têm como principal desvantagem a elevada retracção volumétrica durante o processo de cura [2.3].

As resinas fenólicas, por comparação com as resinas anteriores, são menos inflamáveis e produzem menos fumo numa situação de incêndio. Para além disso, apresentam uma boa estabilidade dimensional e mantêm boas propriedades adesivas para temperaturas elevadas [2.24].

Geralmente, os materiais compósitos apresentam boa resistência à fadiga, quando comparados com a maioria dos metais. Mas, uma vez que a rotura por fadiga resulta da acumulação de pequenos danos, o comportamento de qualquer compósito depende da dureza da resina e da quantidade de imperfeições apresentadas. As resinas epoxídicas apresentam bom comportamento à fadiga, quando comparadas com as de poliéster e de viniléster [2.32].

2.3.1.3. Material de enchimento

Os materiais de enchimento, habitualmente designados na literatura internacional por *fillers*, são produtos quimicamente inertes que visam não só a redução dos custos de um compósito, como também a melhoria de algumas propriedades físicas e mecânicas. Estes produtos podem atingir 20% (em peso) da proporção global da matriz e, inevitavelmente, influenciar as propriedades desta, consoante o objectivo final do compósito [2.32].

De um modo geral, os *fillers* permitem obter uma melhoria do comportamento em situação de incêndio (pela diminuição do conteúdo orgânico). Por outro lado, contribuem para a diminuição da retracção da matriz, melhorando a sua estabilidade dimensional, e previnem o desenvolvimento de fissuras em zonas de descontinuidade ou em zonas com um teor excessivo em resina. Este último efeito contribui para o aumento da resistência a agentes de degradação ambiental. Podem também ser utilizados para melhorar outras propriedades, como a dureza, a resistência à fadiga e à fluência ou a resistência química [2.33].

Entre os compostos mais utilizados como *filler* incluem-se o carbonato de cálcio, o caulino, a alumina e o sulfato de cálcio. Os dois últimos compostos, em particular, são utilizados para melhorar o comportamento do compósito em situação de incêndio, reduzindo a inflamabilidade e a produção de fumo [2.1].

2.3.1.4. Aditivos

A generalidade dos materiais compósitos, particularmente os reforçados com fibras, recorre ao uso de diversos aditivos, que modificam as propriedades da matriz, aumentam a sua resistência e facilitam o fabrico. Embora em pequenas quantidades, são suficientes para promoverem melhoramentos ao nível de condições de processamento ou ao nível de propriedades específicas da matriz, destacando-se as seguintes [2.1]:

- diminuição da retracção;
- diminuição da inflamabilidade e da produção de fumos tóxicos em situação de incêndio;
- diminuição do teor de vazios;
- aumento da condutibilidade eléctrica (através da adição de partículas metálicas) e da interferência electromagnética (adição de materiais condutores);
- aumento da dureza (adição de borracha ou outros elastómeros);
- atraso ou inibição da oxidação dos polímeros (adição de antioxidantes);
- redução da tendência para a atracção de cargas eléctricas, que podem provocar choques eléctricos, incêndios ou atrair poeiras (adição de agentes anti-estáticos);
- diminuição da massa volúmica (aditivos precursores de espumas);
- prevenção da perda de brilho, descoloração, fendilhação e desintegração devido à radiação ultra-violeta (adição de estabilizadores ultra-violeta);
- alteração da cor (adição de corantes).

Refira-se a existência de substâncias aditivas líquidas, denominadas por plastificantes, que reduzem a temperatura de transição vítreia dos polímeros, sendo úteis para incrementar a flexibilidade e ductilidade das matrizes poliméricas e, embora diminuam a rigidez e dureza do compósito, aumentam a respectiva tenacidade [2.29].

2.3.2. Adesão fibra-matriz

As propriedades mecânicas da ligação fibra-matriz dependem essencialmente da adesão e da compatibilidade mecânica entre as fibras e a matriz e, também, do ângulo entre as fibras de reforço e a direcção da solicitação [2.1].

Para garantir uma boa interacção mecânica entre as fibras e a matriz, as respectivas propriedades mecânicas devem ser adaptadas. Por exemplo, para evitar o desenvolvimento de microfissuras na matriz, antes de ser atingida a capacidade de deformação máxima das fibras, a extensão na rotura da matriz deve ser superior à das fibras. Por outro lado, em compressão, a matriz deve ter uma rigidez mínima, para evitar a encurvadura das fibras [2.20].

A rigidez e a resistência da adesão fibra-matriz dependem também, em grande medida, do ângulo entre as fibras e a direcção da solicitação, verificando-se valores máximos daquelas grandezas quando as direcções das fibras e da solicitação são coincidentes [2.20].

2.4. Características gerais dos adesivos de colagem

O adesivo é o material responsável pela colagem do FRP na superfície do betão e pela transferência de tensões, possibilitando a acção conjunta dos dois materiais. A transferência de tensão ocorre nos planos das interfaces betão-adesivo-compósito, onde se verificam tensões predominantemente de corte, embora tensões normais a essa interface também possam ocorrer. Os adesivos estruturais mais utilizados são as resinas epóxidas. No entanto, para as aplicações em engenharia civil não existe um único tipo de adesivo que satisfaça as exigências de todos os casos de reforço. Por esta razão, existe no mercado uma grande variedade de formulações de resina epóxida, bem como a possibilidade de junção de adições, tais como *fillers*/cargas, solventes, flexibilizantes e pigmentos.

No caso de compósitos pré-fabricados (tipicamente laminados), o agente adesivo é um material distinto da resina utilizada na matriz do FRP. Normalmente, são utilizados sistemas de resinas de dois componentes: uma resina epóxida com material de enchimento do tipo mineral (por exemplo quartzo) e um endurecedor [2.15].

Nos sistemas de FRP curados “in situ”, o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras (tais como as descritas no ponto 2.3.1.2). Neste caso, a literatura internacional atribui o termo “*saturating resin*” para distinguir-lo da designação corrente de adesivo. Este, além de constituir a matriz do FRP, promovendo a transferência de esforços entre as fibras, é responsável pela transferência de tensões para a superfície do elemento a reforçar. Nestes sistemas, as resinas de saturação do tipo epóxido com dois componentes (resina e endurecedor) são as mais utilizadas [2.34].

As principais características que definem um adesivo epóxido não endurecido são a sua viscosidade, o tempo de utilização, o tempo de cura, a toxicidade e a capacidade de endurecimento em contacto com a humidade ou água [2.35]. Neste contexto, é importante apresentar as seguintes definições:

- **tempo de utilização (pot life)**: intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é trabalhável sem dificuldade. Os valores podem variar entre uns minutos a várias horas. O tempo de utilização diminui com o aumento da temperatura e quantidade do material a preparar, uma vez que há libertação de calor durante a cura. A presença de cargas aumenta o tempo de utilização, pois estas absorvem parte do calor libertado na reacção, diminuindo a temperatura atingida pela resina [2.35];
- **tempo de contacto (open time)**: intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a resina é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta endurece, deixando de ser possível efectuar a colagem. A junção das peças deve ser realizada neste intervalo de tempo para que a colagem apresente as características desejadas. O tempo de contacto é influenciado pela temperatura ambiente e pela temperatura do suporte [2.35].

Para se obter um adesivo de boa qualidade, a mistura dos seus componentes, resina epóxida e endurecedor, deve ser adequada, de modo a promover um maior número de ligações moleculares entre os elementos constituintes. A densidade destas ligações e, consequentemente, o grau de endurecimento do adesivo dependem da estrutura química da resina, do agente de endurecimento e das condições de cura, tais como o tempo, a temperatura e a humidade. Estas reacções são lentas a baixas temperaturas, obrigando a tratamentos apropriados abaixo de 5°C, e melhoradas em

ambientes quentes. O aumento do número de ligações no adesivo traduz-se num incremento do módulo de elasticidade, da temperatura de transição vítreia, da estabilidade térmica e da resistência química [2.36].

Tal como referido anteriormente, os adesivos epóxidos são os mais utilizados em sistemas de FRP no reforço de estruturas de betão, apresentando as seguintes vantagens face a outros tipos de polímeros [2.37]:

- boas propriedades de aderência a uma grande variedade de substratos;
- elevada resistência coesiva;
- podem ser endurecidos pela inclusão de borracha;
- menor retracção, quando comparado com resinas de poliéster, acrílicas e vinílicas, permitindo a ligação de grandes áreas apenas com pressão de contacto entre o compósito e o elemento a reforçar;
- menor fluênciça e conservação da resistência sob cargas permanentes;
- boa adaptação a superfícies irregulares;
- podem ser consideradas tixotrópicas para a aplicação em superfícies verticais.

Na tabela 2.3 apresentam-se algumas das propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente dos adesivos epóxidos.

Tabela 2.3. Propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente dos adesivos epóxidos à temperatura ambiente (adaptado de [2.38]).

Propriedade	Unid.	Intervalo de valores
Resistência à tracção	MPa	9 - 55
Resistência à compressão	MPa	55 - 120
Resistência ao corte	MPa	10 - 30
Tensão de aderência ao betão	MPa	2 - 8
Módulo de elasticidade	GPa	0.5 – 20
Módulo de distorção	GPa	0.2 - 8
Coeficiente de Poisson	-	0.3
Extensão na rotura	%	0.5 – 5.0
Massa volúmica	g/cm ³	1.1 – 1.7
Temperatura de transição vítreia	°C	40 - 80

2.5. Características gerais dos compósitos de CFRP

As inúmeras vantagens que as fibras de carbono apresentam, em relação às de aramida e às de vidro, justificam que sejam as mais utilizadas na concretização de reforços estruturais através da colagem de materiais compósitos. Comparativamente aos outros compósitos, os CFRP destacam-se por apresentarem maiores resistências à tracção e à compressão, valores do módulo de elasticidade longitudinal mais elevados, bom comportamento à fadiga e boa resistência química [2.39]. Na figura 2.6 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos compósitos de FRP mais utilizados na engenharia civil, assim como os dos aços macio e de pré-esforço. A observação dos respectivos diagramas revela um comportamento linear até à rotura de todos os compósitos de FRP e que o CFRP é, de todos, o que apresenta maior tensão de rotura e um módulo de elasticidade mais próximo do do aço.

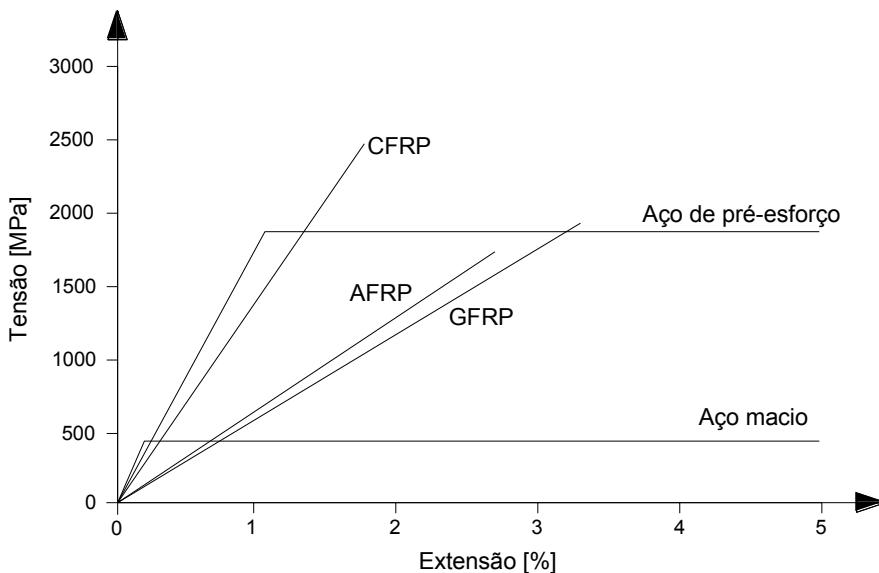


Figura 2.6. Diagramas tensão-extensão de vários compósitos de FRP e dos aços macio e de pré-esforço [2.40].

Nos pontos seguintes descrevem-se as principais formas dos compósitos de CFRP utilizados no reforço de elementos de betão, bem como os processos de fabrico e as principais propriedades.

2.5.1. Formas dos compósitos de CFRP, processos de fabrico e respectivas propriedades

Os materiais compósitos de CFRP utilizados no reforço de estruturas existentes surgem nas seguintes formas: (i) laminados; (ii) mantas; (iii) tecidos; (iv) fios; (v) varões; e (vi) cordões. Nos pontos seguintes estão presentes as principais características de cada um deles, bem como o respectivo processo de fabrico e propriedades.

2.5.1.1. Laminados

Os laminados são a forma mais comum utilizada nas aplicações de reforço estrutural, tendo a denominação geral de “*laminate*”, “*plate*” ou “*strip*”. Resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termoendurecível, consolidadas por um processo de pultrusão com controlo da espessura e largura do compósito. A orientação unidireccional das fibras confere aos laminados a maximização da resistência e da rigidez na direcção longitudinal. Para as aplicações correntes em engenharia civil, a espessura do laminado pode variar entre 1 mm e 2.4 mm e o volume de fibras é da ordem de 65% a 75% do volume do laminado, sendo as características mecânicas baseadas na área bruta da secção transversal da lâmina. O agente adesivo para colagem dos laminados ao betão é, em geral, um material distinto da resina de saturação, tal como referido no ponto 2.4.

O processo de fabrico dos laminados (pultrusão) apresenta um custo relativamente reduzido, permitindo converter directamente as fibras de reforço e as resinas num produto acabado. De entre os vários processos de fabrico de materiais compósitos desenvolvidos durante as últimas quatro décadas, a pultrusão é o que oferece a relação produtividade/custo mais elevada [2.41]. De um modo

geral, pode-se considerar que o processo está dividido em duas fases. Numa primeira fase, as fibras de reforço são impregnadas num molde com a forma pretendida para a secção transversal, enquanto a matriz se encontra no estado líquido. Na segunda fase, dá-se a solidificação da matriz no molde, resultando uma peça com a forma e as dimensões desejadas.

Apresenta-se na figura 2.7 um esquema do processo de pultrusão tradicional, onde é possível distinguir seis elementos-chave [2.1]:

- Sistema de manuseamento das fibras;
- Sistema de guias para pré-formar e posicionar os reforços;
- Estação de impregnação de resina;
- Molde aquecido;
- Sistema de tracção;
- Sistema de corte.

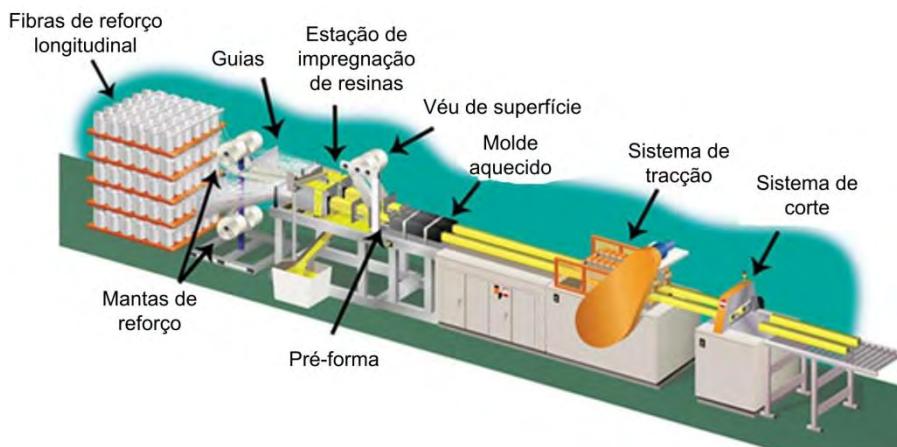


Figura 2.7. Esquema da linha de fabrico de laminados de CFRP por pultrusão (as mantas de reforço e o véu de superfície são prescindíveis no fabrico de laminados de CFRP) [2.1].

Após o processo de pultrusão, os elementos constituintes dos laminados apresentam o aspecto de “chapa” (figura 2.8 a) com a disposição indicada na figura 2.8 b). Usualmente, são produzidos laminados com algumas dezenas de metros, que são posteriormente armazenados em rolos (figura 2.8 c).

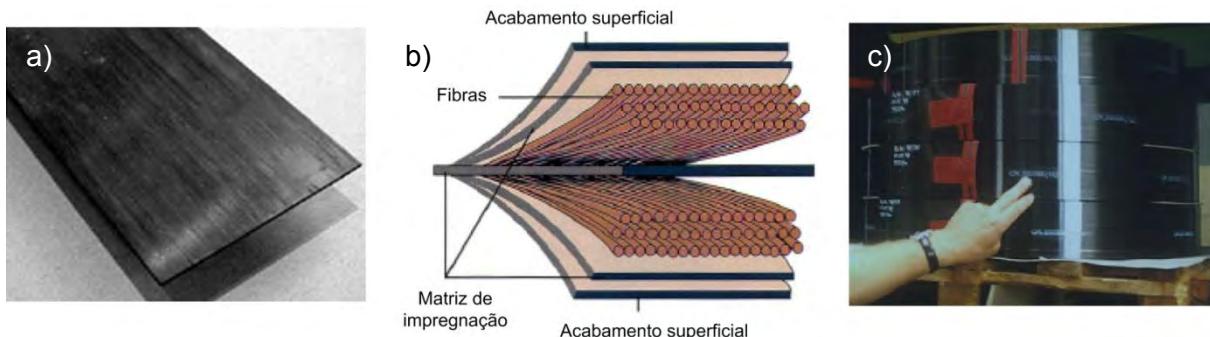


Figura 2.8. a) aspecto final dos laminados; b) disposição dos materiais constituintes dos laminados [2.42]; c) laminados armazenados em rolos.

Na tabela 2.4 apresentam-se os intervalos de valores de algumas propriedades físicas e mecânicas dos laminados comercializados em Portugal pelas principais empresas Sika e S&P.

Tabela 2.4 Principais características físicas e mecânicas dos laminados de CFRP comercializados em Portugal (valores médios, segundo a direcção das fibras, à temperatura ambiente) [2.43, 2.44].

Propriedade	Unidade	Intervalo de valores
Módulo de elasticidade	GPa	165 - 300
Resistência à tracção	MPa	1500 – 3200
Extensão na rotura à tracção	%	0.45 – 1.70
Percentagem volémica de fibras	%	67 - 70
Massa volémica	kg/m ³	1600
Temperatura de transição vítreia mínima	°C	50
Largura do laminado	mm	50 - 150
Espessura do laminado	mm	1.2 – 1.4

2.5.1.2. Mantas e tecidos

As mantas e tecidos fazem parte dos sistemas curados ou polimerizados “in situ”. São fornecidos em estado seco ou pré-impregnado, e necessitam de uma resina de saturação que é responsável pela transferência de esforços entre as fibras e entre o compósito e o substrato a reforçar.

De uma forma geral, as mantas de CFRP são constituídas por fibras contínuas unidireccionais, dispostas sobre uma rede ou plástico de protecção. A face das mantas em contacto com o plástico possui uma rede de suporte à base de fibras termoplásticas que lhes conferem alguma resistência até ao momento da aplicação. No seu processo de fabrico, feixes de fibras são agrupados, alinhados e esticados, num processo semelhante ao dos laminados. Numa fase seguinte, os feixes são introduzidos numa prensa, em simultâneo com a rede de suporte, com uma tela impregnada com quantidades mínimas de resina epóxida (caso seja um sistema pré-impregnado) e com um plástico de protecção, que apenas é retirado no momento da aplicação. O compósito, propriamente dito, apenas se forma com a adição da resina às mantas durante o processo de aplicação.

Os tecidos de CFRP distinguem-se das mantas por serem constituídos por fibras contínuas bidireccionais, podendo ou não apresentar resina de pré-impregnação. No seu processo de fabrico, as fibras, depois de alinhadas, são entrelaçadas num tear, semelhante aos vulgarmente utilizados em costura.

Estes dois materiais apresentam espessuras que variam entre 0.1 mm a 0.5 mm, sendo comercializados em rolos com larguras entre 25 a 50 cm. Podem ser aplicadas sucessivas camadas, ao contrário do que sucede com os laminados. O facto de não serem fornecidos com a rigidez final confere-lhes uma grande trabalhabilidade, sendo mais adequadas para trabalhos de reforços minuciosos e/ou com formas irregulares. No entanto, são mais sensíveis às irregularidades da superfície do substrato, existindo maior dificuldade em garantir um controlo de qualidade e uniformidade adequados.

Na figura 2.9 a) e b) ilustram-se mantas de fibras de carbono unidireccionais pré-impregnadas e tecidos do mesmo material, respectivamente.

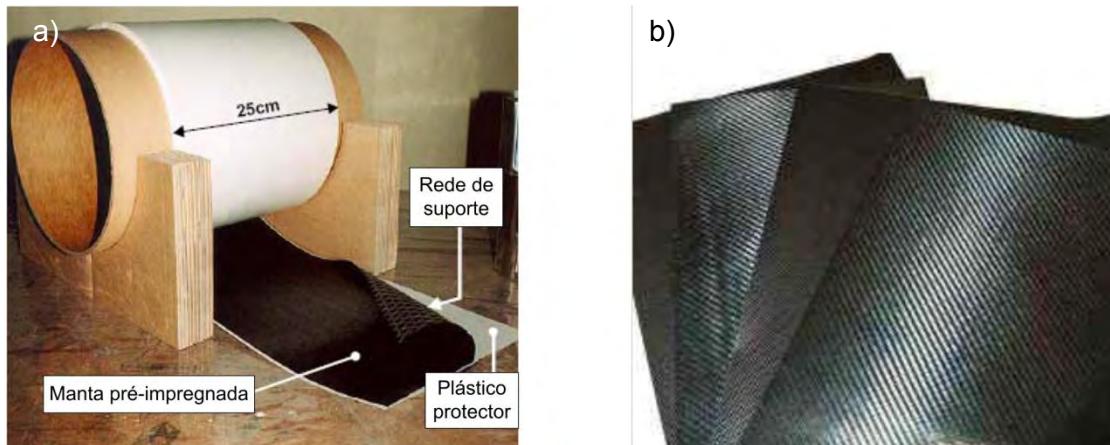


Figura 2.9. a) manta pré-impregnada com fibras de carbono unidireccionais [2.31]; b) tecidos de fibras de carbono [2.31].

A título de exemplo, na tabela 2.5 apresentam-se as propriedades de um tipo de mantas de fibras de carbono unidireccionais (não pré-impregnadas), da marca *Sika* e modelo *SikaWrap 230 C*, quando estas estão no seu estado bruto (secas, sem resina de impregnação) e após a aplicação da resina de impregnação. Naturalmente, as últimas propriedades dependem do número de camadas de manta e da quantidade de resina aplicada, pelo que os valores apresentados são relativos a uma camada com 1 mm de espessura de resina. Refira-se que a propriedade denominada “carga máxima”, corresponde ao valor da força de tracção que provoca a rotura do sistema de reforço (após impregnação) com 1 mm de espessura e 1 m de largura.

Tabela 2.5. Propriedades físicas e mecânicas (à temperatura ambiente) de mantas de fibras de carbono unidireccionais *SikaWrap 230 C*, em bruto e após a impregnação com resina [2.44].

	Propriedade	Unidade	Valor
Propriedades das mantas em bruto/seco	Espessura	mm	0.13
	Gramagem	g/m ²	230
	Massa volúmica	Kg/m ³	1760
	Resistência à tracção	MPa	4300
	Módulo de elasticidade	GPa	238
	Deformação na rotura	%	1.8
Propriedades do sistema de reforço após impregnação com resina	Espessura	mm	1.00
	Módulo de elasticidade	GPa	28
	Carga máxima	kN/m (de largura)	350

2.5.1.3. Fios

Os fios de fibras de carbono são a forma menos utilizada para o reforço de estruturas de betão. São constituídos por agrupamentos de filamentos contínuos e longos de fibras que podem ser torcidos entre si. Na figura 2.10 apresentam-se rolos de fios de carbono não torcidos. Estes destinam-se, essencialmente, a serem a utilizados no confinamento de pilares numa técnica de cura “in situ” conhecida por encamisamento automático, abordada no ponto 2.6.2.



Figura 2.10. Rolos de fios de carbono não torcidos [2.31].

2.5.1.4. Varões e cabos

Através do processo de pultrusão é possível obter varões de CFRP com fibras unidireccionais, que podem ser utilizados como armadura interior em peças de betão, constituindo uma alternativa aos varões tradicionais em aço. No entanto, o seu comportamento frágil, a menor aderência ao betão e o elevado custo constituem desvantagens face aos varões em aço. Pelo mesmo processo de fabrico são produzidos cordões de CFRP que quando enrolados constituem cabos. Estes podem ser utilizados para pré-esforçar interiormente peças de betão, no entanto, as aplicações em pré-esforço exterior (de estruturas metálicas ou de betão) são mais correntes, onde a sua elevada durabilidade em ambientes agressivos constitui uma vantagem em relação aos cabos de aço.

2.5.2. Influência da temperatura e humidade

As propriedades físicas e mecânicas das resinas são influenciadas pela temperatura e degradam-se consideravelmente acima da temperatura de transição vítreia, que pode variar entre 50°C e 140°C para os sistemas CFRP disponíveis no mercado. Desta forma, não é aconselhável a aplicação destes sistemas em ambientes cujo valor da temperatura máxima diária seja superior à menor temperatura de transição vítreia dos materiais constituintes (usualmente é o adesivo de colagem que apresenta a menor temperatura de transição vítreia). Neste sentido, o manual *Eurocomp* editado por Clarke [2.45] recomenda a fixação de um valor inferior a T_g reduzido de 10°C a 20°C para o limite superior da amplitude térmica esperada numa aplicação corrente na construção. Apesar da susceptibilidade destes sistemas a temperaturas elevadas, o seu coeficiente de expansão térmica é bastante reduzido.

Todas as formulações poliméricas são susceptíveis a absorver humidade. Consequentemente, em ambientes húmidos verifica-se uma redução do valor da temperatura de transição vítreia e das suas propriedades mecânicas [2.36].

2.5.3. Fluênci a e relaxação

Os materiais compósitos com fibras de carbono têm um elevado desempenho à fluênci a e fadiga. Nos ensaios realizados em CFRP's por Yamaguchi *et al.* [2.46] praticamente não se observou deformação por fluênci a nem perda significativa de tensão por relaxação. Além disso, verificou-se que quanto maior for a temperatura de transição vítreia do compósito, menor é a sua deformação por fluênci a.

2.6. Descrição geral do reforço de estruturas de betão armado com sistemas de CFRP

Os CFRP's podem ser utilizados no reforço de vários tipos de estruturas de betão armado, tais como edifícios, pontes ou túneis, e em diversos elementos dessas estruturas, nomeadamente vigas, pilares, lajes ou paredes. Neste ponto do documento pretende-se ilustrar, de uma forma sucinta, as principais aplicações destes materiais no reforço dos referidos elementos de betão armado, nomeadamente em (i) reforços à flexão; (ii) reforços ao esforço transverso; (iii) reforços com efeito de confinamento; e em (iv) reforços com sistemas pré-esforçados de CFRP.

A aplicação da maioria dos sistemas de reforço de CFRP em estruturas de betão armado pode resumir-se em duas fases distintas, quer se tratem de sistemas pré-fabricados ou curados “in situ”:

- 1^a fase: preparação da superfície do elemento a reforçar;
- 2^a fase: colocação do reforço através da técnica de colagem.

A preparação da superfície do betão tem como objectivo promover a correcta aderência do adesivo de colagem, podendo ser realizada com recurso a martelos de agulhas, jacto de água ou areia. Este processo pode ser complementado, sobretudo nos sistemas curados “in situ”, com a aplicação no suporte de um primário e, eventualmente, de uma película de regularização em resina epóxida.

A colocação do reforço através da técnica de colagem apresenta alguns aspectos particulares, quer se trate de um sistema pré-fabricado ou curado “in situ”. No primeiro caso, é aplicada uma camada de resina epóxida com espessura variável entre 1 mm e 2 mm sobre o CFRP e outra sobre a superfície de betão. Seguidamente, é exercida pressão sobre o reforço contra a superfície de betão até que a resina de colagem adquira propriedades que permitam a sustentação do CFRP. No caso de sistemas curados “in situ”, é aplicada uma camada de resina sobre o elemento a reforçar, na qual a manta (ou o tecido) vai ser embebida. Pelo mesmo processo vão sendo sobrepostas várias camadas de reforço.

Existem sistemas especiais, dos quais fazem parte o encamisamento automático e sistemas pré-esforçados, que apresentam processos de execução específicos, não sendo alvo de análise no presente trabalho.

2.6.1. Reforços à flexão e ao corte

Os reforços para esforços de flexão com compósitos de CFRP em estruturas de betão armado fazem parte das soluções mais utilizadas quando se recorre a este tipo de material. Baseiam-se na aplicação de sistemas de CFRP pré-fabricados (laminados) ou curados “in situ” (mantas), com as fibras paralelas à direcção das tensões principais do elemento a reforçar, funcionando como armaduras exteriores. São comuns as aplicações em vigas (figura 2.11 a), lajes (figura 2.11 b) e pilares (figura 2.11 c).



Figura 2.11. a) reforço à flexão de vigas de um complexo industrial com recurso a laminados de CFRP [2.43]; b) reforço à flexão de uma laje do tabuleiro de um viaduto com recurso a mantas de CFRP [2.43]; c) esquema do reforço de um pilar à flexão com laminados de CFRP [2.47].

Os reforços ao corte com compósito de CFRP são aplicados, sobretudo, em vigas e pilares. Tal como no caso dos reforços à flexão, funcionam como armaduras exteriores, em que as fibras são colocadas paralelas à direcção das tensões principais de tracção. No entanto, estas tensões de tracção apresentam uma inclinação em relação à horizontal de, aproximadamente 30° , o que dificulta a execução do reforço. Por esta razão, é comum a opção de orientar as fibras na direcção vertical, caso se tratem de vigas, ou horizontal, caso se tratem de pilares. Na figura 2.12 a) apresenta-se um esquema de uma viga reforçada à flexão e ao corte com laminados, e na figura 2.12 b) ilustra-se um esquema semelhante, onde o reforço ao corte é constituído por mantas de CFRP. Este tipo de reforço seria mais eficaz caso a totalidade do perímetro da peça fosse envolvida, tal como se apresenta no esquema de reforço ao corte de um pilar presente na figura 2.12 c). No entanto, em grande parte das situações é impossível que o reforço envolva elementos horizontais devido a conflitos com a restante estrutura. Para contornar esta situação, existem no mercado laminados em forma de L e com extremidades rugosas que melhoraram a sua amarração (figura 2.12 a)).

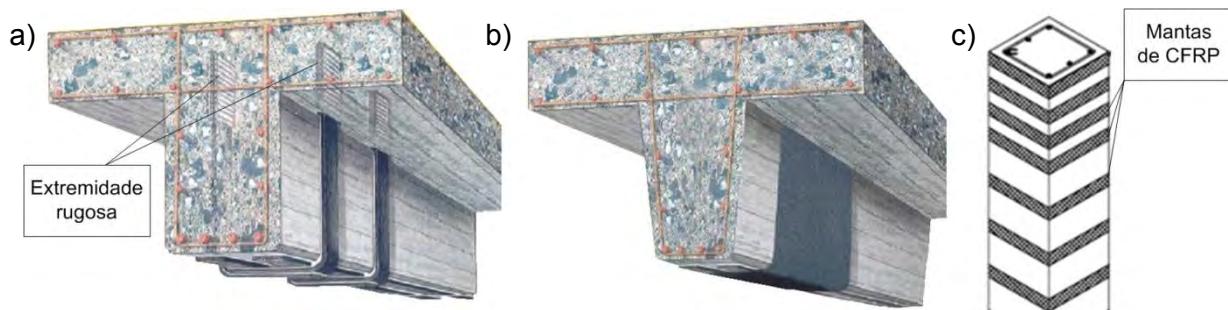


Figura 2.12. a) viga reforçada à flexão e ao corte com laminados de CFRP [2.48]; b) viga reforçada à flexão com laminados e ao corte com manta de CFRP [2.48]; c) pilar reforçado ao corte com faixas de mantas de CFRP [2.47].

2.6.2. Confinamento

Os elementos de betão sujeitos a estados triaxiais de compressão apresentam uma resistência final superior à obtida em compressão simples. Este efeito verifica-se em elementos confinados e está intimamente relacionado com o impedimento da deformação transversal por *efeito de Poisson* do elemento carregado axialmente; as suas capacidades máximas de resistência à compressão e de deformação são significativamente aumentadas. Neste sentido, é relativamente frequente recorrer a materiais compósitos de CFRP para confinar elementos de betão comprimidos, nomeadamente pilares. Tipicamente, utilizam-se mantas com as fibras orientadas na direcção horizontal, as quais são

impregnadas por resina epóxida num processo de cura “in situ” (figura 2.13 a e b). Este sistema é eficaz em pilares de secção circular, pois neste tipo de geometria a deformação transversal por efeito de Poisson resulta, sobretudo, em tracção pura do reforço. Em pilares de secção quadrada ou rectangular, a deformação transversal do betão provoca a flexão do reforço na zona central das faces do pilar, tendo como consequência um menor efeito de confinamento. Ainda assim, é possível encontrar exemplos da utilização de mantas de CFRP para o reforço de pilares de secção quadrada ou rectangular (figura 2.13 b).

Existe um sistema alternativo à aplicação de mantas de CFRP que garante igualmente o efeito de confinamento desejado, denominado por encamisamento automático. Esta técnica consiste num mecanismo automático que gira em torno do perímetro dos pilares e enrola os fios de uma forma contínua ao longo da sua altura, num processo simultâneo com a aplicação da resina. Trata-se de um sistema que permite um bom controlo da qualidade e uma redução do tempo de aplicação dos materiais. No entanto, só é aplicável em pilares de secção circular por empresas específicas que possuam esse mecanismo, tornando-o competitivo face à técnica tradicional apenas em pilares de grande altura (figura 2.13 c).



Figura 2.13. a) encamisamento com mantas de CFRP para reforço axial de um pilar circular [2.43]; b) encamisamento com mantas de CFRP para reforço axial de um pilar rectangular [2.43]; c) mecanismo para encamisamento automático de um pilar circular com fios de CFRP [2.43].

2.6.3. Sistemas pré-esforçados

Nos sistemas de reforço com laminados de CFRP simplesmente colados, o mecanismo de rotura baseia-se, na grande maioria das vezes, no seu descolamento quando se verificam extensões bastante inferiores às que mobilizam a resistência total à tracção dos laminados. O facto de, com a simples colagem, não se tirar partido da elevada capacidade resistente dos CFRP, levou a que nas últimas décadas se desenvolvessem sistemas pré-esforçados. Nestes, os laminados são fixados nas extremidades com chapas de ancoragem, o que, associado à pré-tensão instalada, permite que se mobilizem forças e extensões bastante superiores. Além disso, esta é uma técnica de reforço activa, traduzindo-se em vantagens no comportamento da fendilhação e deformação. Estes sistemas são utilizados, sobretudo, em lajes (figura 2.14 a) ou vigas de edifícios. O comportamento de vigas de betão armado pré-esforçadas com laminados de CFRP e o desenvolvimento de sistemas de ancoragem inovadores foram temas estudados por França [2.49].

Embora bastante esporádicas, são possíveis aplicações de compósitos de CFRP em cabos de pré-esforço para pontes (figura 2.14 b). O seu elevado custo, comparativamente às soluções tradicionais em aço, faz com que ainda não sejam muito utilizados.

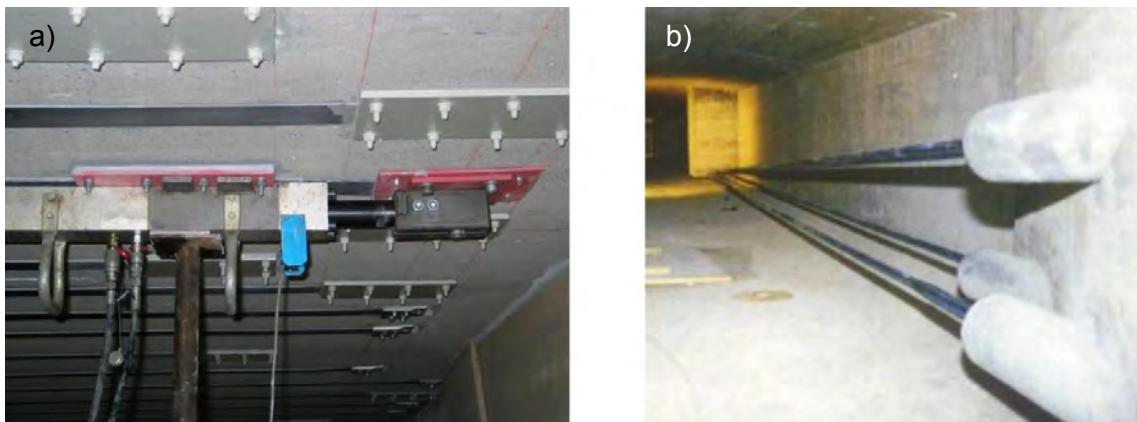


Figura 2.14. a) detalhe do macaco na aplicação de pré-esforço em laminados de CFRP numa laje de um edifício [2.43]; b) cabos de pré-esforço em CFRP no reforço da ponte de Verdasio [2.24].

2.7. Reforço de vigas à flexão com laminados de CFRP

Neste ponto do documento é abordado o reforço de vigas à flexão com laminados de CFRP. Numa primeira fase são apresentados os dois principais sistemas que permitem a materialização do reforço, denominados (i) EBR (*externally bonded reinforcement*), em que o CFRP é colado nas faces exteriores das vigas e (ii) NSM (*near surface mounted*) em que os laminados são inseridos em rasgos no betão de recobrimento. Na segunda fase analisa-se apenas o sistema EBR, descrevendo o comportamento mecânico geral e os modos de rotura de vigas reforçadas com este sistema. Finalmente referem-se as principais recomendações para o respectivo dimensionamento segundo o documento normativo americano ACI 440.2R-08 [2.50]. Em aspectos relativos às verificações da aderência betão-CFRP as recomendações desse documento são complementadas com as presentes no Bulletin 14 da fib [2.19]. Refira-se que a informação contida neste ponto não faz parte do principal objectivo do trabalho, pelo que os assuntos serão abordados de uma forma resumida, focando apenas os aspectos que se consideram essenciais para o correcto dimensionamento do reforço à flexão de vigas de betão armado.

2.7.1. Sistema EBR

O sistema EBR baseia-se na colagem do material de reforço à superfície de betão. Quando se pretende reforçar à flexão vigas de betão armado com laminados de CFRP utilizando esta técnica, a primeira etapa consiste na preparação da superfície do betão na face inferior da viga, de forma a torná-la rugosa e livre de detritos que comprometam uma correcta aderência. Seguidamente, com recurso a um adesivo à base de resina epóxida, procede-se à colagem dos laminados por simples encosto. Esta é uma técnica que envolve pouco meios, não necessita de mão-de-obra muito qualificada e apresenta elevados rendimentos, pelo que, dos dois sistemas aqui apresentados, é a mais utilizada. Na figura 2.11 a) (página 22) está ilustrado o aspecto duma solução deste tipo aplicada em vigas de um complexo industrial.

2.7.2. Sistema NSM

Nos últimos anos, com o objectivo de aumentar a mobilização da capacidade resistente do material CFRP (por intermédio do retardamento de um descolamento prematuro) e impedir a rápida degradação dos reforços colados exteriormente, por se encontrarem expostos a impactos e à acção do ambiente, surgiu uma nova técnica de reforço que consiste na inserção de tiras de laminados de CFRP em rasgos executados no betão de recobrimento. Apesar de ser menos frequente, também é possível inserir barras quadradas ou varões de CFRP. Esta técnica, designada por *near surface mounted* (NSM), embora ainda recente e não muito utilizada, apresenta resultados positivos face à técnica tradicional de colagem, destacando-se as seguintes vantagens [2.51]:

- maior resistência a fenómenos de descolamento/arrancamento do CFRP, dada a existência de dupla área de colagem do laminado e de este se encontrar confinado;
- maior protecção face aos actos de vandalismo;
- redução da quantidade de CFRP empregue;
- redução da superfície de betão a tratar;
- melhoria do comportamento ao fogo.

No entanto, apesar das claras vantagens face ao EBR, a técnica de NSM tem o inconveniente de a profundidade dos rasgos estar limitada à espessura de betão de recobrimento, o que, em certos casos, pode mesmo inviabilizar a utilização deste método. Além disso, a execução dos rasgos no betão constitui uma operação mais complexa do que o simples tratamento da superfície com jacto de areia, água, ou martelos de agulhas.

Na figura 2.15 ilustram-se as várias técnicas de aplicação de sistemas FRP por NSM.

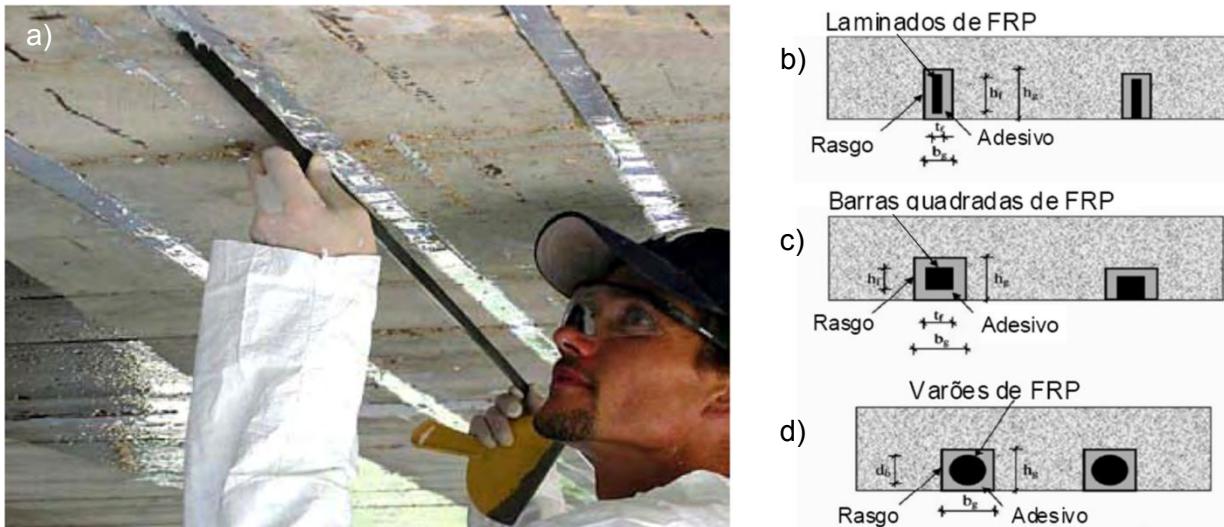


Figura 2.15. Sistema NSM: a) aplicação do laminado em rasgos numa laje; esquema do posicionamento de b) laminados em rasgos; c) barras quadradas; e d) varões em rasgos [2.52].

2.7.3. Comportamento mecânico

O comportamento mecânico de vigas de betão armado reforçadas à flexão com o sistema EBR pode caracterizar-se, de forma simplificada, através da relação multilinear carga-deslocamento esquematizada na figura 2.16. Segundo este gráfico, o comportamento da estrutura pode ser dividido em quatro estados distintos:

- **estado 1:** corresponde ao comportamento elástico da estrutura, que permanece válido até se atingir, numa secção, a resistência à tracção do betão, desenvolvendo-se, então, a fendilhação. Refira-se que em situações reais, geralmente, uma estrutura que necessita de ser reforçada já se encontra fendilhada, pelo que, não exibe o comportamento característico do estado 1;
- **estado 2:** caracteriza-se pelo comportamento elástico das armaduras de aço e pela propagação da fendilhação no betão. As tensões de tracção desenvolvidas na secção distribuem-se, essencialmente, pelas armaduras ordinárias e pelo sistema de FRP;
- **estado 3:** inicia-se com a plastificação das armaduras de aço. Os incrementos de tensão de tracção são absorvidos pelo sistema de FRP até o betão atingir a sua resistência máxima;
- **estado 4:** pode ocorrer o destacamento do FRP antes do esmagamento do betão ou vice-versa (esmagamento do betão seguido de rotura no FRP). Factores tão diversos como, por exemplo, a classe do betão, a percentagem de armaduras ordinárias e a percentagem de reforço aplicada influenciam este comportamento geral.

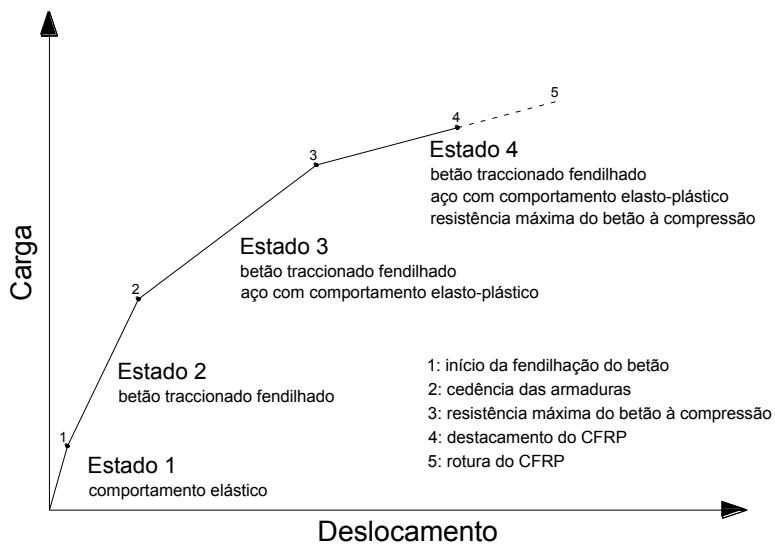


Figura 2.16. Diagrama multilinear carga-deslocamento central de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP (adaptado de [2.53]).

Para ilustrar o efeito da percentagem de reforço apresenta-se na figura 2.17 os diagramas-tipo momento-curvatura de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP para diferentes taxas/percentagens de reforço. Na mesma figura está presente o diagrama de uma viga de betão armado não reforçada.

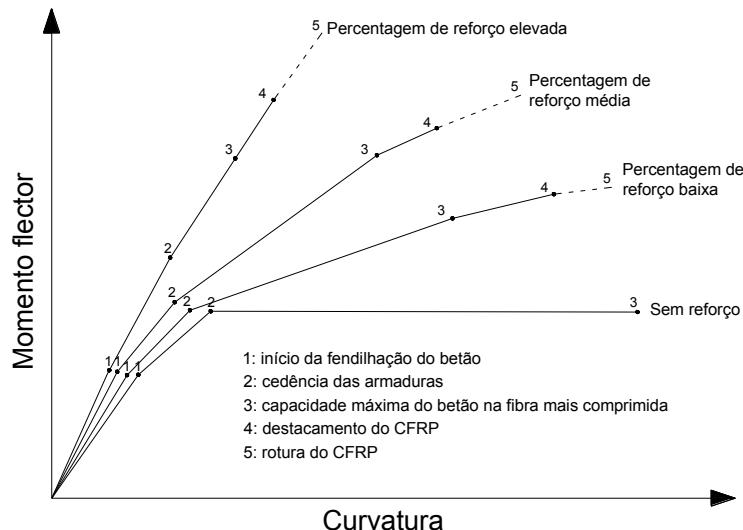


Figura 2.17. Diagramas momento-curvatura a meio vão de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (adaptado de [2.54]).

Na figura anterior é possível observar que o aumento da taxa de reforço de CFRP manifesta-se (i) por uma diminuição da curvatura, à qual está associado um aumento da rigidez de flexão; (ii) por um ligeiro aumento da carga de fendilhação; e (iii) por um acréscimo da capacidade de carga máxima (desprezando a ocorrência de mecanismos de rotura prematuros). Além disso, observa-se que os andamentos dos diagramas divergem a partir do momento fletor que provoca a cedência das armaduras, o que mostra que a principal contribuição do reforço acontece após este fenómeno. Apesar destas melhorias no comportamento das vigas, o aumento da taxa de reforço reduz consideravelmente a ductilidades das peças. Esta constatação torna-se evidente quando se compara o diagrama momento-curvatura da viga não reforçada com o da viga com uma percentagem elevada de reforço.

2.7.4. Modos de rotura

A identificação e análise dos diversos modos de rotura de vigas reforçadas à flexão com laminados de carbono pela técnica EBR têm grande importância para a definição de critérios de dimensionamento e de verificação de segurança.

Recorrendo ao diagrama da figura 2.16, torna-se claro que a capacidade de carga da viga pode variar bastante consoante o modo de rotura obtido, podendo este ocorrer no “estado 2” (sem plastificação das armaduras) ou no “estado 3” ou “estado 4”. O comportamento desejável seria aquele que tiraria o máximo partido da resistência de todos os materiais, sendo traduzido por um modo de rotura com a ocorrência simultânea do esmagamento do betão comprimido e da rotura da secção do laminado após a cedência das armaduras. Porém, na maioria dos casos, este comportamento ideal não é possível, sendo necessária a avaliação dos diversos cenários de rotura prováveis, sintetizados na figura 2.18.

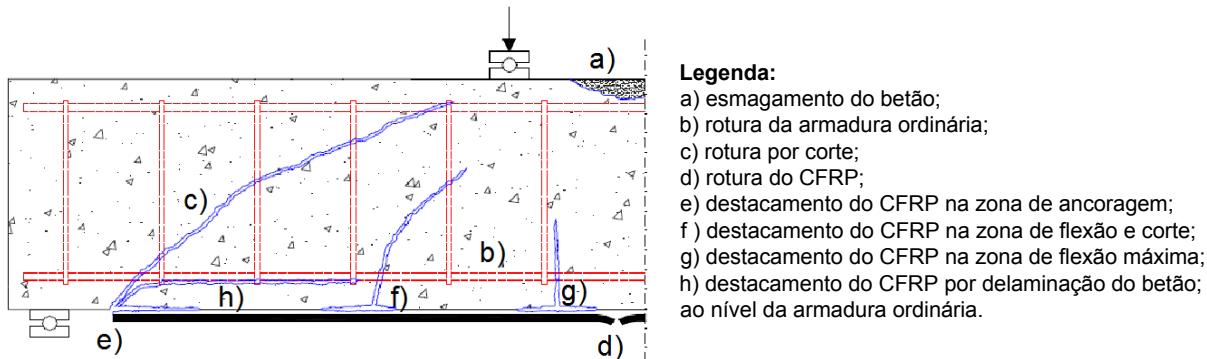


Figura 2.18. Modos de rotura de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP pelo sistema EBR (adaptado de [2.55]).

Os modos de rotura apresentados na figura 2.18 podem agrupar-se em três grupos [2.15]:

- modos a), b) e c): modos de rotura característicos de vigas de betão armado;
- modo d): rotura da secção do laminado;
- modos e), f), g) e h): modos de rotura por destacamento do laminado (*peeling-off* na literatura técnica).

Relativamente ao último grupo, é usual classificar-se os respectivos modos por roturas prematuras. Estas devem ser evitadas pois são do tipo frágil, ou seja, ocorrem de modo brusco e repentino.

As diferentes formas de destacamento do compósito de CFRP ocorrem em regiões com elevada concentração de tensões, normalmente relacionadas com a existência de descontinuidades materiais e com a presença de fendas. Os diferentes tipos de destacamento podem ser identificados em função da secção em que se iniciam [2.56]:

- destacamento do sistema de FRP na zona de amarração sem fendilhação do betão, por rotura do substrato de betão devido a elevadas tensões de corte. Este destacamento pode ocorrer na camada superficial de betão, [modo e) da figura 2.18], ou junto às armaduras por delaminação do betão [modo h) da figura 2.18];
- destacamento do sistema de FRP motivado por fendas de flexão (zona central da viga). As fendas verticais de flexão no betão devido à sua excessiva abertura podem propagar-se horizontalmente pela interface betão-compósito provocando o destacamento do reforço em zonas afastadas da extremidade do laminado [modo g) da figura 2.18];
- destacamento do sistema de FRP causado por movimentos horizontais e verticais nas faces das fendas – zona de fendilhação por flexão e corte, modo f) da figura 2.18;
- destacamento do sistema de FRP originado por irregularidades na superfície de betão, e consequentes forças de desvio, principalmente se tal ocorrer na zona mais tracionada do compósito (figura 2.19).

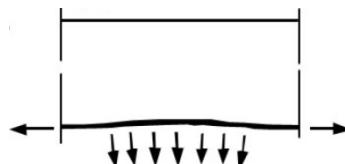


Figura 2.19. Forças de desvio que provocam o destacamento do laminado devido a irregularidades na superfície do betão [2.57].

2.7.5. Indicações gerais para dimensionamento segundo propostas normativas do ACI 440 e Fib (Bulletin 14)

Neste ponto do documento, tal como referido anteriormente, apresentam-se as principais recomendações para o dimensionamento do reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP segundo o documento normativo americano ACI 440.2R-08 [2.50]. Em aspectos relativos às verificações da aderência betão-CFRP as recomendações desse documento serão complementadas com as presentes no Bulletin 14 da fib [2.19].

Refira-se que existem outros documentos normativos que definem critérios de dimensionamento e procedimentos adicionais de verificação de segurança de estruturas reforçadas com CFRP, nomeadamente:

- documentos de homologação alemães do *Deutches Institut für Bautechnik* (DIBt); NR. Z 36.12 – 29 e NR. Z 36.12-54 [2.58, 2.59];
- documentos da *Swiss Society of Engineers and Architects* (SIA): D0128 [2.60];
- relatórios técnicos da *Concrete Society* da Grã-Bretanha: *Technical Report 55* e *Technical Report 57* [2.61, 2.62];
- regulamento canadiano *The Canadian CSA S806 Code* [2.63];
- regulamento egípcio *The Egyptian FRP Code* [2.64];
- documentos da *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE) [2.65, 2.66].

2.7.5.1. Hipóteses de cálculo

O dimensionamento de sistemas de reforço com laminados de CFRP colados exteriormente em vigas de betão armado é baseado nos princípios dos estados limite. Em particular, devem ser respeitados os requisitos de estado limite último, limitação de tensões em serviço e verificação de ductilidade. Nessas verificações são admitidas as seguintes hipóteses [2.50]:

- ligação perfeita entre o betão e o sistema de reforço, isto é, considera-se que não há escorregamento entre o CFRP e o substrato de betão (na realidade não existe esta ligação perfeita, pois verifica-se alguma deformação por corte no adesivo, que causa um escorregamento relativo entre o CFRP e o substrato; no entanto, a grandeza do diferencial de deformação relativa pode desprezar-se em dimensionamento);
- as extensões no reforço, no aço e no betão são directamente proporcionais à distância à linha neutra, ou seja, as secções mantêm-se planas após o carregamento;
- as acções a que a estrutura está sujeita no momento de aplicação do CFRP provocam a resposta do elemento dentro da gama elástica;
- os cálculos de dimensionamento são baseados nas dimensões existentes, disposição de armaduras e nas propriedades dos materiais do elemento a ser reforçado;
- a extensão máxima admissível de compressão no betão é de 3%;
- a resistência do betão à tracção é ignorada;
- o reforço de CFRP tem comportamento linear até à rotura.

2.7.5.2. Propriedades dos materiais

Na grande maioria dos casos, os valores das propriedades dos materiais fornecidos pelos fabricantes não consideram o cenário de exposição ambiental de longo prazo, pelo que devem ser consideradas como propriedades iniciais. De forma a ter em conta a redução das propriedades dos materiais que essa exposição de longo prazo poderá provocar, os valores de cálculo da tensão última dos laminados (σ_{fu}) e da respectiva extensão última (ε_{fu}) deverão resultar do produto dos valores nominais fornecidos pelo fabricante (respectivamente σ_{fu}^* e ε_{fu}^*) por um factor de redução ambiental (C_E) que depende das condições de exposição, tal como indicado na tabela 2.6. O valor de cálculo do módulo de elasticidade do CFRP (E_f) é obtido a partir da lei de Hooke. As expressões 2.1 a 2.3 ilustram o procedimento descrito. Refira-se que o factor de redução ambiental poderá ser considerado unitário quando o fabricante refere, explicitamente, quais os valores das propriedades dos materiais que devem ser adoptados nos cálculos de dimensionamento.

$$\sigma_{fu} = C_E \cdot \sigma_{fu}^* \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

$$E_f = \sigma_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (2.3)$$

Tabela 2.6. Factor de redução ambiental para as propriedades do reforço de CFRP de acordo com as condições de exposição [2.50].

Condições de exposição	Factor de redução ambiental (C_E)
Ambiente interior	0.95
Ambiente exterior (estruturas em ambientes não fechados)	0.85
Ambiente agressivo (complexos industriais químicos e estações de tratamento de águas residuais)	0.85

2.7.5.3. Limites de reforço/reserva de segurança

Quando se reforça uma estrutura de betão armado com laminados de CFRP aplicados através do sistema EBR, estes podem ficar sujeitos a actos de vandalismo, impactos ou outras causas que provoquem a perda total do compósito. Assim, o elemento de betão não reforçado deve possuir um nível de segurança capaz de assegurar que a estrutura não colapse quando uma das situações anteriores se verificar. Neste sentido, o ACI 440.2R-08, em vez de fixar directamente uma taxa máxima de reforço, estabelece que um elemento de betão armado inicialmente reforçado por colagem exterior de CFRP, após ter perdido o reforço por causas accidentais, deve possuir capacidade resistente suficiente para resistir à seguinte combinação de acções:

$$(\emptyset R_n)_{existente} \geq (1.1 S_{DL} + 0.75 S_{LL})_{reforçada} \quad (2.4)$$

em que \emptyset é o factor de redução da resistência (apresentado no ponto seguinte), R_n é a resistência nominal do elemento e S_{DL} e S_{LL} representam, respectivamente, as acções permanentes e variáveis consideradas no dimensionamento do reforço.

2.7.5.4. Estado limite último de flexão

De acordo com o ACI 440, a verificação de segurança ao estado limite último de flexão baseia-se na expressão 2.5,

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.5)$$

em que,

- M_n – momento fletor resistente nominal;
- M_u – momento fletor actuante de cálculo.

O momento actuante de cálculo resulta da aplicação de um carregamento majorado segundo a expressão 2.6,

$$w_u = 1.4 w_{DL} + 1.7 w_{LL} \quad (2.6)$$

em que,

- w_u – valor da carga de dimensionamento;
- w_{DL} – valor da carga permanente;
- w_{LL} – valor da carga variável.

O momento resistente nominal é determinado com base no método do diagrama rectangular simplificado, assumindo como válidas as hipóteses referidas no ponto 2.7.5.1. Na figura 2.20 a) apresenta-se uma secção rectangular genérica reforçada à flexão com um laminado de CFRP e nas figuras 2.20 b) e 2.20 c) apresentam-se, respectivamente, os diagramas de extensões e tensões em estado limite último de flexão. Refira-se que na maioria dos casos, o reforço é aplicado enquanto uma determinada carga actua sobre a estrutura, pelo que, a fibra inferior da secção (onde vai ser colocado o laminado) apresenta uma dada extensão inicial (ε_{bi}), tal como a fibra superior.

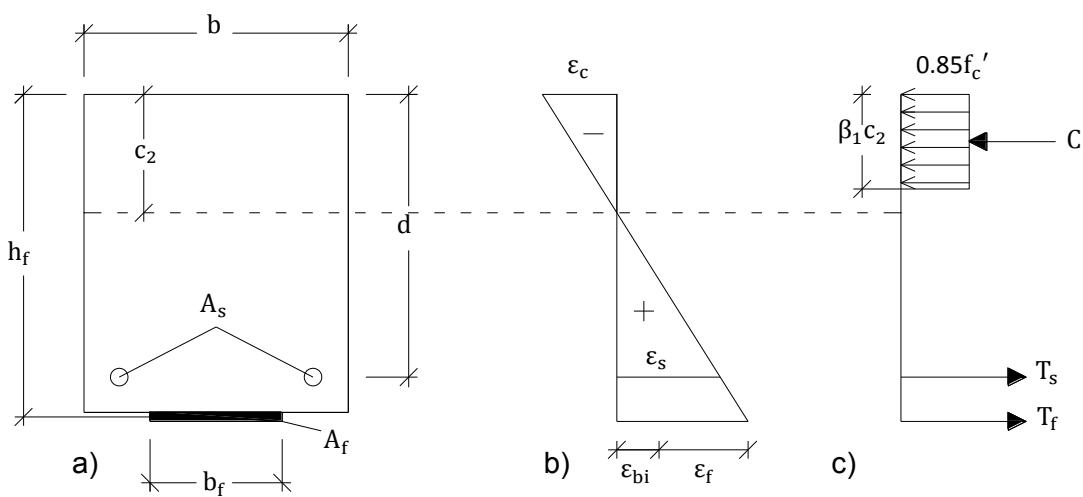


Figura 2.20. a) secção genérica reforçada à flexão reforçada com um laminado de CFRP; b) diagrama de extensões simplificado em estado limite último; c) diagrama de tensões simplificado em estado limite último.

Na anterior figura é necessário definir os seguintes parâmetros:

- ε_c – extensão de compressão do betão, que deverá ser no máximo 3% (extensão na rotura por compressão $\varepsilon_{cu}=3\%$);
- f'_c – valor característico da resistência do betão à compressão;
- C – força resultante das tensões de compressão no betão;
- c_2 – distância entre a fibra superior da secção e a posição da linha neutra;
- β_1 – rácio entre a distância entre a fibra superior da secção e a posição da linha neutra e altura do diagrama de compressões no betão;
- ε_s – extensão das armaduras traccionadas;
- T_s – força resultante das tensões de tracção nas armaduras;
- ε_f – extensão do laminado;
- T_f – força resultante das tensão de tracção no laminado;
- b – largura da secção de betão;
- b_f – largura do laminado;
- d – distância entre a fibra superior da secção e o centro de gravidade das armaduras;
- h_f – distância entre a fibra superior da secção e o centro do laminado.

O parâmetro β_1 toma o valor de 0.85 para betões com resistência característica à compressão até 35 MPa. Caso essa resistência seja superior, o valor de β_1 deverá ser reduzido linearmente em 0.05 por cada 7 MPa que excedam 35 MPa, até ao valor mínimo de 0.65.

As forças resultantes das tensões de compressão no betão e das tensões de tracção nas armaduras e no laminado podem ser obtidas, respectivamente, através das expressões 2.7, 2.8 e 2.9,

$$C = 0.85f'_c \beta_1 c_2 b \quad (2.7)$$

$$T_s = A_s f_s \quad (2.8)$$

$$T_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad (2.9)$$

em que,

- E_s – módulo de elasticidade das armaduras;
- f_s – tensão de tracção das armaduras.

De modo a evitar roturas prematuras por destacamento do laminado, o ACI 440.2R-08 estabelece que a extensão no reforço (ε_f) deverá respeitar a seguinte condição,

$$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (2.10)$$

em que,

- ε_{fd} – valor limite da extensão do laminado;
- t_f – espessura do laminado.

Para calcular o valor de M_n é necessário calcular a posição da linha neutra (c_2). Esta é determinada por equilíbrio das forças resultantes C , T_s e T_f . No entanto, para que esse cálculo seja possível, é essencial averiguar qual dos seguintes quatro modos de rotura é valido:

- **1º modo:** rotura por esmagamento do betão após a cedência das armaduras;
- **2º modo:** rotura por esmagamento do betão anterior à cedência das armaduras;
- **3º modo:** rotura pelo reforço após a cedência das armaduras;
- **4º modo:** rotura pelo reforço anterior à cedência das armaduras.

No 1º modo de rotura a tensão nas armaduras traccionadas (f_s) adquire o valor da respectiva tensão de cedência (f_{yk}) enquanto que a extensão no betão é 3% (ε_{cu}). Tal como se observa na figura 2.20 c), de acordo com a hipótese assumida, o diagrama de extensões no instante da rotura apresenta um andamento linear, pelo que o valor da extensão no reforço pode ser calculado a partir da extensão no betão. Desta forma, é possível determinar a posição da linha neutra. Finalmente, é necessário averiguar a validade deste mecanismo de rotura. Recorrendo à posição calculada da linha neutra, verifica-se se a extensão nas armaduras é superior à que provoca a sua cedência (ε_{syk}) e se a extensão no laminado é inferior ao seu valor limite (ε_{fd}). O procedimento de cálculo anterior resume-se da seguinte forma:

$$\text{1ºmodo: } \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \\ f_s = f_{yk} \end{cases} \Rightarrow \text{calcular } c_2 \Rightarrow \text{verificar se } \begin{cases} \varepsilon_s \geq \varepsilon_{syk} \\ \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd} \end{cases}$$

Para os outros modos de rotura o procedimento é idêntico, e pode-se resumir da seguinte forma:

$$\text{2ºmodo: } \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \\ f_s \leq f_{yk} \end{cases} \Rightarrow \text{calcular } c_2 \Rightarrow \text{verificar se } \begin{cases} \varepsilon_s \leq \varepsilon_{syk} \\ \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd} \end{cases}$$

$$\text{3ºmodo: } \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_f = \varepsilon_{fd} \\ f_s = f_{yk} \end{cases} \Rightarrow \text{calcular } c_2 \Rightarrow \text{verificar se } \begin{cases} \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \\ \varepsilon_s \geq \varepsilon_{syk} \end{cases}$$

$$\text{4ºmodo: } \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_f = \varepsilon_{fd} \\ f_s \leq f_{yk} \end{cases} \Rightarrow \text{calcular } c_2 \Rightarrow \text{verificar se } \begin{cases} \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \\ \varepsilon_s \leq \varepsilon_{syk} \end{cases}$$

Após determinado qual dos modos de rotura preconizados no ACI 440.2R-08 caracteriza a secção reforçada em causa, é possível proceder ao cálculo do momento fletor resistente nominal. Este é dado pela seguinte expressão,

$$M_n = A_s f_{yk} \left(d - \frac{\beta_1 c_2}{2} \right) + f_f A_f E_f \varepsilon_f \left(h_f - \frac{\beta_1 c_2}{2} \right) \quad (2.11)$$

em que,

- f_f – factor de redução da capacidade mecânica do CFRP, tomando o valor recomendado de 0.85.

O factor de redução da resistência (\emptyset) pode ser determinado através da expressão 2.12.

$$\emptyset = \begin{cases} 0.9 & \text{para } \varepsilon_s > 0.5\% \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{syk} \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{syk})}{0.005 - \varepsilon_{syk}} & \text{para } 0.5\% > \varepsilon_s > \varepsilon_{syk} \end{cases} \quad (2.12)$$

2.7.5.5. Aderência betão-CFRP

O regulamento americano ACI 440.2R-08 não apresenta uma verificação de segurança directa relativamente aos modos de rotura relacionados com a perda de aderência ou destacamento do sistema de reforço. Tal como referido na secção anterior, para evitar a ocorrência desses modos de rotura, a extensão máxima no reforço é limitada pelo valor determinado de acordo com a expressão 2.10. Por esta razão, optou-se por complementar esta verificação indirecta com duas recomendações presentes no Bulletin 14 da fib [2.19]. A primeira está relacionada com o destacamento do reforço numa zona afastada da extremidade devido a elevadas tensões de corte na ligação betão-CFRP [modo de rotura f] na figura 2.18]. Assim, para que seja verificada a segurança a

este mecanismo de rotura, o documento da *fib* recomenda que as seguintes condições sejam respeitadas,

$$\begin{cases} \frac{V}{0.95db_f \left(1 + \frac{A_s E_s}{A_f E_f}\right)} \leq f_{cbd} & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \\ \frac{V}{0.95db_f} \leq f_{cbd} & \text{para } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.13)$$

em que,

- V – esforço transverso na secção em causa;
- f_{cbd} – tensão de corte resistente do betão, dada pela expressão 2.14,

$$f_{cbd} = 1.8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (2.14)$$

em que,

- γ_c – coeficiente minorativo da resistência do betão, de valor 1.5.

A verificação das condições apresentadas na expressão 2.13 é possível após ser determinada a secção da viga a partir da qual as armaduras se encontram em cedência, quando esta é sujeita à carga de dimensionamento. A expressão 2.15 permite calcular a força de tracção instalada nas armaduras (F_s), numa dada secção sujeita a esforço transverso (V) e a momento fletor (M). Expressando o valor dos esforços em função da coordenada que define a secção de cálculo, e igualando a expressão 2.15 à força que provoca a cedência das armaduras, é possível determinar a posição da secção em causa e os esforços a que está sujeita. Refira-se que na expressão 2.15 o parâmetro θ representa o ângulo das bielas de compressão, que se considerou ser de 30° , e que z representa o valor do braço entre as resultantes das forças de compressão e tracção, que se considerou igual a 90% da altura útil (d).

$$F_s = \left(\frac{V}{2} \cotg\theta + \frac{M}{z}\right) \frac{A_s E_s}{A_f E_f + A_s E_s} \quad (2.15)$$

A segunda verificação de segurança está relacionada com o destacamento do reforço na zona de extremidade do laminado [modo de rotura e) da figura 2.18], envolvendo o cálculo do respectivo comprimento de amarração (l_b). Basicamente, a verificação em causa traduz-se pela expressão 2.16,

$$F_{T,f,X'_1} \leq T_{fa} \quad (2.16)$$

em que,

- F_{T,f,X'_1} – força de tracção instalada no laminado na respectiva secção de dispensa (secção X'_1 ');
- T_{fa} - força resistente na zona de ancoragem.

A força de tracção instalada no laminado na secção a partir da qual o laminado pode ser dispensado (F_{T,f,X'_1}) é obtida através da expressão 2.17,

$$F_{T,f,X'_1} = \left(\frac{V_{x1'}}{2} \cotg\theta + \frac{M_{x1'}}{z}\right) \frac{A_f E_f}{A_f E_f + A_s E_s} \quad (2.17)$$

em que,

- V_{x1} , – esforço transverso na secção X_1' ;
- M_{x1} , – momento flector na secção X_1' .

A secção X_1' corresponde ao ponto em que o diagrama de momento flector da viga sujeita à carga de dimensionamento iguala o momento flector resistente da secção não reforçada. Refira-se que deve ser considerada a translação do diagrama de momento flector, que tem em conta as forças de tracção geradas pelo esforço transverso.

O valor máximo da força resistente na zona de ancoragem ($T_{fa,máx}$) é mobilizado através da adopção do comprimento de amarração máximo ($l_{b,máx}$). Ambos os parâmetros podem ser determinado com recurso às expressões 2.18 e 2.19,

$$T_{fa,máx} = 0.64 \propto b_f k_b k_c \times \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (2.18)$$

$$l_{b,máx} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} \quad (2.19)$$

em que,

- \propto – factor de redução que tem em conta a influência das fendas de corte na resistência da ligação, tomando o valor de 0.9;
- b_f - largura do laminado;
- k_c – factor que tem em conta o estado de compacidade do betão, e que geralmente toma o valor unitário, excepto quando o reforço adere a superfícies de baixa compacidade, situação em que se considera $k_c=0.67$;
- k_b - factor que tem em conta a geometria da ligação, dado pela expressão 2.20 e que varia entre 1.0 e 1.3,

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (2.20)$$

em que,

- b_f e b – são as grandezas definidas anteriormente (em milímetros);
- $b_f/b \geq 0.33$.

No entanto, caso se adopte um comprimento de amarração (l_b) inferior ao valor máximo ($l_{b,máx}$), a força resistente de aderência é dada pela seguinte expressão,

$$T_{fa} = T_{fa,máx} \frac{l_b}{l_{b,máx}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,máx}} \right) \quad (2.21)$$

2.7.5.6. Recomendações em situação de serviço

No que refere a verificações em situação de serviço, nomeadamente abertura de fendas e deslocamentos máximos das vigas reforçadas com sistemas CFRP, o documento americano apenas recomenda que sejam respeitadas as exigências relativas a estruturas de betão armado correntes (não reforçadas e sem pré-esforço). No entanto, para evitar deformações inelásticas, é recomendado

que as armaduras não atinjam a cedência quando a estrutura é sujeita a cargas de serviço, sobretudo em elementos com carregamento de carácter cíclico. O ACI 440.2R-08 concretiza a exigência anterior referindo que, numa situação de serviço, a tensão nas armaduras deverá ser inferior a 80% do valor característico da sua tensão de cedência, e que a tensão de compressão no betão não deve ultrapassar valores na ordem dos 45% da resistência característica do betão à compressão [2.50].

2.7.5.7. Recomendações em situação de incêndio

No ACI 440.2R-08 é reconhecida a susceptibilidade dos sistemas de reforço de CFRP colados exteriormente a temperatura elevadas. Neste sentido, o documento normativo americano recomenda que nas verificações de segurança em situação de incêndio não seja considerada a contribuição para a resistência conferida pelo reforço, a não ser que seja demonstrado que este permanece a uma temperatura inferior a um dado valor crítico através da utilização de materiais que o protejam da acção do fogo. Assim, a capacidade resistente do elemento não reforçado (considerando a deterioração das propriedades mecânicas devido às temperaturas elevadas) deverá ser superior aos esforços causados pelo carregamento em situação de incêndio. O valor crítico da temperatura pode ser considerado igual à menor temperatura de transição vítreia dos materiais que constituem o sistema de reforço. No entanto, esse documento refere que o valor da temperatura crítica pode ser alterado caso sejam desenvolvidos estudos que comprovem que é seguro tirar partido da resistência do reforço para temperaturas superiores à que define a transição vítreia dos materiais. Tal como é referido no capítulo 4, este aspecto será objecto de estudo no presente trabalho.

2.8. Bibliografia

- [2.1] J. R. Correia, "Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP) - Aplicação de Vigas Mistas GFRP-Betão na Construção", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico, 2004.
- [2.2] A. Zeferino, J. Martins, "Pedras Naturais", Materiais de Construção I, Série Materiais, 4.^a Edição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho, 2006.
- [2.3] J. Busel, J. Lockwood, "Product selection guide: FRP Composite Products for Bridge Applications", The market development alliance of the FRP composites industry, Harrison, New York, 2000, (citado em [2.1]).
- [2.4] C. Bakis, L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, S. Rizkalla, T. Triantafillou, "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review", Journal of Composites for Construction, Vol. 6, No. 2, pp. 73-87, 2002.
- [2.5] G. Gibson, "The Cost Effective Use of Fibre Reinforced Composites Offshore", Research report 039, University of Newcastle, 2003.
- [2.6] Página da internet: www.xiongudu.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.7] Página da internet: www.corbisimages.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.8] Página da internet: www.sidneyrezende.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.9] Página da internet: www.plasmacor.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.10] Página da internet: www.arch.mcgill.ca, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.11] Página da internet: www.avioeseaeroportos.blogspot.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.12] Página da internet: www.tritonboats.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.13] Página da internet: www.new-fishingtips.com, visitada em 23 Julho 2010.
- [2.14] S. Halliwell, T. Reynolds, "Effective Use of Fibre Reinforced Polymers Materials in Construction", FBE Report 8, Centre for Composites in Construction, BRE Press, UK, 2004.
- [2.15] L. F. P Juvandes, "Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de CFRP", Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP, Setembro, 1999.
- [2.16] ASTM D30, International Technical Committee D30 on Composite Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1964.
- [2.17] S. J. E. Dias, "Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP, Março 2001.
- [2.18] B. J. Matos, "Vigas de betão armado com varões de GFEP – Avaliação do comportamento em serviço e na rotura de vigas hiperestáticas", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, 2010.
- [2.19] Fib bulletin 14, "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures", Fédération Internationale du Béton (fib), Task Group 9.3 FRP, Lausanne, 2001.

- [2.20] T. Keller, "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", Structural Engineering Documents, No. 7, IABSE, 131 p., Zurich, 2003.
- [2.21] W. Smith, "Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", McGraw-Hill, Lisboa, 1998.
- [2.22] Página da internet: www.sp-reinforcement.ch, visitada em 20 Agosto 2010.
- [2.23] ACI Committee 440, "State-of-the-Art report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ACI 440 R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996.
- [2.24] E.J. Barbero, "Introduction to Composite Materials Design", Taylor & Francis, 336 p., Philadelphia, 1998.
- [2.25] Página da Internet: www.cn-protech.com/, visitada 28 Agosto 2010.
- [2.26] D. Rodrigues Ferreira, "Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2000.
- [2.27] S. C. Fonseca, "Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Usados na Engenharia Civil: Características e Aplicações", Informação Técnica Científica - Materiais de Construção, ITMC35, LNEC, Lisboa, 2005.
- [2.28] W. Callister, "Materials Science and Engineering: An Introduction", John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2.29] M. Sá, "Comportamento Mecânico e Estrutural de FRP's - Elementos Pultrudidos de GFRP", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Dezembro de 2007.
- [2.30] J. R. Correia, "GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering. Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour", Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [2.31] L. F. P. Juvantes, A. Marques, J. Figueiras, "Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão", Relatório técnico, 112p., FEUP, Março, 1996.
- [2.32] Página da Internet: www.netcomposites.com, visitada em 29 Agosto 2010.
- [2.33] B. Tang, "Fiber Reinforced Polymer Composites Application in USA", First Korea/USA Road Workshop Proceedings, 1997.
- [2.34] J. A. Figueiras, L. F. P. Juvantes, "Reforço de estruturas de betão por colagem de sistemas FRP", Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, REPAR, pp.491-499, Lisboa, Junho, 2000.
- [2.35] M. S. S., Ribeiro, "Processos tradicionais de reparação da corrosão em estruturas de betão", Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, LNEC, Lisboa, 1997.
- [2.36] L. F. P. Juvandes, J. A. Figueiras, A. T. Marques, "Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP", 1º relatório experimental, 165p., FEUP, Maio, 1998.
- [2.37] L. C. Hollaway, M. B. Leeming, "Strengthening of reinforced concrete structures, using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering", Woodhead Publishing, 1999.

- [2.38] B. Täljsten, "Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics, Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Luleå University of Technology, 1994.
- [2.39] U. Meier, "Post strengthening by continuous fiber laminates in Europe", Symp. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, pp.41-46, Japão, Outubro, 1997.
- [2.40] A. Abdelrahman, S. Rizkalla, "Design of concrete members prestressed by FRP", texto de apoio do curso "Desing and Retrofit of Structures with Fiber Composites", the Canadian Network of Centre of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Canada), ICCL'98, 63 p., Arizona, Janeiro, 1998.
- [2.41] A. Zureick, D .Scott, "Short-Term Behavior and Design of Fiber-Reinforced Polymeric Slender Members Under Axial Compression", Journal of Composites for Construction, Vol. 1, No. 4, pp. 140-149, 1997. (citado em [2.1])
- [2.42] Ray Publishing, "Composites for Infraestructure – a guide for civil engineers", Ray Publishing, Inc., Wheat Ridge, USA, 1998.
- [2.43] Página da internet: <http://www.sp-reinforcement.ch/?L=1>, visitada em 20 Julho 2009.
- [2.44] Página da internet: <http://www.sika.pt/home.htm>, visitada em 20 Julho 2009.
- [2.45] J. L. Clarke, "Structural design of polymer composites – EUROCOPM design code handbook", The European Structural Polymeric Composites Groups, E&FN, 751 p., Londres, 1996.
- [2.46] T. Yamaguchi, Y. Kato, T. Nishimura, "Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers", proceedings of the third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete structures (FRPRCS-3), JCI, pp. 179-186, Japão, Outubro, 1997.
- [2.47] J. A. O. Barros, J. M Sena-Cruz, D. R. S. M. Ferreira, P. J. B. Lourenço, "Análise Experimental de Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Carbono sob Acções Cíclicas", 5ª Conferência Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Outubro, 2001.
- [2.48] J. Appleton, A. Costa, "Reabilitação e Reforço de Estruturas", documentos de apoio da disciplina de Reabilitação e Reforço de Estruturas, DECivil, IST, Lisboa.
- [2.49] P. França, "Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Laminates", Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2007.
- [2.50] ACI Committe 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI 440.2R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 73 p., 2008.
- [2.51] A. S. Fortes, J. A. O. Barros, I. J. Padaratz, "Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento", Relatório 02-DEC/E-13, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 32 p., 2002.
- [2.52] L. F. P. Juvandes, "Reforço de estruturas por colagem exterior de sistemas compósitos de FRP – Manual de Procedimentos e de Controlo de Qualidade para Construção", publicação LEMC_JUV/004-2007, MOTA-ENGIL/FEUP, Agosto, 2007.

- [2.53] C. A. Ross, D. M. Jerome, J. W. Tedesco, M. L. Hughes, "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites laminates", ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 2, pp. 212-220, 1999.
- [2.54] P. L. Kelley, M. L. Brainerd, M. Vatocec, "Design philosophy for structural strengthnening with FRP", Concrete International, pp. 77-82, Fevereiro, 2000.
- [2.55] O. Buyukozturk, O. Gunes, E. Karaca, "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites", Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 1, pp. 9-19, Fevereiro, 2004.
- [2.56] M. Blaschko, R. Nierdermeier, K. Zilch, "Bond Failure Modes of Flexural Members Strengthened with FRP", Proceeding of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, pp. 315-327, Tucson, Janeiro, 1998.
- [2.57] S. Matthys, "Structural behavior and design of concrete members strengthened wit externally bonded FRP reinforcement", Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Ghent University, Ghent, 2000.
- [2.58] NR. Z-36.12-29 – "Sika Carbodur", autorização geral de construção dada pela Deutches Institut fur Bautechnik (DIBt), 28 p. Berlim, Novembro, 1997.
- [2.59] NR. Z-36.12-54 – "S&P Kohlefaserlamellen", autorização geral de construção dada pela Deutches Institut fur Bautechnik (DIBt), 31 p., Berlim, Outubro, 1998.
- [2.60] "Nachtragliche verstarkung von bauwerken mit CFK-lamellen", publicação da série – Documentos SIA, Sociedade Suíça de Engenheiros e de Arquitectos, Zurich, Setembro, 1997.
- [2.61] TR55, "Design Guidance for Strengtening Concrete Structures using Fibre Composite Materials: acceptance, inspection and monitoring", Technical Report 55, Concrete Society, Crowthome, UK, 2000.
- [2.62] TR57, "Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials: acceptance, inspection and monitoring.", Technical Report 57, Concrete Society, Crowthome, UK, 2003.
- [2.63] CSA S806, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", C. S. Association, Rexdale, Canadá, 2002.
- [2.64] ECP208, "The Egyptian Fiber Reinforced Code", 2005.
- [2.65] JSCE, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials", Tokyo, Japan, 1997.
- [2.66] JSCE, "Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of CFRP Sheets", Tokyo, Japan, 2000.

3. Comportamento ao fogo de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas FRP

3.1. Introdução

A utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP's) no reforço de estruturas de betão armado através de técnicas de colagem registou um crescimento considerável devido às inúmeras vantagens que estes apresentam face aos materiais tradicionais (principalmente o aço). No entanto, a susceptibilidade destes sistemas a temperaturas elevadas constitui, a par do seu elevado custo, a sua principal desvantagem. Para temperaturas próximas do valor que define a transição vítreia dos compósitos de CFRP, as suas propriedades mecânicas registam uma degradação acentuada. Além disso, os CFRP's são combustíveis e libertam fumos e gases tóxicos quando sujeitos a uma situação de incêndio. Por estas razões, existe alguma reserva na aplicação destes materiais no reforço de elementos estruturais de edifícios, onde o fogo constitui uma das acções de projecto.

Esta secção do documento inicia-se com a abordagem às várias formas de propagação do calor e com a definição da acção de um incêndio. Seguidamente, descrevem-se os efeitos das temperaturas elevadas nas propriedades físicas e mecânicas do (i) betão, (ii) aço, (iii) CFRP e (iv) adesivo de colagem, permitindo compreender como o comportamento desses materiais influencia o desempenho dos elementos estruturais reforçados com CFRP's. São igualmente abordados métodos de protecção passiva contra a acção do fogo, nomeadamente a aplicação de materiais com características isolantes sobre o sistema de reforço. Por fim, são referidos os principais resultados e conclusões obtidos em diversas campanhas experimentais anteriormente realizadas neste domínio.

3.2. Processos de transmissão de calor

A transmissão de calor pode ser definida como a propagação de energia entre regiões de um meio (gasoso, líquido ou sólido), como consequência da diferença de temperaturas entre elas [3.1]. Nos pontos seguintes são brevemente descritos os três processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

3.2.1. Condução

A transferência de calor por condução térmica é realizada ao nível da actividade atómica e da actividade molecular. A transferência de energia ocorre das partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas de determinada substância devido às interacções entre estas. O processo de transferência de calor ocorre em sólidos, líquidos ou gases sem que haja transporte de matéria. No caso de um sólido, a condução pode ser atribuída à actividade atómica na forma de vibrações. Se se estiver na presença de um sólido isolante, a transferência de energia é realizada somente devido às vibrações da rede atómica. Caso o sólido seja um material condutor, essa transmissão também é realizada mediante o movimento de translação dos electrões livres [3.2].

A lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução foi proposta por J. B. Fourier em 1822 e permite determinar a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. No caso de um problema unidimensional em regime estacionário (a transferência de calor ocorre apenas numa direcção e não varia com o tempo), o fluxo de calor transmitido nessa direcção (x) por

unidade de área é dado pela forma mais simples da *lei de Fourier*, de acordo com a expressão 3.1 [3.2],

$$f_x = k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

em que,

- f_x – fluxo de calor transmitido por unidade de área na direcção x (W/m^2);
- k – condutibilidade térmica do material (W/m C);
- $\frac{dT}{dx}$ – gradiente de temperatura na direcção x (C/m).

Caso a distribuição de temperaturas seja linear, o gradiente de temperatura $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ entre dois pontos com temperaturas T_1 e T_2 (com $T_2 > T_1$) e distanciados de L pode ser expresso da seguinte forma:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.2)$$

Assim, admitindo a linearidade da distribuição de temperaturas, a equação da *lei de Fourier* pode ser descrita pela expressão 3.3.

$$f_x = k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.3)$$

A condutibilidade térmica (k) depende da composição química, do estado físico, da textura e da própria temperatura do material. No entanto, considerando que se mantém constante no intervalo de tempo em análise, por observação da expressão 3.3, conclui-se que o fluxo de calor entre dois pontos será tanto menor, quanto menor for o valor da condutibilidade térmica do material constituinte do meio.

3.2.2. Convecção

A convecção processa-se por uma troca de energia calorífica entre partes em movimento de um fluido (líquido ou gasoso) ou entre este e superfícies sólidas a diferentes temperaturas. Podem distinguir-se os seguintes dois tipos de convecção: natural e forçada. O fenómeno de transferência de calor por convecção natural surge da mistura de fluidos que se encontram a temperaturas distintas. Por essa razão, as suas densidades também são distintas, o que provoca um movimento de matéria (o ar mais frio é mais denso, apresentando, por isso, um movimento descendente). A convecção forçada ocorre quando o movimento do fluido é forçado por um meio exterior, podendo-se referir como exemplos os ventiladores mecânicos e o vento atmosférico. Em situação de incêndio, a transferência de calor por convecção envolve gases quentes do incêndio que passam por um elemento estrutural inicialmente frio, transferindo-lhe calor. A taxa de aquecimento depende da velocidade do fluido à superfície do objecto, das propriedades térmicas do fluido e do sólido, bem como da temperatura do sólido. A convecção é um fenómeno bastante complexo, e que deve ter em conta diversos factores. No entanto, pode ser simplificado através da *lei do arrefecimento de Newton* (expressão 2.4), que permite determinar o fluxo de calor transmitido entre um fluido e uma superfície [3.1],

$$f_x = h_c(T_1 - T_e) \quad (3.4)$$

em que,

- f_x – fluxo de calor transmitido por unidade de área (W/m^2);
- h_c – coeficiente de condutância térmica superficial por convecção (W/m C);
- T_1 – temperatura da superfície sólida (C);
- T_e – temperatura do fluido (C).

A dificuldade de simplificar este fenómeno numa única equação deve-se, essencialmente, à determinação do valor do coeficiente de convecção, pois este está dependente de vários parâmetros. Este coeficiente só pode ser obtido de uma forma aproximada dada a complexidade do processo, sendo, por esse motivo, necessário admitir algumas simplificações [3.3].

3.2.3. Radiação

Toda a matéria, independentemente do seu estado, emite energia térmica em função da temperatura a que se encontra. Esta energia pode ser emitida por sólidos, líquidos ou mesmo gases, sendo transportada por ondas electromagnéticas. Na transferência de calor por condução ou por convecção é indispensável a presença de um meio material, contrariamente ao que sucede nas transferências por radiação, em que não é necessário qualquer meio, sendo por esse facto conhecida a sua eficiência de transmissão no vácuo [3.1].

Um corpo ideal que se encontra a uma temperatura absoluta uniforme (T), emite um fluxo de calor por unidade de área da sua superfície, ao qual se dá o nome de poder emissivo, e que é dado pela *lei de Stefan-Boltzmann* (expressão 3.5) [3.2],

$$f = \sigma T^4 \quad (3.5)$$

em que,

- f – fluxo de calor transmitido por unidade de área (W/m^2);
- σ – constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ C}^4$);
- T – temperatura absoluta do corpo (K).

A um corpo que é capaz de radiar de acordo com a expressão 3.5 dá-se o nome de corpo negro ou ideal. O fluxo de calor emitido por um corpo real pode ser considerado proporcional à 4ª potência da temperatura, mas o seu valor é menor que o emitido por um corpo negro, logo a expressão 3.5 tem de ser adaptada, passando a ser representada pela expressão 3.6 [3.2],

$$f = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.6)$$

em que ε é uma propriedade radioactiva da superfície do corpo, denominada emissividade. Esta propriedade, cujo valor está situado no intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, indica a eficiência de emissão da superfície do material em questão, em comparação com um corpo negro.

Se se tiverem duas superfícies S_1 e S_2 que se encontram a temperaturas T_{S1} e T_{S2} e apresentam área A_{S1} e A_{S2} , respectivamente, a troca de calor por radiação da superfície S_1 (a mais quente) para a superfície S_2 ($Q_{S1 \rightarrow S2}$) é dada pela expressão 3.7,

$$Q_{S1 \rightarrow S2} = \varepsilon A_{S1} \sigma (T_{S1}^4 - T_{S2}^4) \quad (3.7)$$

Para se obter uma expressão semelhante às apresentadas para a transferência de calor por condução e convecção pode-se reescrever a anterior expressão da seguinte forma,

$$Q_{S1 \rightarrow S2} = h_r A_{S1} (T_{S1} - T_{S2}) \quad (3.8)$$

em que

- h_r – coeficiente de transmissão de calor por radiação ($\text{W/m}^2 \text{ C}$), dado pela expressão 3.9:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_{S1} + T_{S2})(T_{S1}^2 + T_{S2}^2) \quad (3.9)$$

3.3 Definição da acção do incêndio

Para a ocorrência de um incêndio é necessária a existência simultânea de um combustível, de um comburente (oxigénio) e de uma fonte de ignição. O desenvolvimento de um incêndio num edifício pode ser dividido em quatro fases principais: (i) ignição, (ii) propagação, (iii) desenvolvimento pleno e (iv) arrefecimento ou fase de extinção. Neste ponto do documento caracteriza-se cada uma destas fases. São ainda referidas as principais curvas de incêndio padrão adoptadas na Europa.

3.3.1. Desenvolvimento de um incêndio

A ignição constitui a primeira fase de desenvolvimento de um incêndio, tendo início quando, na presença de oxigénio, existe energia suficiente para activar o material combustível. Tipicamente, esta energia tem origem numa causa accidental, como um curto-circuito ou faíscas de uma operação de soldadura. Nesta fase as temperaturas apresentam valores relativamente baixos, não tendo grande influência no comportamento dos elementos estruturais [3.4].

Na fase de propagação regista-se um aumento da quantidade de material a entrar em combustão. Os produtos resultantes da combustão, gases e fumo, por se encontrarem a temperaturas mais elevadas do que o ar, têm tendência a apresentar um movimento ascendente e a acumularem-se junto ao tecto do compartimento (admitindo que o incêndio ocorre num edifício). Desta forma, é constituída uma camada de gases e fumo com um poder de transmissão de calor por radiação bastante elevado que provoca o aquecimento dos elementos estruturais (sobretudo daqueles que se encontram junto ao tecto do compartimento). Nesta fase, as temperaturas podem atingir valores entre 500°C e 600°C . Com a evolução do incêndio vão sendo libertados cada vez mais gases voláteis, reforçando o ciclo de aquecimento até ao momento em que se dá a inflamação geral do compartimento em causa. A partir do instante em que ocorre este fenómeno, denominado por *flash over*, as temperaturas aumentam drasticamente [3.5].

Na fase de desenvolvimento pleno, o incêndio caracteriza-se por apresentar uma temperatura aproximadamente constante, que se prolongará até ao instante em que todo o material combustível ou o oxigénio existentes no compartimento sejam totalmente consumidos. Dá-se então início a uma diminuição generalizada das temperaturas, denominada por fase de arrefecimento ou extinção [3.5].

Na figura 3.1 apresenta-se a curva temperatura-tempo de um incêndio real, onde estão identificadas as fases referidas.

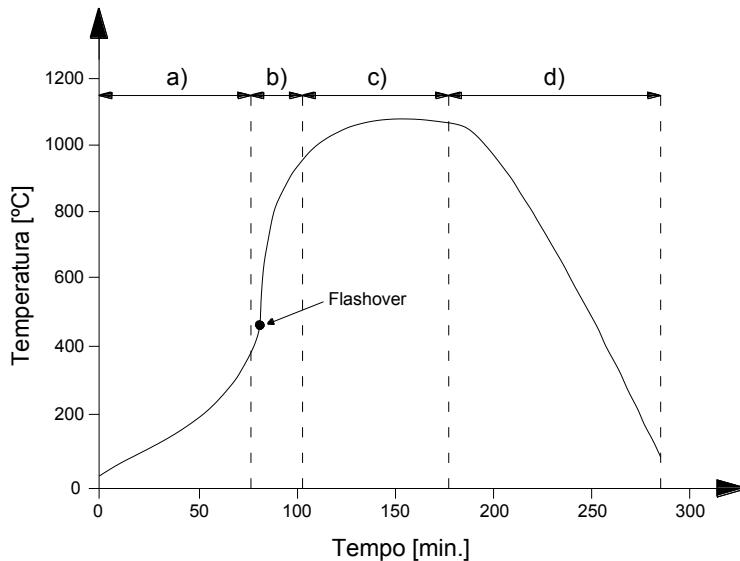


Figura 3.1. Curva temperatura-tempo de um incêndio real; a) fase de ignição; b) fase de propagação; c) fase de pleno desenvolvimento; d) fase de extinção (adaptado de [3.6]).

3.3.2. Curvas de incêndio padrão: nominais e paramétricas

Uma curva de incêndio padrão tem como objectivo representar a temperatura dos gases do ambiente durante um incêndio em função do tempo. Podem-se distinguir dois tipos de curvas padrão: nominais e paramétricas.

As curvas nominais têm como principal característica a presença de apenas um ramo ascendente, admitindo que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo e é independente das características do ambiente e da quantidade de material combustível. Umas das curvas de incêndio nominais mais utilizada é a definida na norma ISO 834 [3.7]. A maioria dos ensaios experimentais e métodos de cálculo para avaliar a capacidade resistente ao fogo de estruturas de edifícios recorre a esta curva. Refira-se que será esta a curva de incêndio padrão adoptada no programa experimental. Na figura 3.2 apresentam-se a curva definida pela norma ISO 834 e a curva de um incêndio natural. Nessa figura é possível observar que a curva de incêndio padrão cresce continuamente, enquanto que na curva do incêndio real se observa uma diminuição dos valores de temperatura, o que ocorre quando a maioria dos materiais combustíveis já foram consumidos. Além disso, constata-se que no incêndio padrão a fase de ignição não é considerada. Refira-se que nessa figura a curva de incêndio padrão tem início 125 minutos após o começo do incêndio real, o que nem sempre se verifica, pois a evolução dos incêndios reais varia consoante as características do compartimento. Por esta razão, a relação entre os momentos de início de cada incêndio indicada na figura 3.2, constitui apenas um dos exemplos possíveis.

Além da curva nominal definida na norma ISO 834, utilizada para simular incêndios em compartimentos de edifícios, existem outras, nomeadamente a curva de incêndio de hidrocarbonetos e a curva de incêndio para elementos exteriores, que se encontram definidas na parte 1.2 do Eurocódigo 1 [3.8]. A curva de hidrocarbonetos foi desenvolvida nos anos 70, especialmente para simular a evolução de incêndios em indústrias *offshore* e petroquímicas e apresenta, em todos os instantes, temperaturas superiores às do incêndio padrão da ISO 834. A curva de incêndio de elementos exteriores é a menos severa, caracterizando-se por valores de temperatura inferiores às duas anteriores.

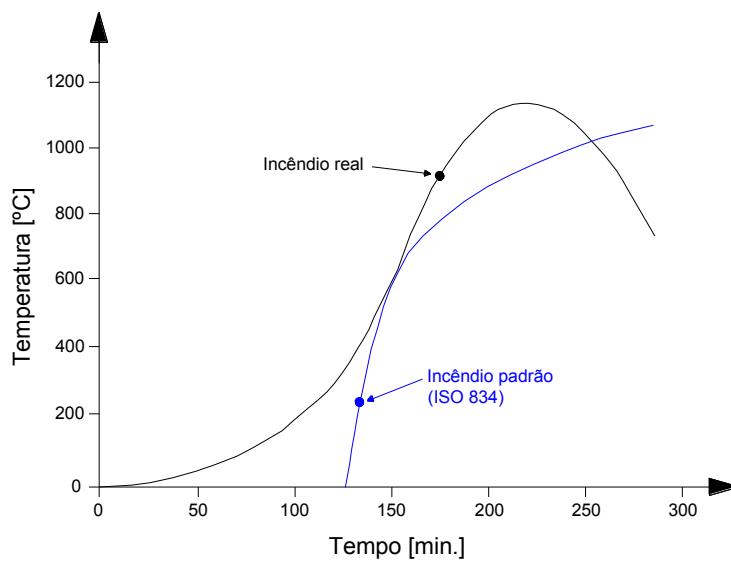


Figura 3.2. Curva de incêndio padrão segundo a norma ISO 834 e curva de incêndio real (adaptado de [3.9]).

As curvas de incêndio paramétricas, tal como as nominais, pretendem reproduzir a evolução da temperatura em função do tempo. No entanto, incluem a fase de arrefecimento e dependem de determinados aspectos, nomeadamente da densidade de carga do incêndio, das condições de arejamento e da área da superfície do compartimento do edifício em estudo. A densidade de carga relaciona-se com a quantidade de material combustível existente num compartimento, tendo uma importância fulcral no desenvolvimento do incêndio. Em termos regulamentares, estas curvas encontram-se definidas no anexo A da parte 1-2 do Eurocódigo 1 [3.8]. Refira-se que apesar de simularem a evolução das temperaturas de uma forma mais próxima da real do que as curvas nominais, as curvas paramétricas não são utilizadas em trabalhos de investigação devido à multiplicidade de curvas existentes (pois a sua definição depende das condições específicas de um dado compartimento).

3.4. Efeito da temperatura nas propriedades dos materiais

Um elemento de betão armado reforçado com materiais FRP é constituído pelos seguintes materiais: betão, aço em varão, compósito de FRP e adesivo de colagem. O efeito da temperatura nas propriedades de cada um destes materiais será apresentado nesta secção. Alguns deles são mais afectados por valores elevados de temperatura, nomeadamente o adesivo de colagem, em particular para temperaturas iguais ou superiores à que define o fenómeno da transição vítreia.

3.4.1. Betão

O efeito da temperatura nas propriedades do betão tem sido investigado intensivamente ao longo das últimas décadas. Bazant e Kaplan [3.10] dedicaram-se a reunir os resultados obtidos nas inúmeras investigações nesta área, tendo concluído que o efeito da temperatura nas propriedades do betão se relaciona, sobretudo, com a evaporação da água de constituição e com mudanças na composição química e estrutura física. Esse efeito é mais pronunciado na pasta de cimento, enquanto que nos

agregados as alterações registadas não são tão significativas. O aumento da temperatura neste material manifesta-se através dos seguintes fenómenos [3.10]:

- evaporação da água livre da pasta de cimento e dos agregados ($\pm 100^{\circ}\text{C}$);
- desidratação do cimento ($\pm 180^{\circ}\text{C}$);
- decomposição do hidróxido de cálcio ($\pm 500^{\circ}\text{C}$);
- decomposição do silicato de cálcio hidratado ($\pm 700^{\circ}\text{C}$);
- decomposição do carbonato de cálcio (em agregados calcários) com libertação de dióxido de carbono ($\pm 800^{\circ}\text{C}$);
- início da fusão da pasta de cimento e dos agregados (entre 1150°C e 1200°C).

A evaporação da água livre existente nos poros do betão pode contribuir para um aumento de pressão interior, originando fracturas e destacamentos ("spalling"). Este fenómeno ocorre em aquecimentos localizados quando a expansão térmica do betão aquecido está restrinida pelo betão circundante que apresenta uma temperatura inferior, resultando em elevadas tensões de compressão na zona aquecida.

3.4.1.1 Resistência à compressão

A figura 3.3 mostra o efeito da temperatura na resistência à compressão do betão de cimento de Portland com agregados siliciosos e calcários segundo a proposta da parte 1-2 do Eurocódigo 2 [3.11] e segundo Bazant e Kaplan [3.10], que reuniram os resultados obtidos em inúmeras investigações. Note-se que no documento normativo europeu é desprezada a influência da temperatura até 100°C . De acordo com Bazant e Kaplan, à temperatura de 90°C , a resistência do betão à compressão é reduzida para valores que representam 65% a 90% da resistência inicial. Esta redução é causada sobretudo pela evaporação da água livre, por microfissuração e pela perda de ligação entre a pasta de cimento e os agregados devido a coeficientes de dilatação térmica distintos.

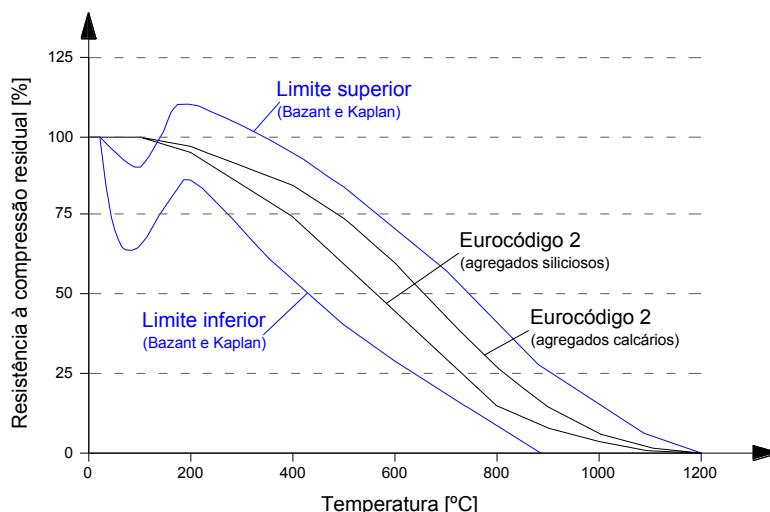


Figura 3.3. Influência da temperatura na resistência do betão à compressão (adaptado de [3.12]).

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Bazant e Kaplan [3.10], para temperaturas entre 100°C e 200°C é possível que se registe um acréscimo da resistência em determinados betões. Esta evolução

da resistência, contrária à proposta no Eurocódigo, pode estar relacionada com secagem rápida do betão e a consequentes alterações da sua estrutura porosa. Aos 200°C a resistência residual do betão varia entre 85% e 110% da resistência obtida à temperatura ambiente. Para valores de temperatura superiores, a resistência do betão à compressão diminui de uma forma quase linear, apresentando, segundo o Eurocódigo, resistência nula aos 1200°C.

3.4.1.2. Resistência à tracção

A resistência à tracção do betão é uma propriedade mais sensível ao aumento da temperatura do que a resistência à compressão. Por esta razão, a parte 1-2 do Eurocódigo 2 recomenda que esta seja desprezada. No entanto, caso seja necessário considerá-la, pode ser adoptada a evolução do seu valor com a temperatura tal como se indica na figura 3.4. Refira-se que até 100°C não é preconizada qualquer redução da capacidade resistente. Na mesma figura apresentam-se os limites superior e inferior de acordo com o trabalho desenvolvido por Bazant e Kaplan [3.10]. Pela observação destes limites conclui-se que a dispersão de resultados é consideravelmente superior à verificada na resistência à compressão. Este autores referem que em betões húmidos a perda de resistência à tracção apenas se faz sentir para valores de temperatura bastante elevados, pois existe bastante água para evaporar, enquanto que em betões “secos” essa diminuição é notória desde o início do processo de aquecimento.

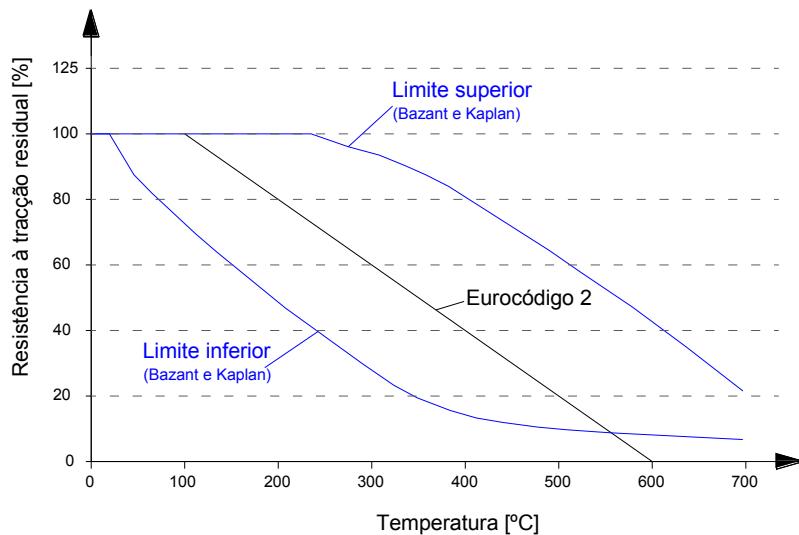


Figura 3.4. Influência da temperatura na resistência do betão à tracção (adaptado de [3.12]).

3.4.1.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do betão diminui com o aumento da temperatura devido à perda de ligação na microestrutura da pasta de cimento [3.10]. Além disso, observa-se uma perda aparente no módulo de elasticidade motivada por um aumento do efeito de fluência, que também é amplificado pelo aumento da temperatura. Bazant e Kaplan [3.10] concluíram que era bastante difícil fazer uma comparação adequada entre os resultados obtidos em diversas investigações, pois estes dependem de vários factores, nomeadamente da composição do betão, da sua humidade inicial, do carregamento e do fluxo de aquecimento. Na figura 3.5 apresenta-se a relação entre o módulo de elasticidade e a temperatura para betões com diferentes tipos de agregados, de acordo com Bazant e Kaplan [3.10]. Na mesma figura apresenta-se a variação proposta na parte 1-2 do Eurocódigo 2. Refira-se que neste documento europeu o módulo de elasticidade é calculado a partir dos valores de

tensão e extensão fornecidos para cada valor de temperatura. Por observação da figura 3.5 conclui-se que a redução no módulo de elasticidade proposta no Eurocódigo é significativamente superior aos resultados obtidos por Bazant e Kaplan. Esta diferença deve-se ao facto de no Eurocódigo ser considerado o aumento do efeito de fluência causado pela temperatura, resultando em valores inferiores do módulo de elasticidade [3.12].

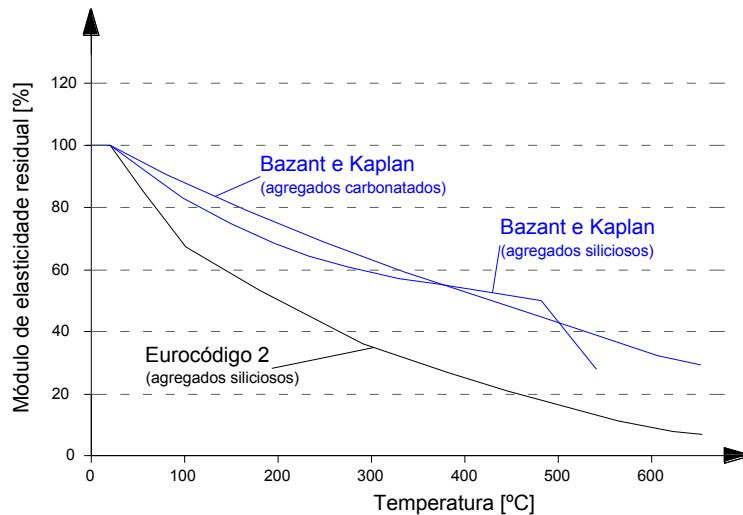


Figura 3.5. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do betão (adaptado de [3.12]).

3.4.1.4. Coeficiente de dilatação térmica

Os gradientes térmicos que um incêndio impõe numa peça de betão armado provocam restrições nas fibras desse elemento. A extensão que uma fibra sofre ao ser aquecida é restrinuida pelas fibras adjacentes que se encontram a temperaturas inferiores. É por isso importante conhecer a evolução do coeficiente de dilatação térmica do betão com a temperatura. Este depende do tipo de agregados utilizados no betão. Bazant e Kaplan [3.10] verificaram que o coeficiente de dilatação térmica é maior quanto mais elevada for a percentagem de sílica presente nos agregados. Até temperaturas de 100°C, este coeficiente pode ser considerado igual ao registado à temperatura ambiente, no entanto, para valores superiores de temperatura, regista-se um ligeiro aumento [3.10, 3.12]. O Eurocódigo 2 não fornece a evolução do valor do coeficiente de dilatação térmica. Em vez disso, indica directamente qual o valor da extensão térmica total a ser considerado. Na figura 3.6 apresentam-se os diagramas de extensão térmica total em função da temperatura para betões com agregados siliciosos e calcários.

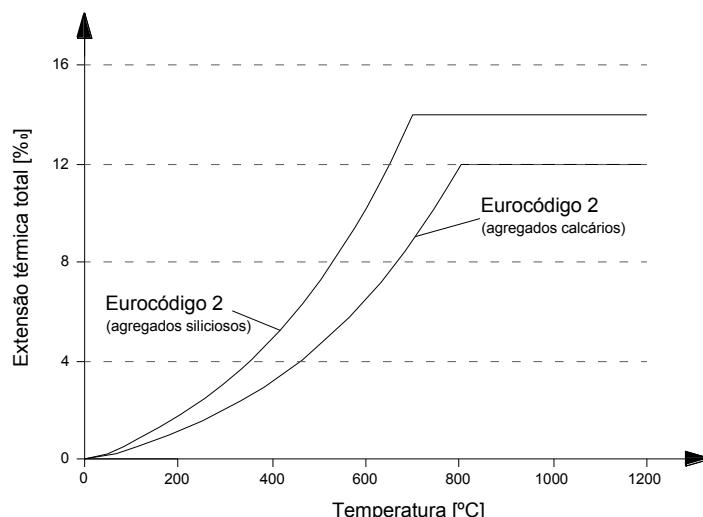


Figura 3.6. Extensão térmica total do betão segundo a parte 1-2 do Eurocódigo 2 [3.11].

3.4.2. Aço

A composição e o processo de fabrico dos aços têm grande influência no seu comportamento a temperaturas elevadas. No entanto, neste documento apenas será abordado o comportamento do aço laminado a quente, pois é o mais utilizado para armar peças de betão e foi o tipo de reforço interior utilizado nos ensaios experimentais.

3.4.2.1. Tensão de cedência

A temperaturas elevadas o patamar de cedência do aço deixa de existir para dar lugar a uma plastificação gradual. Desta forma, denomina-se por tensão de cedência aquela que corresponde a uma extensão de 0.2%. O valor dessa tensão é variável com a temperatura e depende do tipo de aço [3.13]. Além disso, aços com elevadas tensões de cedência à temperatura ambiente, são mais fortemente afectados pela temperatura (a diminuição da tensão de cedência com a temperatura é superior) do que aços com menor tensão de cedência inicial. Refira-se que após o arrefecimento do aço, o valor da tensão de cedência sofre um ligeiro incremento, no entanto, o valor inicial não volta a ser retomado [3.12]. Na figura 3.7 apresenta-se a redução da tensão de cedência com a temperatura em aço laminado a quente segundo as propostas da parte 1-2 do Eurocódigo 2 [3.11] e do CEB 208 [3.14]. Nessa figura observa-se que, de acordo com o Eurocódigo 2, a tensão de cedência apenas deve ser reduzida para temperaturas superiores a 400°C, enquanto que a proposta do CEB preconiza que essa redução deve ter início a 150°C. Em ambas as propostas conclui-se que para temperaturas de 600°C a tensão de cedência é inferior a metade do valor registado à temperatura ambiente.

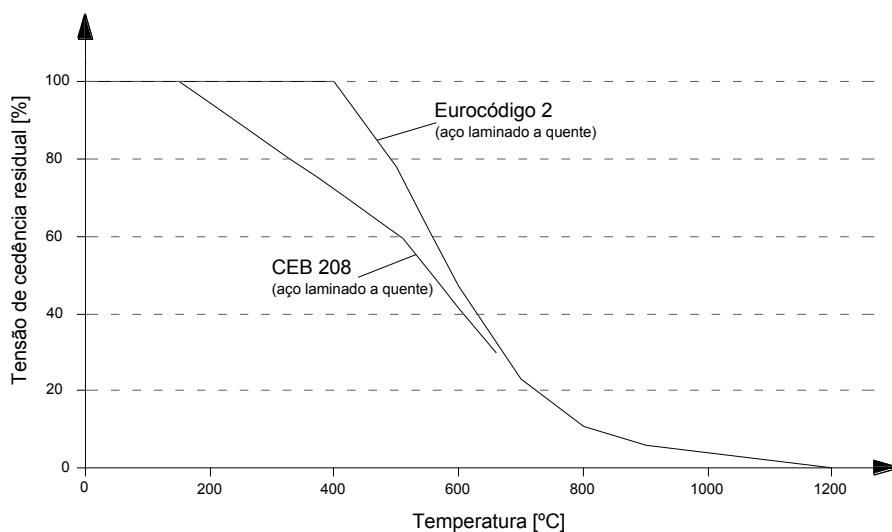


Figura 3.7. Influência da temperatura na tensão de cedência do aço laminado a quente (adaptado de [3.12]).

3.4.2.2. Módulo de elasticidade

A evolução do módulo de elasticidade com a temperatura do aço laminado a quente é semelhante à verificada para a tensão de cedência. No entanto, a sua redução inicia-se para valores de temperatura inferiores. A figura 3.8 ilustra a influência da temperatura no módulo de elasticidade segundo a proposta do Eurocódigo 2. De acordo com este documento normativo, para temperaturas de 600°C o valor do módulo de elasticidade representa 60% do correspondente à temperatura ambiente. No mesmo diagrama apresentam-se os limites superior e inferior para a evolução deste parâmetro, obtidos com base nas campanhas experimentais referenciadas no CEB 208 [3.14].

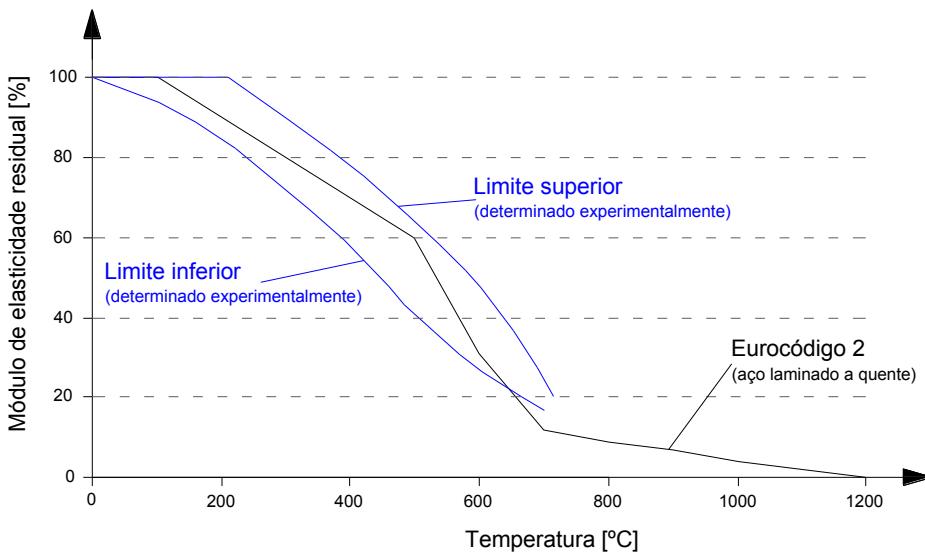


Figura 3.8. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do aço laminado a quente (adaptado de [3.12]).

3.4.2.3. Coeficiente de dilatação térmica

De acordo com o documento CEB 208 [3.14] o coeficiente de dilatação térmica do aço pode ser considerado igual ao do betão ($10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Esta simplificação pode ser considerada válida para betões correntes e até 400°C , apesar de, em certos casos, o coeficiente de dilatação do aço ser ligeiramente superior. Para temperaturas superiores a 400°C , o valor deste coeficiente aumenta mais rapidamente no betão.

Tal como sucede com o betão, o Eurocódigo 2 não fornece a evolução do valor do coeficiente de dilatação térmica. Em alternativa, indica directamente qual o valor da extensão térmica total a ser considerado para o aço. Na figura 3.9 apresenta-se o diagrama de extensão térmica total do aço em função da temperatura. Refira-se que entre 750°C e 860°C a extensão térmica é constante devido a mudanças na microestrutura do aço [3.15].

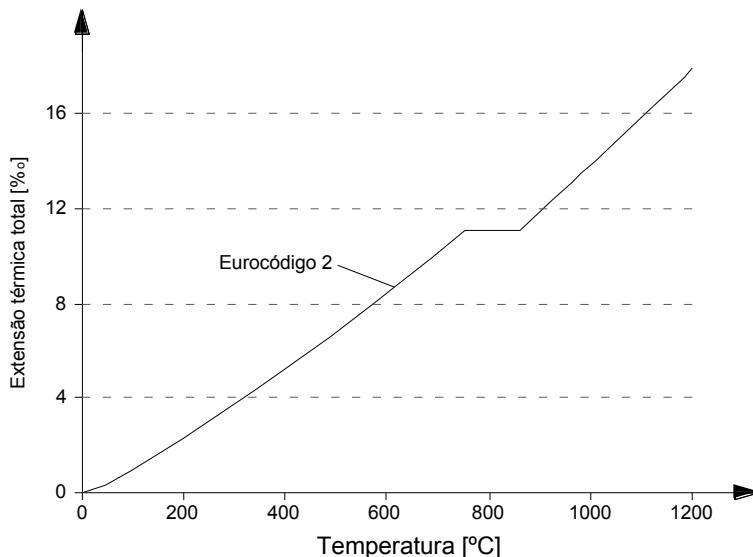


Figura 3.9. Extensão térmica total do aço segundo a parte 1-2 do Eurocódigo 2 [3.11].

3.4.3. Materiais FRP

Os materiais poliméricos reforçados com fibras são bastante sensíveis a temperaturas elevadas, e as suas propriedades físicas e mecânicas são mais fortemente afectadas do que as do aço e do betão. Além disso, o seu mecanismo de decomposição térmica apresenta algumas diferenças face aos outros dois materiais. Numa primeira fase, o fluxo de calor proveniente do fogo é transferido ao material FRP por radiação. Esta fase ocorre desde a temperatura ambiente até à temperatura para a qual se inicia a decomposição térmica do material. Embora neste período de aquecimento não se verifiquem reacções químicas no material compósito, este sofre algumas alterações, passando de um estado relativamente rígido e frágil para um estado viscoso e facilmente maleável. Este processo, que decorre para temperaturas entre aproximadamente 100°C e 200°C, denomina-se por transição vítreia. Na segunda fase, quando o material atinge temperaturas próximas de 200-300°C, iniciam-se reacções químicas que quebram cadeias poliméricas, originando gases voláteis e fumo. Alguns dos gases voláteis são inflamáveis, contribuindo para o aumento da temperatura do fogo e, consequentemente, para o processo de decomposição do próprio compósito [3.16, 3.17].

Apesar de o processo de decomposição térmica dos materiais compósitos se encontrar profundamente analisado na bibliografia internacional (nomeadamente na publicação de A. P. Mouritz e A. G. Gibson [3.17]), os estudos sobre os efeitos de temperaturas elevadas nas propriedades físicas e mecânicas dos FRP's utilizados na construção são limitados. Além disso, esses efeitos podem variar consoante os tipos de fibras e de matriz polimérica utilizados. Contudo, nos estudos efectuados conclui-se que as propriedades da matriz polimérica são especialmente afectadas pela temperatura, o que se repercutiu no desempenho do FRP. Nos pontos seguintes são analisados os efeitos da temperatura nas fibras e na matriz isoladamente e, por fim, nos FRP's, com especial destaque para os compósitos reforçados com fibras de carbono.

3.4.3.1. Resistência à tracção e módulo de elasticidade

a) Fibras

A figura 3.10, elaborada por Blontrock [3.18], que reuniu os resultados experimentais obtidos por diversos autores, ilustra a influência da temperatura na resistência à tracção das fibras de vidro, carbono e aramida. Rehm e Franke [3.19] e Sen *et. al* [3.20] investigaram o efeito da temperatura em fibras de vidro, enquanto que Rostásy [3.21] estudou o mesmo efeito em fibras de vidro, aramida e carbono.

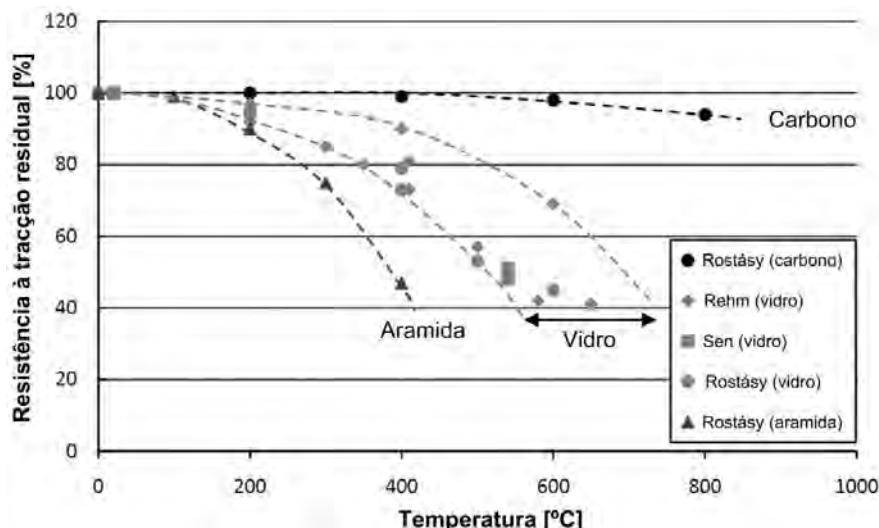


Figura 3.10. Influência da temperatura na resistência à tracção das fibras de vidro, carbono e aramida (adaptado de [3.18]).

Por observação da figura 3.10 conclui-se que a resistência à tracção das fibras de aramida é a mais afectada pelo aumento da temperatura, ficando reduzida a quase 50% a 400°C. As fibras de vidro sofrem uma redução semelhante, embora para temperaturas superiores às das fibras de aramida. Relativamente às fibras de carbono, conclui-se que a sua resistência à tracção é pouco afectada pelo aumento da temperatura. A 800°C a sua resistência à tracção é superior a 90% do valor apresentado à temperatura ambiente.

b) Matriz

Tal como referido no ponto 2.3.1.2., a matriz da maioria dos FRP's utilizados na construção é constituída por resinas termoendurecíveis, nomeadamente epoxídicas, de viniléster ou de poliéster. As propriedades mecânicas destas resinas sofrem alterações consideráveis quando a temperatura se aproxima do valor que define o fenómeno da transição vítreia (T_g). No ponto 2.3.1.2. foi ainda referido que diferentes resinas apresentam valores da temperatura de transição vítreia distintos, pelo que o efeito do aumento da temperatura também será distinto. Por esta razão, é impossível definir de uma forma geral qual a influência da temperatura nas propriedades da matriz. Nas figura 3.11 a) e b) ilustram-se, respectivamente, a redução percentual na resistência à tracção e no módulo de elasticidade da resina epóxida com a temperatura. Nestas figuras observa-se que ambas as grandezas apresentam uma redução acentuada para temperaturas próximas da temperatura de transição vítreia, que em resinas epoxidas geralmente varia entre 50°C e 80°C. Refira-se que cada um dos diagramas foi elaborado por diferentes autores e com base em resinas epoxidas distintas. Ainda assim, é possível concluir que o módulo de elasticidade apresenta uma redução mais brusca do que a resistência à tracção.

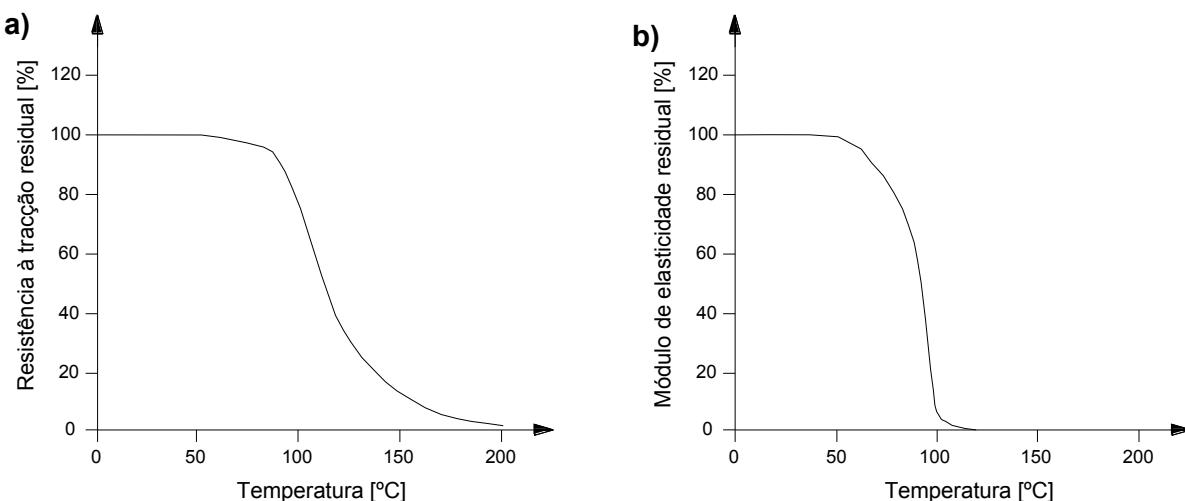


Figura 3.11. a) influência da temperatura na resistência à tracção da resina epóxida (adaptado de [3.22]);
b) influência da temperatura no módulo de elasticidade da resina epóxida (adaptado de [3.23]).

c) compósito de CFRP

O efeito da temperatura na resistência à tracção do compósito de CFRP está intrinsecamente relacionado com o comportamento dos seus principais materiais constituintes: fibras e matriz. Na figura 3.12 estão reunidos os resultados obtidos em diversas campanhas experimentais (Blonck [3.18] reuniu resultados obtidos por Kumahara *et al.* [3.24], Fujisaki e Tanano), bem como a relação proposta por Saafi [3.25] entre a resistência à tracção e a temperatura.

A figura 3.12 mostra que a resistência à tracção dos compósitos de CFRP diminui com o aumento da temperatura. Essa redução é mais significativa do que a verificada nas fibras de carbono isoladas (figura 3.10), devido à presença da matriz de resina epóxida, que é bastante mais sensível à temperatura. No entanto, observa-se que mesmo para valores superiores à temperatura de transição vítreia da matriz polimérica (tipicamente entre 50°C e 80°C) a redução da resistência não é elevada; em vários ensaios foram obtidas resistências a 150°C que representam cerca de 80% do valor registado à temperatura ambiente. Na figura 3.12 é ainda possível observar que, segundo a proposta de Saafi [3.25], a resistência deste tipo de compósitos permanece inalterada até 100°C.

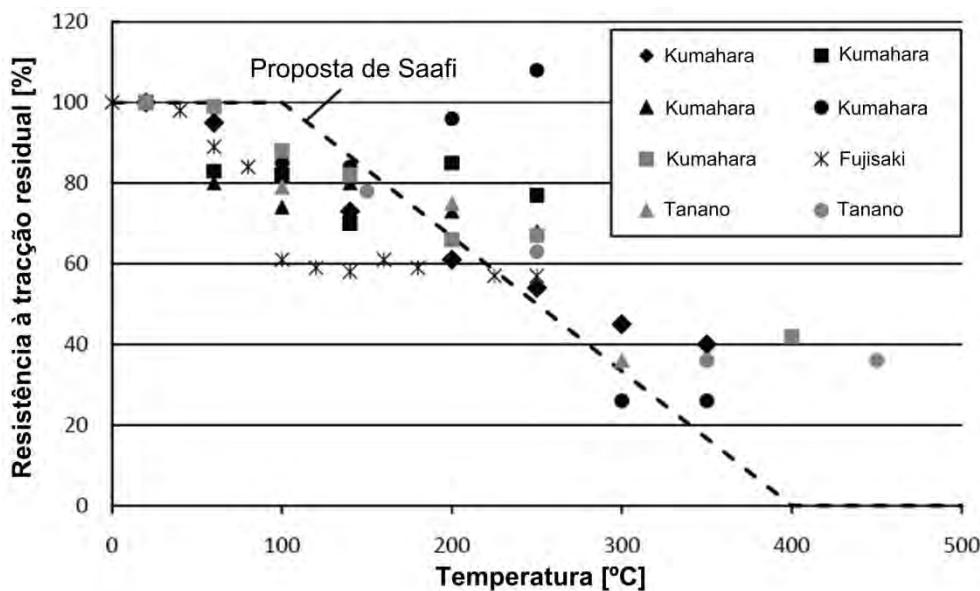


Figura 3.12. Influência da temperatura na resistência à tracção dos compósitos de CFRP (adaptado de [3.18]).

A figura 3.13 mostra que a evolução do módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP com a temperatura tem um andamento semelhante ao verificado para a resistência à tracção. No entanto, é notória uma menor redução das propriedades iniciais para a mesma temperatura. Esta conclusão pode ser comprovada pela observação das propostas de Saafi [3.25], onde para 300°C a resistência à tracção apresenta um valor inferior a 50% da resistência inicial, enquanto que para a mesma temperatura o módulo de elasticidade é superior a 60% do valor registado à temperatura ambiente. Ainda na mesma figura é possível observar que alguns dos resultados experimentais apresentaram uma tendência contrária à anteriormente descrita, pelo menos para certos intervalos de temperatura, em que o valor do módulo de elasticidade sofreu um aumento com a temperatura. Esta tendência poderá estar associada ao facto de as fibras de carbono apresentarem um coeficiente de dilatação térmica negativo na direcção longitudinal (deste modo, a extensão térmica associada a um aumento de temperatura será negativa) e, eventualmente, a uma maior dificuldade experimental em avaliar o módulo de elasticidade a temperaturas elevadas.

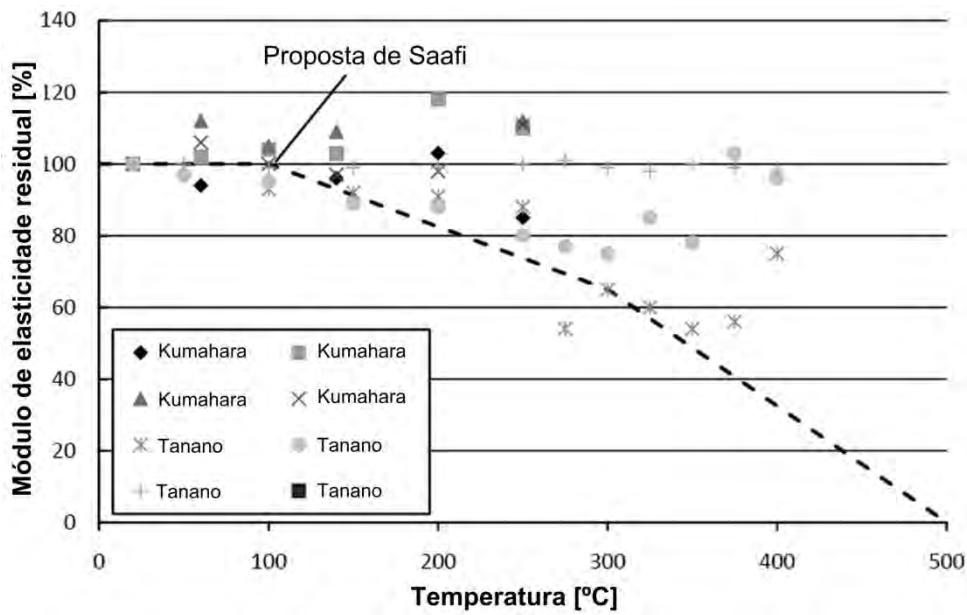


Figura 3.13. Influência da temperatura no módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP (adaptado de [3.18]).

3.4.3.2. Coeficiente de dilatação térmica

O número de investigações que estudaram a evolução do coeficiente de dilatação térmica com o aumento da temperatura de compósitos de FRP utilizados em construção ainda é bastante limitado. Em situação de incêndio, as variações de comprimento introduzidas no compósito devido ao aumento de temperatura são absorvidas pelo adesivo de colagem, que, geralmente, é mais suscetível à temperatura, sendo o primeiro material a iniciar o processo de transição vítreo. Desta forma, a extensão térmica do FRP não deverá gerar tensões assinaláveis na interface betão-adesivo para valores de temperatura superiores à da transição vítreo do adesivo. No entanto, para temperaturas inferiores a esta, a variação de comprimento do FRP por ação térmica é responsável pela introdução de tensões na ligação betão-adesivo. De forma a averiguar a importância deste fenómeno, Klamer [3.12] determinou experimentalmente o coeficiente de dilatação térmica de laminados de CFRP da marca *Sika* entre dois intervalos de temperatura: de 20°C a 40°C e de 20°C a 60°C. Este parâmetro foi determinado com base num ensaio denominado ESPI (*"Electronic Speckle Pattern Interferometry"*) que recorre a lasers e a uma câmara digital de alta resolução. Os resultados obtidos nesse estudo encontram-se na tabela 3.1. Tal como referido anteriormente, o coeficiente de dilatação térmica das fibras de carbono na direcção longitudinal apresenta um valor negativo. Este comportamento repercute-se no material compósito, tal como se observa na tabela 3.1. Refira-se que o coeficiente de dilatação térmica na direcção das fibras entre 20°C e 60°C é menos negativo do que o determinado entre 20°C e 40°C, pois no primeiro intervalo a matriz do material compósito poderá iniciar o processo de transição vítreo.

Tabela 3.1. Coeficientes de dilatação térmica de laminados de CFRP [3.12].

	De 20°C a 40°C	De 20°C a 60°C
Coeficiente de dilatação térmica na direcção das fibras [$\times 10^{-6} /{^\circ}\text{C}$]	-1.6	-0.3
Coeficiente de dilatação térmica na direcção perpendicular às fibras [$\times 10^{-6} /{^\circ}\text{C}$]	32	33

3.4.4. Adesivo de colagem

A maioria dos adesivos de colagem utilizados no reforço de estruturas de betão com FRP's pré-fabricados (laminados), são constituídos à base de resina epóxida (embora nalguns produtos a quantidade de fillers possa ser superior à da resina). Desta forma, é expectável que a evolução das suas propriedades seja semelhante à verificada na matriz dos FPR's. Para ilustrar esse comportamento recorreu-se aos resultados obtidos por Klamer [3.12], que realizou diversos ensaios a um adesivo epóxido da marca *Sika* com a referência *SikaDur-30*.

3.4.4.1. Resistência à tracção em flexão

Klamer [3.12] investigou o efeito da temperatura na resistência à tracção de adesivo epóxido através de ensaios à flexão de provetes com dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm. Esses ensaios decorreram entre temperaturas de -20°C e 80°C. Tal como se pode observar na figura 3.14, os valores negativos de temperatura não influenciaram significativamente a resistência à tracção, contrariamente ao que sucedeu para temperaturas moderadamente elevadas, em que a 80°C se verificou uma redução da resistência de 80%.

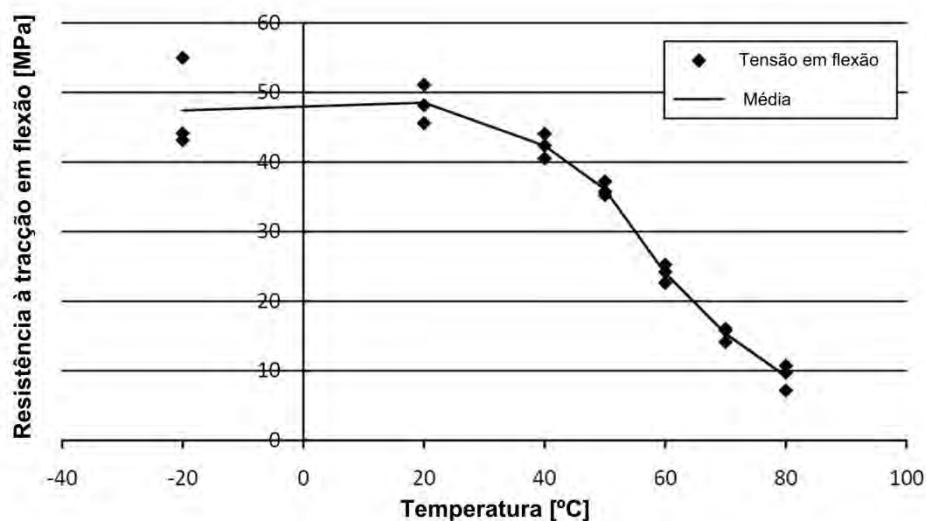


Figura 3.14. Influência da temperatura na resistência à tracção em flexão do adesivo epóxido *SikaDur 30* (adaptado de [3.12]).

3.4.4.2. Módulo de elasticidade

O efeito da temperatura no módulo de elasticidade do adesivo epóxido *SikaDur 30* foi igualmente estudado por Klamer [3.12] através de ensaios de compressão em provetes com dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm a várias temperaturas. Nestes ensaios também foi investigado o efeito de um ciclo de aquecimento-arrefecimento no módulo de elasticidade deste material. Para tal foram ensaiados provetes após 14 dias num ambiente com temperatura de 20°C e provetes que foram armazenados 10 dias a 20°C, seguidos de 2 dias a 80°C e, por fim, mais 2 dias a 20°C. A figura 3.15 ilustra os resultados obtidos para estes dois tipos de provetes.

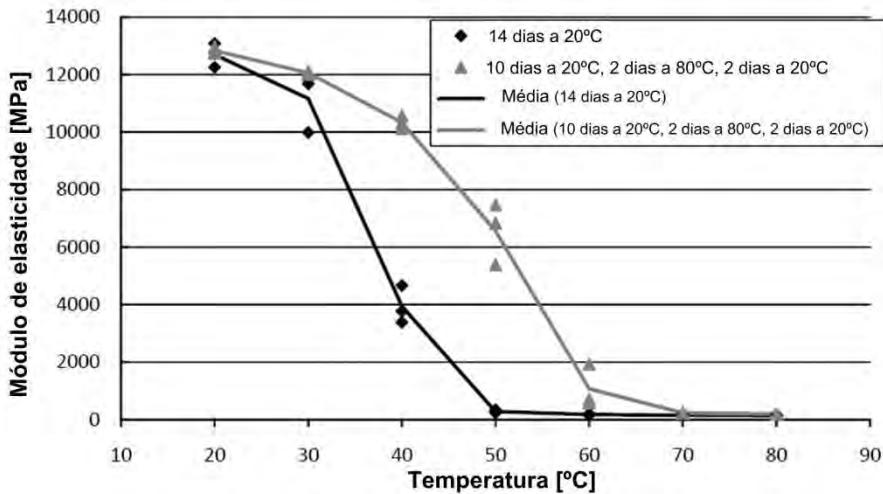


Figura 3.15. Influência da temperatura no módulo de elasticidade do adesivo epóxido *SikaDur 30* (adaptado de [3.12]).

Pela observação da figura anterior conclui-se que o módulo de elasticidade apresenta uma redução drástica devido ao aumento da temperatura. Além disso, observa-se que essa redução no módulo de elasticidade ocorreu a uma temperatura superior nos provetes que antes do ensaio estiveram armazenados 2 dias a 80°C e que esse procedimento não alterou o valor dessa grandeza à temperatura ambiente. Estes resultados parecem sugerir que a temperatura de transição vítreia pode ser aumentada através da aplicação de um ciclo de aquecimento-arrefecimento. De facto, este efeito de pós-cura também foi detectado na campanha experimental realizada por Leone *et al.* [3.26], onde a temperatura de transição vítreia de um adesivo epóxido aumentou de 62°C para 82°C após se ter sujeitado o material a um ciclo de aquecimento-arrefecimento entre -50°C e 200°C.

3.4.4.3. Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica do adesivo epóxido *SikaDur 30* foi determinado por Klamer [3.12] através do ensaio ESPI (“Electronic Speckle Pattern Interferometry”). Entre 20°C e 40°C foi obtido um coeficiente de dilatação térmica de $29 \times 10^{-6} /{^\circ}\text{C}$, enquanto que entre 20°C e 60°C foi obtido um valor de $45 \times 10^{-6} /{^\circ}\text{C}$. O facto de o último valor ser superior ao primeiro pode estar relacionado com alterações nas propriedades do adesivo para temperaturas próximas da temperatura de transição vítreia, que, para este adesivo, era aproximadamente 62°C.

3.5. Efeito da temperatura na ligação betão-CFRP

Neste ponto do documento será analisado o efeito da temperatura na ligação betão-CFRP, nomeadamente na distribuição das tensões de corte e normais à superfície do reforço próximas da zona de extremidade.

Na figura 3.16 a) apresenta-se uma viga de betão armado reforçada à flexão com um laminado de CFRP, na qual estão aplicadas duas cargas concentradas (num esquema semelhante ao que foi utilizado no programa experimental). Nas figuras 3.16 b) e c) ilustram-se, respectivamente, as distribuições das tensões de corte na interface betão-CFRP e normais (de tracção) no laminado devido ao carregamento indicado, à temperatura ambiente. Refira-se que na extremidade do reforço

ocorrem dois fenómenos devido à interrupção brusca do mesmo. Por um lado, a interrupção provoca uma concentração de tensões de corte devido à necessidade de “amarrai” a força na extremidade do compósito (figura 3.16 b). Por outro lado, as tensões axiais no compósito têm a resultante no centro de gravidade do mesmo e não junto ao betão, fazendo com que surjam esforços de flexão, que vão provocar tensões normais à superfície de colagem entre o compósito e o betão (figura 3.16 d), que, embora inferiores às tensões de corte, podem levar ao destacamento prematuro do compósito (efeito de “peeling”) [3.27].

Tal como referido nos pontos 3.4.3 e 3.4.4, as propriedades dos materiais que constituem o sistema de reforço são bastante afectadas pelo aumento da temperatura. No entanto, o adesivo de colagem é o material mais afectado pela temperatura, sobretudo para valores iguais ou superiores à temperatura de transição vítreia. Dado que o adesivo de colagem é o responsável pela transferência de tensões entre o compósito de FRP e o betão, é expectável que o diagrama apresentado na figura 3.16 b) sofra alterações com o aumento da temperatura. Diversos investigadores estudaram este problema, de entre os quais Al-Mahaidi *et al.* [3.28] que, nas campanhas experimentais realizadas, avaliaram o efeito da temperatura no valor da máxima tensão de corte atingida da interface betão-CFRP. Na figura 3.17 a) apresentam-se os resultados obtidos por estes autores através de um gráfico que descreve a influência da temperatura no valor máximo da tensão de corte. Nessa figura observa-se uma diminuição drástica no valor da tensão de corte máxima a partir de 50°C, que coincide com a temperatura de transição vítreia do adesivo epóxido utilizado. Leone *et al.* [3.26] concluíram igualmente que o aumento da temperatura tem como consequência uma diminuição na tensão de corte máxima na ligação betão-CFRP, sobretudo devido à diminuição do módulo de elasticidade do adesivo de colagem.

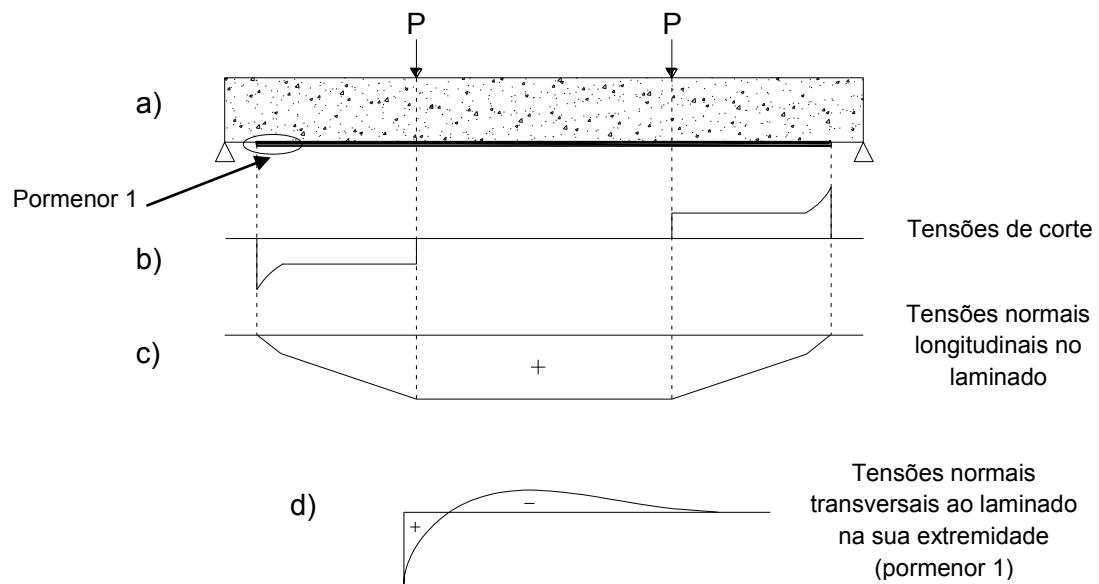


Figura 3.16. a) esquema de uma viga reforçada à flexão com um laminado de CFRP; b) distribuição das tensões de corte na interface betão-CFRP à temperatura ambiente; c) distribuição das tensões normais no laminado à temperatura ambiente; d) pormenor das tensões normais ao laminado na zona de extremidade à temperatura ambiente (adaptado de [3.27]).

Na figura 3.17 b) apresenta-se um gráfico obtido por Leone *et al.* [3.26] com o valor da tensão de corte na ligação betão-CFRP em função do escorregamento entre estes dois materiais para vários valores de temperatura. Nessa figura é possível observar que para a temperatura ambiente ($T=20^{\circ}\text{C}$) a tensão máxima de corte é atingida quando se verifica um deslocamento relativo entre os materiais de aproximadamente 0.1 mm. Para as temperaturas de 50°C e 80°C a evolução da tensão de corte com o escorregimento relativo é semelhante, no entanto, as tensões máximas atingidas são consideravelmente inferiores. Refira-se que o adesivo de colagem utilizado nesses ensaios tinha uma

temperatura de transição vítreia de 55°C, pelo que a figura 3.17 b) permite concluir que é possível tirar partido do reforço de CFRP para temperaturas superiores à temperatura de transição vítreia do adesivo.

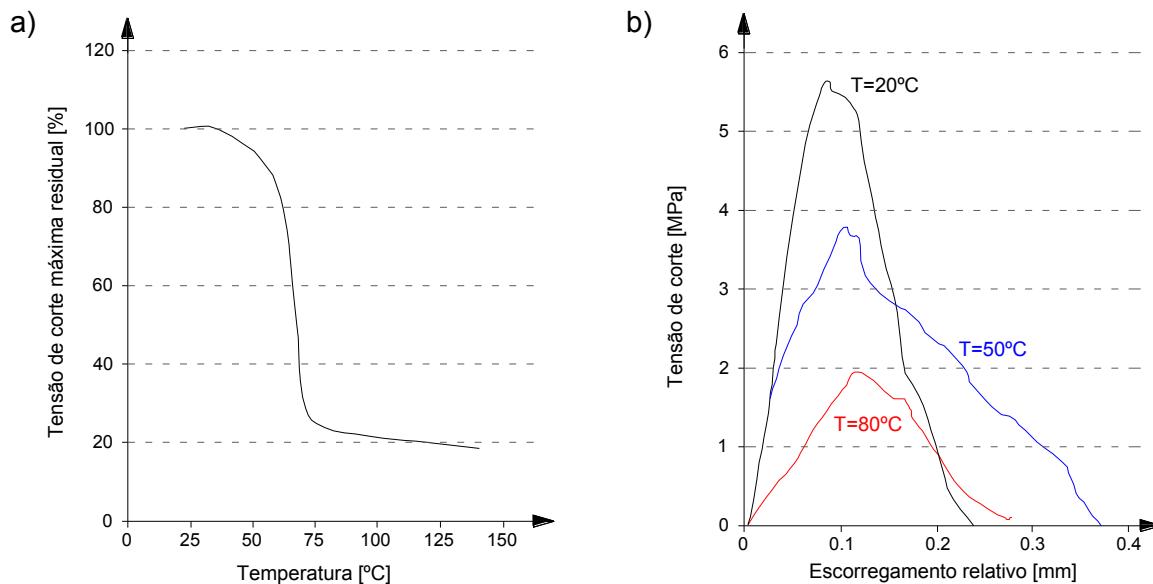


Figura 3.17. a) influência da temperatura na tensão de corte máxima (adaptado de [3.28]); b) diagrama tensão de corte-escorregimento para várias temperaturas (adaptado de [3.26]).

Os resultados obtidos pelos referidos investigadores permitiram concluir que a máxima tensão de corte na ligação betão-CFRP apresenta uma redução significativa com a temperatura. Desta forma, com o aumento da temperatura, a concentração de tensões de corte na extremidade do laminado (figura 3.16 b) tem tendência a diminuir, verificando-se uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo do comprimento de amarração. Esta nova distribuição de tensões poderá ter influência no modo e na própria carga de rotura do reforço. De facto, Blontrock *et al.* [3.29] e Klammer *et al.* [3.30] verificaram que esta uniformização das tensões devido ao aumento da temperatura (até valores próximos da T_g do adesivo) contribuiu para um aumento da resistência última do reforço. Estes autores concluíram que este fenómeno foi motivado pela diminuição do módulo de elasticidade do adesivo, o que, além de contribuir para a referida uniformização das tensões de corte, teve como consequência a diminuição da tensão normal do laminado e um aumento das tensões actuantes no betão. Esta conjugação de efeitos conduziu a um aumento da capacidade resistente da estrutura. No entanto, esta situação apenas foi verificada para temperaturas próximas da temperatura de transição vítreia do adesivo de colagem; para temperaturas superiores as propriedades desse material degradam-se de uma forma mais acentuada, pelo que a uniformização das tensões de corte já não conduz a um aumento da capacidade resistente do reforço.

Nos parágrafos anteriores foi realizada a análise do efeito da temperatura da ligação betão-CFRP com recurso a resultados obtidos em campanhas experimentais onde a temperatura máxima atingida no adesivo de colagem foi de aproximadamente 100°C. Tal como referido no ponto 3.3.1, as temperaturas num incêndio atingem valores bastante superiores ao fim de poucos minutos, pelo que as análises efectuadas apenas são válidas num período de tempo bastante limitado. Assim, caso o sistema de reforço esteja completamente exposto à acção do fogo, as elevadas temperaturas atingidas na interface betão-CFRP destroem por completo as propriedades adesivas do material de colagem, ou seja, o sistema de reforço deixa de contribuir para a resistência estrutural do elemento em causa. Assim, a solução óbvia para prolongar a contribuição estrutural do reforço é impedir que a temperatura na interface betão-CFRP atinja valores que destruam por completo a adesão do sistema de reforço, o que pode ser conseguido com a aplicação de sistemas de protecção ao fogo. Estes sistemas são apresentados no ponto seguinte.

3.6. Sistemas de protecção ao fogo

Como já foi referido, os materiais que constituem os sistemas de reforço com FRP's apresentam uma elevada susceptibilidade a temperaturas elevadas. As suas propriedades mecânicas sofrem uma redução significativa, principalmente para temperaturas superiores ao valor que define o fenómeno de transição vítreia, conduzindo ao colapso do sistema de reforço, que por sua vez poderá resultar na rotura do próprio elemento estrutural. Por estas razões, a adopção de sistemas de protecção que permitam prolongar o período de funcionamento do reforço durante um incêndio (ou até mesmo evitar a sua rotura) é uma medida de extrema importância. Em edifícios podem utilizar-se dois tipos de sistemas de protecção, activos ou passivos.

Os sistemas activos de protecção ao fogo requerem a intervenção humana ou de um mecanismo automatizado que responda aos fenómenos causados por um incêndio. Estes sistemas têm a função de extinguir o fogo, dissipar o calor e ajudar os ocupantes a evacuarem o edifício em segurança. As medidas activas de segurança ao fogo não se referem apenas aos equipamentos de ventilação e extinção de fogo, mas também aos sistemas de alarme e a sinalização luminosa de emergência. Um dos sistemas activos de protecção ao fogo mais utilizados em edifícios é o sistema de aspersão (*sprinklers*). Este sistema é constituído por pequenas saídas de rega controladas por um sistema de detecção de fogo, que lançam água ou outro produto que permite a extinção da chama. Um outro sistema activo bastante eficaz consiste na refrigeração com água através de um circuito de circulação interno que apenas é activado em situação de incêndio. Este último sistema é utilizado, sobretudo, em estruturas metálicas ou de material compósito de secção fechada [3.16].

Os sistemas passivos de segurança ao fogo não requerem a intervenção humana ou uma resposta automatizada. Este tipo de protecção destina-se principalmente à prevenção da ignição do material ao fogo, limitando o desenvolvimento do fogo, garantindo o menor impacto possível na estrutura, mediante a redução do calor, fumo e gases tóxicos que o material liberta. Normalmente, uma protecção passiva baseia-se na criação de compartimentos anti-fogo e no isolamento dos elementos estruturais, evitando a propagação do fogo a todo o edifício e o colapso da estrutura [3.16].

Estes dois tipos de sistemas não competem entre si e podem ser utilizados de uma forma complementar. No entanto, num caso real apenas alguns elementos da estrutura de um edifício necessitam de ser reforçados com materiais FRP's, pelo que, os sistemas passivos constituem a solução mais adequada e eficaz, pois, geralmente, a aplicação de sistemas activos estende-se a todo o edifício. Por esta razão, no presente documento só serão abordados sistemas passivos, nomeadamente a adopção de materiais que quando aplicados à superfície dos elementos estruturais os protegem da acção directa do fogo. Estes materiais devem possuir reduzido peso volúmico, de forma a não representarem um acréscimo de carga significativo no elemento, baixa condutibilidade térmica e elevado calor específico.

Os sistemas que se apresentam nos pontos seguintes são normalmente utilizados para protecção de estruturas metálicas, dado que estas também são bastante sensíveis ao aumento da temperatura.

3.6.1. Sistemas passivos

3.6.1.1. Revestimentos intumescentes

Os revestimentos intumescentes têm sido utilizados como sistema de protecção ao fogo de estruturas metálicas nas últimas décadas, conferindo-lhes um tempo de protecção que pode variar entre 30 min e 120 min. São formulados com uma série de componentes activos que, sob a acção de um incêndio,

reagem quimicamente entre si formando uma espuma carbonosa, originando um aumento de volume entre 40 a 50 vezes (figura 3.18), comportando-se como uma camada protectora que reduz o aumento da temperatura do elemento onde estão aplicadas. Usualmente são fornecidos em forma líquida, podendo ser aplicados como tinta ou em *spray* (pulverização) numa película até 5 mm; mas também podem ser aplicados em forma de mantas. No entanto, os revestimentos intumescentes apresentam como principal característica a expansão do seu volume para intervalos de temperatura entre 100°C e 300°C, o que praticamente inviabiliza a sua utilização em estruturas reforçadas com sistemas FRP's, pois a maioria dos adesivos de colagem apresenta uma temperatura de transição vítreia entre 50°C e 80°C [3.16, 3.31].



Figura 3.18. a) aspecto inicial de tubos metálicos protegidos com tinta intumescente; b) acção do fogo nos tubos metálicos; c) aspecto final da tinta intumescente após a acção do fogo [3.31].

3.6.1.2. Revestimentos à base de vermiculite e perlite

A vermiculite é uma rocha vulcânica constituída por finas lâminas separadas por partículas de água microscópica (água de constituição). A partir deste material são elaboradas argamassas que geralmente são aplicadas por projecção (figura 3.19 a) ou espalhamento, embora a primeira técnica garanta melhores características de aderência ao substrato. Apesar de pouco comum, também é possível a elaboração de placas de vermiculite (figura 3.19 b). Numa primeira fase de exposição ao incêndio, a protecção deste material é conferida pela evaporação da água livre presente na argamassa, que é uma reacção endotérmica. Após este fenómeno, para temperaturas entre 700°C e 1000°C, a água de constituição é transformada em vapor através de reacções endotérmicas que separam as lâminas de vermiculite, causando a expansão do material até 30 vezes o seu volume inicial num processo denominado por "esfoliação". Após a evaporação de toda a água de constituição, a protecção é conferida pelas propriedades de isolamento intrínsecas à própria argamassa [3.16]. As argamassas à base de vermiculite apresentam as seguintes propriedades iniciais: massa volúmica entre 300 kg/m³ e 900 kg/m³; calor específico aproximado de 920 J/(kg°C); e condutibilidade térmica entre 0.06 W/(m°C) e 0.17 W/(m°C) [3.32].

A perlite é uma rocha siliciosa amorfa que incorpora na sua constituição uma quantidade considerável de água (2 a 6%) e que pode ser utilizada para produzir argamassas de protecção ao fogo. O seu comportamento é bastante semelhante ao da vermiculite. Quando atinge temperaturas elevadas, da ordem de 850°C a 900°C, a água de constituição evapora, provocando a expansão do material até 20 vezes o volume inicial. A perlite pode ser misturada com a vermiculite para produzir argamassas de protecção ao fogo, que geralmente também são aplicadas por projecção (figura 3.19 c) [3.16]. As argamassas à base de perlite apresentam as seguintes propriedades iniciais: massa volúmica entre 300 kg/m³ e 500 kg/m³; calor específico aproximado de 700 J/(kg°C); e condutibilidade térmica entre 0.06 W/(m°C) e 0.17 W/(m°C) [3.32].

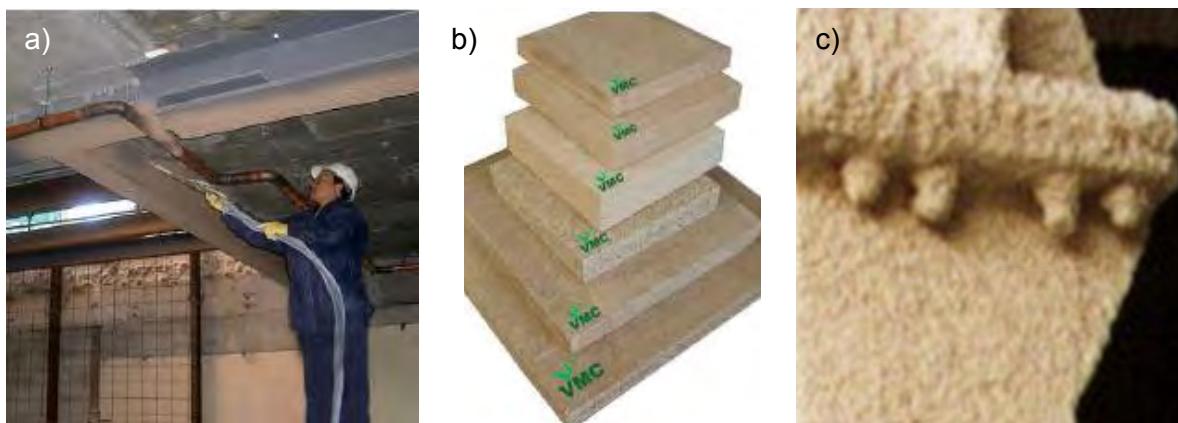


Figura 3.19. a) projecção de argamassa de vermiculite para protecção de perfis metálicos [3.31]; b) placas de vermiculite [3.31]; c) estrutura metálica protegida com argamassa projectada de vermicute e perlite [3.33].

3.6.1.3. Placas de gesso

O gesso é constituído essencialmente por sulfato de cálcio hidratado, que, no estado seco, contém cerca de 20% de água cristalizada. Devido à sua facilidade em absorver água, mantém a humidade do ar em áreas fechadas, além de apresentar bom isolamento térmico e um considerável isolamento acústico. Geralmente, é aplicado em placas pré-fabricadas, mas também existe a possibilidade de ser aplicado directamente na superfície do elemento a proteger por espatulamento. Devem ser adicionadas fibras ou outro material que melhore o seu fraco desempenho mecânico, que originalmente se caracteriza por ser bastante frágil e com uma capacidade de deformação quase nula. Este comportamento mecânico pode inviabilizar a sua utilização em elementos estruturais que apresentem grandes variações de deslocamentos [3.31].

Quando as placas de gesso são aquecidas, ocorrem duas reacções de desidratação: a primeira, para temperaturas entre 100°C e 120°C, com o sulfato de cálcio di-hidratado a ser convertido em sulfato de cálcio hemi-hidratado; e a segunda, entre 210°C e 300°C, em que o sulfato de cálcio hemi-hidratado é transformado em sulfato de cálcio anidro. Estas reacções de carácter endotérmico utilizam a energia transmitida pelo incêndio e impedem o aumento de temperatura do elemento estrutural onde está aplicado o gesso [3.16]. Refira-se que após estas reacções as propriedades mecânicas do gesso sofrem uma degradação assinalável, pelo que a incorporação de fibras que melhorem esse comportamento é essencial para garantir a sua integridade.

Geralmente, os sistemas de protecção ao fogo com placas de gesso recorrem a fixações mecânicas (aparafusamento ou sistema semelhante) que garantem o seu correcto posicionamento em relação aos elementos estruturais. Estes dispositivos de fixação deverão apresentar elevada resistência ao incêndio, pois a sua rotura poderia comprometer a eficácia de todo o sistema. As propriedades iniciais do gesso são as seguintes: massa volúmica 800 kg/m³; calor específico aproximado de 1700 J/(kg°C); e condutibilidade térmica entre 0.19 W/(m°C) e 0.24 W/(m°C) [3.32].

3.6.1.4. Placas de silicato de cálcio

À semelhança das placas de gesso, as placas de silicato de cálcio são aplicadas nos elementos a proteger através de dispositivos de fixação mecânica. Apresentam um custo mais elevado e propriedades isolantes inferiores às placas de gesso. No entanto, a sua resistência mecânica é

superior. Normalmente, são submetidas a autoclave e reforçadas com fibras, o que incrementa a sua estabilidade dimensional quando sujeitas a temperaturas elevadas.

A protecção ao fogo conferida pelas placas de silicato de cálcio, que tipicamente incorporam 3 a 5% de água, deve-se à sua capacidade de isolamento térmico, mas também a uma série de reacções endotérmicas que ocorrem em vários intervalos de temperaturas. Numa primeira fase, quando se atinge 100°C, ocorre a evaporação de água livre; seguidamente, entre 100°C e 400°C, dá-se a desidratação do silicato de cálcio; entre 400°C e 600°C ocorrem as reacções de desidratação do hidróxido de cálcio; e, finalmente, para temperaturas entre 600°C e 1000°C, ocorre a descarbonização do carbonato de cálcio. Inicialmente, a massa volúmica das placas de silicato de cálcio é cerca de 800 kg/m³, a condutibilidade térmica é de 0.16 W/m°C e o calor específico é cerca de 690 J/(kg°C) [3.33].

3.6.1.5. Projecção de fibras minerais

As fibras minerais podem ser utilizadas como principal constituinte de argamassas para protecção de elementos estruturais ao fogo. As fibras são normalmente obtidas a partir de rocha basáltica, sendo corrente a junção de escória de alto-forno (20 a 30% do peso total) com o objectivo de diminuir a massa volúmica da argamassa. A protecção é conferida pelas propriedades isolantes das próprias fibras, pois, ao contrário dos materiais referidos nos pontos anteriores, a quantidade de água de constituição das fibras projectadas é praticamente desprezável no comportamento deste isolamento a temperaturas elevadas [3.31]. A mistura de fibras com escória de alto-forno é habitualmente aplicada por projecção a baixa pressão. Este método é rápido, apresenta custos reduzidos e permite proteger elementos com geometria irregular. No entanto, produz uma quantidade assinalável de desperdícios e sujidade e a superfície de acabamento é irregular. As propriedades iniciais das argamassas de fibras minerais são: massa volúmica entre 180 kg/m³ e 350 kg/m³; calor específico aproximado de 1000 J/(kg°C); e condutibilidade térmica entre 0.08 W/(m°C) e 0.10 W/(m°C) [3.32].

Na figura 3.20 ilustra-se a aplicação de fibras minerais por projecção num pavimento metálico.



Figura 3.20. Projecção de fibras minerais num pavimento metálico [3.31].

3.6.1.6. Mantas de fibras cerâmicas e placas de lã de rocha

As mantas de fibras cerâmicas são constituídas por fibras de sílica e alumina entrelaçadas e dispostas em múltiplas direcções, o que lhes garante flexibilidade e boa resistência mecânica. Tal como as fibras minerais, conferem protecção ao fogo através das propriedades isolantes das fibras. São incombustíveis mas não resistem a temperaturas superiores a 1300°C. Usualmente, são fabricadas em espessuras de 10 mm a 50 mm, e envolvem os elementos estruturais com recurso a

sistemas de fixação mecânica. Além disso, deve ser aplicado um acabamento superficial sobre as mantas, já que estas sofrem uma degradação acentuada na presença de humidade. O seu peso volúmico varia entre 64 kg/m^3 e 192 kg/m^3 , o calor específico é aproximadamente 1000 J/(kg°C) e a condutibilidade térmica varia entre 0.10 W/(m°C) e 0.25 W/(m°C) [3.32]. Nas figura 3.21 a) e b) apresentam-se um rolo de manta de fibras cerâmicas e um perfil metálico protegido com esse material, respectivamente.

As fibras que constituem as placas de lã de rocha (figura 3.21 c) são produzidas a partir de rocha basáltica, encontram-se dispostas de forma aleatória e são aglomeradas por resinas termoendurecíveis. Tal como as mantas de fibras cerâmicas, são aplicadas aos elementos estruturais através de sistemas de fixação mecânica. Os valores médios da massa volúmica, condutibilidade térmica e calor específico são, respectivamente, 300 kg/m^3 , 0.12 W/(m°C) e 1200 J/(kg°C) [3.34].



Figura 3.21. a) rolo de manta de fibras cerâmicas; b) perfil metálico envolvido com mantas cerâmicas; c) placas de lã de rocha [3.35].

3.7. Estudos experimentais sobre estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP a temperaturas elevadas

O comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP a temperaturas elevadas tem sido estudado por diversos investigadores em todo o mundo com recurso a ensaios de resistência ao fogo. Neste ponto do documento são apresentados os resultados obtidos nos principais ensaios experimentais realizados em vigas e lajes reforçadas à flexão e em pilares. É dada especial atenção aos resultados obtidos em vigas reforçadas à flexão, pois o objectivo principal desta dissertação é estudar o comportamento ao fogo deste tipo de elementos estruturais.

3.7.1. Vigas reforçadas à flexão

Williams *et al.* [3.36] sujeitaram vigas de betão armado reforçadas à flexão com CFRP ao incêndio padrão presente na norma ASTM E119 [3.37]. Refira-se que a evolução das temperaturas neste incêndio padrão é bastante semelhante à verificada no incêndio definido na norma ISO 834 [3.7]. Foram construídas duas vigas de secção em T à escala real (figura 3.22 a) com o objectivo de simular uma configuração correntemente utilizada em edifícios. O comprimento total das vigas era de 3.90 m e estas encontravam-se simplesmente apoiaadas nas extremidades, nas quais os deslocamentos axiais estavam impedidos. Em cada uma das vigas foi utilizado um laminado de CFRP com 100 mm de largura e 1 mm de espessura, resultando num aumento de 15% do momento resistente. Nas extremidades dos laminados, foram colocadas duas camadas de mantas de GFRP em forma de U, funcionando como ancoragens passivas que impediram o descolamento prematuro do reforço. Ao longo de todo o comprimento das vigas foi aplicado um sistema de protecção ao fogo da marca Fyfe [3.38], composto por uma camada de argamassa leve projectada de vermiculite e

gesso (*Tyfo VG* [3.39]) com espessuras de 25 mm e 38 mm respectivamente em cada uma das vigas, sobre a qual foi aplicada uma película especial de tinta intumescente com 0.1 mm de espessura, denominada *Tyfo EI-R* [3.40]. Na figura 3.22 a) apresenta-se a configuração deste sistema de protecção. Algumas propriedades aproximadas da argamassa leve à temperatura ambiente estão presentes na tabela 3.2 e os detalhes das vigas ensaiadas são indicados na tabela 3.3.

Tabela 3.2. Propriedades aproximadas da argamassa leve *Tyfo VG* à temperatura ambiente (adaptado de [3.36]).

Massa volémica [kg/m ³]	Resistência à compressão [kPa]	Tensão de aderência [kPa]	Condutibilidade térmica [W/(m°C)]	Calor específico [J/(kg°C)]
240 a 272	112	18.6	0.0815	1047

Tabela 3.3. Características do reforço e da protecção ao fogo das vigas ensaiadas (adaptado de [3.36]).

Designação da viga	Reforço		Espessura do isolamento [mm]	
	CFRP (flexão)	GFRP (ancoragem)	Tyfo VG	Tyfo EI-R
Viga 1	1 laminado de secção 100 mm x 1 mm	2 camadas de manta em U com 600 mm de largura	25	0.1
Viga 2	1 laminado de secção 100 mm x 1 mm	2 camadas de manta em U com 600 mm de largura	38	0.1

As vigas foram ensaiadas em simultâneo, sendo submetidas ao incêndio padrão na sua face inferior, enquanto que a face superior se encontrava exposta à temperatura ambiente. Durante o ensaio, com recurso a 30 macacos hidráulicos, foi aplicada uma carga uniformemente distribuída simulando as condições de serviço regulamentares presentes no documento CAN/ULC S101-89 [3.41], correspondendo a cerca de 48% da carga de colapso. No que diz respeito à instrumentação, foram colocados 36 termopares, distribuídos em 3 secções distintas de cada uma das vigas, destacando-se o posicionamento no interior do betão, nas armaduras longitudinais, na face exposta à temperatura ambiente e nas interfaces betão-CFRP e CFRP-isolamento. Na figura 3.22 b) apresenta-se a localização dos termopares na secção de meio vão. Foram ainda colocados 6 extensómetros, resistentes a altas temperaturas, nas armaduras longitudinais em duas secções distintas. Os deslocamentos verticais foram medidos em 4 pontos ao longo da face superior das vigas.

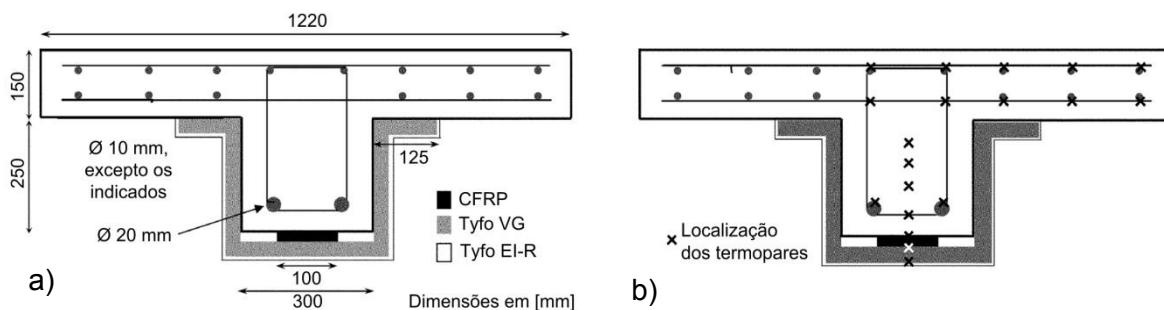


Figura 3.22. a) secção transversal das vigas (adaptado de [3.36]); b) localização dos termopares na secção central das vigas (adaptado de [3.36]).

Decorridas as 4 horas em que as vigas estiveram expostas ao incêndio padrão destaca-se o facto de nenhuma delas ter atingido a rotura. Na viga em que se utilizou o sistema de protecção de 25 mm de espessura (viga 1), a resina de colagem do laminado de CFRP atingiu a temperatura de transição vítreia (que os autores indicam ser de 93 °C) após 16 a 36 minutos do início do ensaio, dependendo da secção de leitura. Com o sistema de protecção de 38 mm de espessura (viga 2), a mesma temperatura foi excedida entre 55 e 57 minutos de ensaio. A temperatura máxima atingida na viga 1 ao nível da resina de colagem foi de 434 °C, sendo inferior à sua temperatura de decomposição (aproximadamente 450 °C), enquanto que na viga 2 a temperatura máxima foi de 290 °C. De assinalar

que em ambas as vigas o aumento de temperatura da face exposta à temperatura ambiente foi inferior a 140°C, e que a temperatura máxima atingida ao nível das armaduras não ultrapassou o valor de 593 C, sendo, portanto, respeitadas as exigências da norma ASTM E119 [3.37], utilizada como referência nesse estudo.

Relativamente aos deslocamentos a meio vão das vigas, os valores no momento do início da exposição ao fogo eram 7.4 mm e 7.5 mm para as vigas 1 e 2, respectivamente. Com o aumento da carga térmica as propriedades físicas e mecânicas de todos os materiais foram-se degradando, o que resultou num aumento da deformação. No entanto, ocorreu uma falha no sistema de carregamento que diminuiu substancialmente o valor da carga aplicada após 33 minutos de exposição ao incêndio. Nesse momento, o deslocamento a meio vão da viga 1 era 11 mm enquanto que na viga 2 essa grandeza valia 10 mm, com a diferença a dever-se ao melhor isolamento conferido pelo sistema de protecção mais espesso. Após alguns minutos, a falha no sistema de carregamento foi corrigida. No entanto, não foi possível retomar o valor do deslocamento medido antes desta ocorrência. Os deslocamentos de ambas as vigas foram aumentando ao longo de todo o ensaio, embora a taxa de aumento tenha sido inferior na viga 2. Ao fim de 4 horas de exposição não ocorreu a rotura de nenhuma das vigas nem se assistiu ao descolamento brusco do sistema de reforço, apesar de as temperaturas atingidas na adesivo de colagem terem sido bastante superiores à sua temperatura de transição vítreia. No entanto, próximo do final dos ensaios, os deslocamentos a meio vão das vigas apresentaram uma taxa de aumento bastante elevada, o que significa que a ligação betão-CFRP terá sido destruída e que a rotura das vigas estaria eminentemente. No final do ensaio o deslocamento a meio vão valia 20.2 mm na viga 1 e 15.6 mm na viga 2. Os autores deste estudo referem que a maioria dos regulamentos indica que quando a temperatura atingida no sistema de reforço é superior ao valor da temperatura de transição vítreia a resistência deste sistema não deve ser contabilizada. No entanto, estes ensaios demonstraram que essa situação está longe de representar a realidade, pois a temperatura de transição vítreia foi atingida ao fim de menos de uma hora e ambas as vigas resistiram durante 4 horas de exposição ao fogo sem ruir. Contudo, refira-se que as camadas de manta de GFRP colocadas nas extremidades dos laminados contribuíram fortemente para o bom comportamento do reforço.

Barnes e Fidell [3.42] estudaram igualmente o comportamento ao fogo de vigas de betão armado de pequena escala reforçadas à flexão com CFRP. Foram ensaiados 4 tipos de vigas diferentes: (i) vigas reforçadas com laminados de CFRP colados e sem protecção ao fogo; (ii) vigas reforçadas com laminados de CFRP colados e com protecção ao fogo; (iii) vigas reforçadas com laminados de CFRP colados e aparafusados nas extremidades e sem protecção ao fogo; (iv) vigas reforçadas com laminados de CFRP colados e aparafusados nas extremidades e com protecção ao fogo. As vigas tinham uma secção de 100 mm x 150 mm e um comprimento total de 1300 mm. O laminado de CFRP apresentava 1 mm de espessura e 100 mm de largura (igual à largura da viga). O sistema de protecção testado consistia em argamassa de vermiculite e gesso projectada e com espessura de 15 mm.

Numa primeira fase dos ensaios, as vigas foram sujeitas ao incêndio padrão definido na ISO 834 [3.7] na sua face inferior durante uma hora e sem qualquer carregamento aplicado. A segunda fase consistiu em averiguar a sua resistência “pós-fogo” através de um ensaio à flexão, em que as extremidades das vigas estavam simplesmente apoiadas, sendo aplicadas duas cargas concentradas a terços de vão. Após a exposição ao fogo, verificou-se que nas vigas não protegidas a aderência entre o betão e o sistema de reforço tinha sido completamente destruída, pois a máxima temperatura atingida no laminado foi de 580°C. Nas vigas protegidas, a temperatura máxima atingida na interface betão-adesivo foi de 140°C, bastante superior à temperatura de transição vítreia do adesivo epóxido utilizado (aproximadamente 81°C); contudo, nestas vigas a aderência CFRP-betão não apresentava sinais visíveis de degradação.

Nos ensaios de flexão, a carga de rotura foi semelhante em todas as vigas, o que mostrou que nas vigas protegidas a ligação betão-CFRP tinha sido destruída durante a exposição ao incêndio, apesar de a inspecção visual ter fornecido a informação contrária. A presença das ancoragens aparafusadas nas extremidades dos laminados de algumas vigas não permitiu aumentar a sua resistência. No entanto, durante o carregamento, a rigidez dessas vigas foi superior, o que mostra que este sistema poderá contribuir para uma melhoria do comportamento em situação de incêndio.

Uma das primeiras investigações sobre o comportamento ao fogo de vigas reforçadas à flexão com CFRP's foi desenvolvida por Deuring [3.43]. Este autor ensaiou um total de 6 vigas à escala real (com secção 30 mm x 400 mm e 5000 mm de comprimento), quatro das quais foram reforçadas com mantas de CFRP com 75 mm de largura e em duas destas foram aplicados painéis para protecção ao fogo em silicato de cálcio com 40 mm de espessura. As vigas foram sujeitas a um carregamento regulamentar para uma acção accidental e sujeitas ao incêndio padrão definido na norma ISO 834 [3.7]. Nessa campanha experimental verificou-se que nas vigas reforçadas com CFRP e sem qualquer sistema de protecção ao fogo o descolamento do reforço ocorreu ao fim de 20 minutos de exposição e a rotura das vigas após 81 minutos. Nas vigas protegidas, o tempo total de resistência ao fogo foi de 146 minutos; no entanto, a ligação betão-CFRP foi totalmente destruída ao fim de 60 minutos de exposição. Esse investigador verificou que o tempo de resistência ao fogo das vigas reforçadas e protegidas foi superior ao das vigas de betão armado não reforçadas e sem qualquer sistema de protecção.

Blonrock *et al.* [3.44] também estudaram o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP, testando vários sistemas de protecção à base de painéis de silicato de cálcio, variando a sua espessura, método de fixação e extensão da protecção. Durante todos os ensaios verificou-se que quando a temperatura de transição vítreia do adesivo de colagem era atingida, a contribuição do sistema de reforço para a resistência estrutural diminuía consideravelmente. Com a adopção de sistemas de protecção ao fogo, como seria de esperar, esses investigadores verificaram que foi necessário um tempo de exposição bastante superior para que a temperatura de transição vítreia do adesivo fosse atingida. Os autores desse estudo concluíram que o sistema de protecção em forma de U, protegendo simultaneamente as faces laterais e inferior das vigas, foi o mais eficaz. Nestes estudos foi ainda observado que quando se protegeu apenas a zona de ancoragem dos laminados com placas de silicato de cálcio, o tempo de resistência ao fogo aproximou-se do registado nas vigas em que toda a extensão do reforço foi protegida.

3.7.2. Lajes reforçadas à flexão

Um dos principais estudos sobre o comportamento ao fogo de lajes de betão armado reforçadas à flexão com CFRP foi elaborado por Williams *et al.* [3.45]. Reconhecida a fragilidade deste tipo de reforço em situação de incêndio, o objectivo dos autores foi estudar a eficácia de vários sistemas de protecção ao fogo disponíveis no mercado. Foram ensaiados 4 painéis de laje com 150 mm de espessura e dimensões em planta de 954 mm x 1331 mm, com a totalidade das faces inferiores reforçadas com duas camadas de mantas de CFRP. Em duas lajes foi aplicado um sistema de protecção ao fogo da marca *Fyfe* [3.38], que consiste numa primeira camada de argamassa projectada à base de vermiculite e gesso (denominada *Tyfo VG* [3.39]) à qual se sobrepõe uma película especial de tinta intumescente (denominada *Tyfo EI* [3.40]). Cada uma das restantes lajes foi protegida com argamassa cimentícia de agregados leves da marca *MBrace*. A descrição do isolamento das 4 lajes ensaiadas encontra-se sintetizada na tabela 3.4

Tabela 3.4. Descrição do isolamento das lajes ensaiadas por Williams *et al.* [3.45].

	Laje 1	Laje 2	Laje 3	Laje 4
Isolamento	19 mm de Tyfo VG, 0.25 mm de Tyfo EI	38 mm de Tyfo VG, 0.25 mm de Tyfo EI	38 mm de argamassa leve MBrace tipo 1	38 mm de argamassa leve MBrace tipo 2

As lajes foram sujeitas ao incêndio padrão definido na norma ASTM E119 [3.37] durante 4 horas na sua face inferior e sem qualquer carregamento aplicado. Na laje 1, ao fim de 132 minutos de exposição ao fogo, o sistema de isolamento perdeu a aderência ao substrato, deixando a superfície do reforço completamente exposta, o que conduziu a que ao fim de 5 minutos as mantas de CFRP se destacassem completamente do betão. Até ao final do ensaio verificou-se a delaminação do betão de recobrimento, expondo as armaduras. Nas restantes lajes o sistema de isolamento permaneceu intacto durante todo o ensaio, desenvolvendo-se apenas pequenas fendas devido às reacções de desidratação. Na figura 3.23 apresenta-se a evolução das temperaturas com o tempo na interface betão-CFRP em cada uma das lajes.

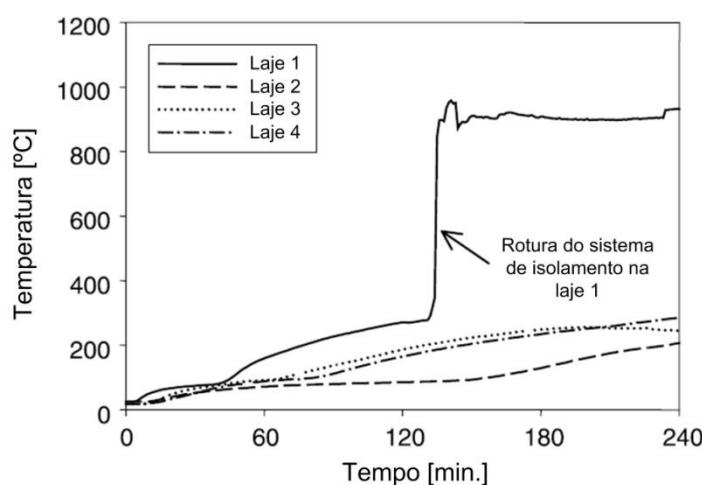


Figura 3.23. Evolução da temperatura com o tempo na interface betão-CFRP (adaptado de [3.45]).

Pela observação da figura anterior é possível identificar o instante em que o isolamento da laje 1 perdeu a aderência e deixou exposto o sistema de reforço. No entanto, nos momentos anteriores a este acontecimento, observa-se que o isolamento com menor espessura (laje 1) obteve um desempenho inferior, pois na laje onde aquele foi aplicado a taxa de aumento das temperaturas foi superior à verificada nas outras lajes. Além disso, concluiu-se que a camada de tinta intumescente colocada nas lajes 1 e 2 não teve uma influência significativa, pois nos momentos iniciais do ensaio (quando esta actua) a evolução das temperaturas nestas lajes foi semelhante à das lajes 3 e 4. Observando a figura anterior conclui-se que o sistema de protecção da laje 2 apresentou o melhor desempenho, pois em todos os momentos do ensaio os valores das temperaturas na interface betão-CFRP foram inferiores. Os sistemas de protecção das lajes 3 e 4 tiveram um desempenho semelhante entre si.

Os autores do referido estudo indicam que a temperatura de transição vítreia da resina utilizada para a impregnação das mantas era aproximadamente 82°C. Embora o sistema de reforço possa contribuir para a resistência e rigidez da laje para temperaturas ligeiramente superiores a este valor notável, as características dos ensaios realizados não permitiram determinar qual a temperatura máxima de funcionamento do reforço. Assim, estes ensaios apenas permitiram observar que a temperatura de transição vítreia na interface betão-CFRP foi atingida ao fim de 42, 104, 46 e 52 minutos para as lajes 1 a 4, respectivamente. Com a obtenção destes resultados, os investigadores afirmam que através da

aplicação de um sistema de protecção adequado é possível garantir um tempo de resistência ao fogo que permite respeitar os mais variados regulamentos nacionais. No entanto, os autores referem ainda que o estabelecimento de uma taxa máxima de reforço é um aspecto bastante importante, pois em caso de falha total do sistema de reforço o elemento de betão armado possui a resistência necessária para resistir ao carregamento regulamentar em situação de incêndio.

Um dos estudos mais recentes sobre o comportamento de lajes de betão armado reforçadas com CFRP foi elaborado por Burke *et al.* [3.46]. As lajes de betão armado ensaiadas por estes investigadores foram reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento das armaduras de acordo com a técnica de *Near Surface Mounted* (NSM). Esta técnica permite maior resistência a fenómenos de descolamento/arrancamento do CFRP, dada a existência da dupla área de colagem do laminado e de este se encontrar confinado. Além disso, o facto do sistema de reforço estar inserido em rasgos no betão confere-lhe uma protecção adicional ao fogo. No programa experimental desenvolvido por esses autores foram ainda comparados os desempenhos de reforços colados com resina epóxida e com um adesivo de base cimentícia. Este tipo de adesivos apresenta um melhor desempenho a temperaturas elevadas, permanecendo praticamente inalterado até 200°C [3.47]. As lajes foram ensaiadas num esquema de flexão em quatro pontos (dois bordos simplesmente apoiados e duas cargas aplicadas a terços de vão), em que a carga aplicada era superior ao valor da carga resistente da laje não reforçada. Com este nível de carregamento, o colapso das lajes ocorreu imediatamente após a rotura do sistema de reforço, permitindo determinar o instante em que a contribuição do reforço deixou de existir. Somente metade da extensão da zona reforçada foi aquecida de forma a controlar a zona de rotura das lajes, tendo sido atingidas temperaturas até 100°C numa série de ensaios, e 200°C noutra série. A temperatura nas lajes aumentou rapidamente até ao valor pretendido (100°C ou 200°C) e foi mantida constante até ao momento da rotura.

Nas lajes aquecidas até 100°C a rotura do reforço em que se utilizou adesivo epóxido ocorreu ao fim de 44 minutos, enquanto que na laje onde se utilizou adesivo cimentício não foi atingida a rotura após 5 horas de exposição ao calor. Por essa razão, foi aumentado o carregamento até que se verificasse a rotura, tendo-se obtido um valor ligeiramente superior ao registado em ensaios a lajes de referência à temperatura ambiente. Estes resultados mostram que para temperaturas de 100°C as propriedades do adesivo cimentício permanecem totalmente inalteradas.

Nas lajes aquecidas até 200°C comprovou-se o melhor desempenho do sistema de reforço com adesivo cimentício, pois a sua rotura ocorreu ao fim de 74 minutos (valor médio das várias lajes), enquanto que nas lajes onde se utilizou adesivo epóxido a rotura ocorreu após 11 minutos. Refira-se que numa das lajes em que se utilizou adesivo epóxido, devido a um erro na montagem do dispositivo de aquecimento, cerca de 50 mm da extremidade do reforço não recebeu acção térmica. Consequentemente, o tempo até à rotura foi semelhante ao verificado nos sistemas com adesivo cimentício. Este acontecimento poderá indicar que na concepção de sistemas de protecção ao fogo para estruturas de betão armado reforçadas à flexão com CFRP, será possível obter-se melhores desempenhos quando se aumenta o isolamento na zona de extremidade do reforço.

Na referida campanha experimental comprovou-se que o sistema de reforço que recorre a adesivo cimentício apresenta um melhor comportamento a altas temperaturas do que os sistemas tradicionais com adesivo epóxido. Além disso, foi possível verificar que as diferenças de temperatura entre a face do adesivo exposta directamente ao calor e o adesivo que se encontrava no interior do rasgo do betão foram sempre superiores a 110°C, o que mostra que a própria configuração do sistema NSM confere um isolamento considerável ao sistema de reforço. Os resultados obtidos por estes investigadores deixaram em aberto inúmeros aspectos passíveis de serem aprofundados em estudos posteriores.

3.7.3. Pilares

A informação sobre o comportamento ao fogo de pilares de betão armado reforçados com sistemas CFRP é ainda bastante escassa. No entanto, destaca-se o trabalho realizado por Kodur *et al.* [3.48], que ensaiaram dois pilares de secção circular à escala real confinados com mantas de CFRP, sobre as quais foi aplicado um sistema de protecção ao fogo. Os pilares ensaiados apresentavam uma secção com 400 mm de diâmetro e altura total de 3810 mm. Foram reforçados com uma camada de mantas de CFRP com fibras unidireccionais, que permitiu aumentar a resistência à compressão axial em 26%. Foi aplicado um sistema de protecção da marca *Fyfe* [3.38], que consiste numa primeira camada de argamassa projectada à base de vermiculite e gesso (denominada *Tyfo VG* [3.39]) à qual se sobrepõe uma película especial de tinta intumescente (denominada *Tyfo EI* [3.40]). A argamassa de protecção apresentava espessuras de 32 mm e 57 mm nos pilares 1 e 2, respectivamente.

Os pilares foram sujeitos ao incêndio padrão definido na norma ASTM E119 [3.37] enquanto lhes era aplicada uma carga axial típica de condições de serviço. Não foi atingida a rotura de nenhum dos pilares ao fim de 5 horas de exposição ao fogo, apesar de a temperatura de transição vítreia do reforço ter sido ultrapassada ao fim de 81 minutos no pilar 1 e 118 minutos no pilar 2. Tal como se observa nas figuras 3.24 a) e b), no decorrer dos ensaios as temperaturas atingidas ao nível do reforço foram bastante superiores à temperatura de transição vítreia, principalmente no pilar com 32 mm de isolamento (figura 3.24 a), reduzindo quase por completo a sua contribuição para a resistência axial. Em ambos os pilares observou-se um aumento considerável da temperatura ao nível do reforço nos minutos finais dos ensaios, situação que foi motivada pela degradação dos sistemas de protecção ao fogo. Contudo, esses sistemas de protecção impediram que as temperaturas no betão e nas armaduras atingissem valores que diminuíssem consideravelmente as suas propriedades resistentes. Por esta razão, estes investigadores concluíram que a rotura não foi atingida porque o valor do carregamento aplicado era inferior à carga de rotura dos pilares não reforçados, o que mais uma vez mostra que o estabelecimento de uma taxa máxima de reforço é um aspecto importante para garantir a segurança destes elementos estruturais em situação de incêndio.

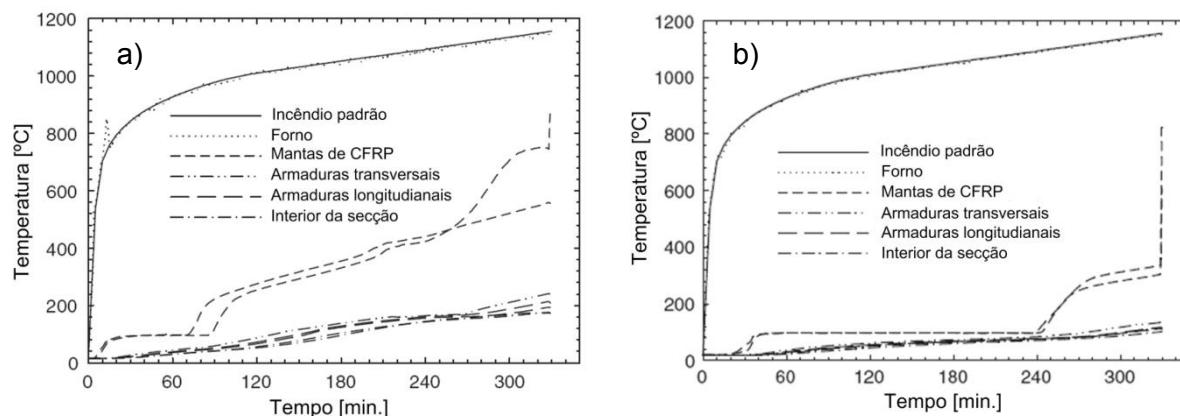


Figura 3.24. a) evolução das temperaturas com o tempo no pilar com isolamento de 32 mm [3.48]; b) evolução das temperaturas com o tempo no pilar com isolamento de 57 mm [3.48].

3.8. Bibliografia

- [3.1] F. Kreith, "Princípios da Transmissão de Calor", Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.
- [3.2] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", Livros Técnicos e Científicos, Editora LTC, 5^a edição, 2003.
- [3.3] P. R. Fernandes, "Simulação do comportamento termoquímico de perfis pultrudidos de fibras de vidro (GFRP) em situação de incêndio", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro, 2009.
- [3.4] *Fib* bulletin 38, "State-of-the-art Report - Fire Design of Concrete Structures – Materials, Structures and Modelling", Fédération Internationale du béton (*fib*), Lausanne, 2007.
- [3.5] L.M. Marçalo, "Resistência ao fogo em lajes mistas. Aplicação da parte 1.2 do Eurocódigo 4", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Setembro, 2007.
- [3.6] A. J. S. Lopes, "Avaliação do risco de incêndio em edifícios", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2004.
- [3.7] ISO 834, "Fire resistance tests. Elements of building construction", International Standards Organization, Genève, 1975.
- [3.8] NP EN 1991-1-2, "Accções em estruturas, Parte 1-2: Accções em estruturas expostas ao fogo", IPQ, Lisboa, 2010.
- [3.9] E.C. Kaefer, V. Pignatta, "Análise Paramétrica de um Incêndio Conforme o Novo Eurocode 1", Relatório para o Laboratório de Mecânica Computacional, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- [3.10] Z. P. Bazant, M. F. Kaplan, "Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models", Concrete design and construction series, Essex, Longman Group Limited, 1996.
- [3.11] NP EN 1992-1-2, "Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação de resistência ao fogo ", IPQ, Lisboa, 2010.
- [3.12] E. L. Klamer, "Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2009.
- [3.13] I. C. Neves, "Segurança ao Fogo – Fundamentos", Apontamentos da disciplina de Segurança ao Fogo do curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Julho, 1984
- [3.14] CEB, "CEB Bulletin d'information n° 208: Fire design of concrete structures", Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 1991.
- [3.15] T. F. D. Gonçalves, "Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão. Comportamento Global de Estruturas em Situação de Incêndio", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008.

- [3.16] J.R. Correia, "GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [3.17] A. P. Mouritz, A. G. Gibson, "Fire properties of polymer composite materials", Springer, Dordrecht, 2006.
- [3.18] H. Blontrock, "Analyse en modellering van de brandweerstand van betonelementen uitwendig versterkt met opgelijmde composietlaminaten.", Ghent University, 2003 (citado em [3.12]).
- [3.19] G. Rehm, L. Franke, "Kunstharzgebundene glasfaserstäbe als bewehrung im betonbau.", Die Bautechnik, Heft 4, 1974 (citado em [3.12]).
- [3.20] R. Sen, D. Mariscal, M. Shahawy, "Investigation of S-2 glass/epoxy strands in concrete.", Proceedings of the International Symposium on Fibre-Reinforced-Plastics Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-1), ACI, Vancouver, 1993 (citado em [3.12]).
- [3.21] F. S. Rostásy, "Fibre composite elements and techniques as non-metallic reinforcement of concrete", Project 4142/BREU - CT 91 0515, Technical Report Task 1, Brite-Euram, 1992 (citado em [3.12]).
- [3.22] J. M. Plecnik, B. Bresler, J. D. Cunningham, R. Iding, "Temperature effects on epoxy adhesives.", Journal of Structural Division, Vol. 106, No. 1, pp. 99-113, 1980.
- [3.23] M. Miwa, A. Takeno, Y. Mori, T. Yokoi, A. Watanabe, "Effects of Young's modulus of epoxy resin on axial compressive strength of carbon fibre.", Journal of Materials Science, No. 33, pp. 3885-3890, 1998.
- [3.24] S. Kumahara, Y. Masuda, H. Tanano, A. Shimizu, "Tensile strength of continuous fibre bar under high temperature.", Proceedings of the International Symposium on Fibre Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS - 1), pp. 731-742, Vancouver, 1993.
- [3.25] M. Saafi, "Effect of fire on FRP reinforced concrete members", Composite Structures, No. 58, pp. 11-20, 2002.
- [3.26] M. Leone, M. A. Aiello, S. Matthys, "The influence of service temperature on bond between FRP reinforcement and concrete.", Fédération Internationale du Béton (*fib*), Proceedings of the 2nd International Congress, Naples, 2006.
- [3.27] R. P. C. Marreiros, "Degradação da aderência entre CFRP e betão armado devida a envelhecimento acelerado", Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.
- [3.28] R. Al-Mahaidi, J. C. P. H. Gamage, M. B. Wong, "Performance of CFRP strengthened concrete members under elevated temperatures", Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, International Institute for FRP in Construction, pp. 113-118, 2005.
- [3.29] H. Blontrock, L. Taerwe, H. Vanwalleghem, "Bond testing of externally glued FRP laminates at elevated temperature.", Proceeding of the international conference „bond in concrete- from research to standard”, Budapest, Hungary, 2002.
- [3.30] E. L. Klamer, D .A. Hordijk, H. J. M. Janssen. "The Influence of Temperature on the Debonding of Externally Bonded CFRP.", Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7), pp. 1551-1570, 2004.

[3.31] T. M. C. G. Pinto, "Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2008.

[3.32] M. M. Martins, "Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

[3.33] Página da internet: www.tria.pt, visitada em 10 Agosto 2010.

[3.34] A. Santiago, "Análise e dimensionamento ao fogo", Documentos de apoio às aulas de Doutoramento em Construção Metálica e Mista, Faculdade de Ciéncia e Engenharia da Universidade de Coimbra, 2010.

[3.35] Página da Internet: <http://images.google.pt>, visitada em 10 Agosto 2010.

[3.36] B. Williams, V. Kodur, M. F. Green, L. Bisby, "Fire Endurance of Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete T-Beams", ACI Structural Journal, Vol. 105, No. 1, pp. 60-67, Janeiro 2008.

[3.37] ASTM E119, "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials", ASTM International, 22 pp., West Conshohocken, 2002.

[3.38] Página da internet da empresa Fyfe Co, LLC: <http://www.fyfeco.com>, visitada em 29/03/2010.

[3.39] Página da internet da empresa Fyfe Co, LLC: <http://www.fyfeco.com/products/pdf/tyfo%20vg.pdf>, visitada em 29/03/2010.

[3.40] Página da internet da empresa Fyfe Co, LLC: <http://www.fyfeco.com/products/pdf/tyfo%20ei-%20r.pdf>, visitada em 29/03/2010.

[3.41] CAN/ULC S101-89, "Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials", Underwriters" Laboratories of Canada, 49 pp., Scarborough, Canada, 1989.

[3.42] R. Barnes, J. Fidell, "Performance in Fire of Small-Scale CFRP Strengthened Concrete Beams", Journal of Composites for Construction, Vol. 10, No. 6, pp. 503-508, November/December, 2006.

[3.43] M. Deuring, "Brandversuche an Nachtraglich Verstärkten Tragern aus Beton", Research report EMPA No. 148.795, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Dubendorf, Switzerland, 1994.

[3.44] H. Blontrock, L. Taerwe, P. Vandeveldt. "Fire tests on concrete beams strengthened with fibre composite laminates.", Proceedings of the third Ph.D. symposium, Vienna, 2000.

[3.45] B. Williams, L. A. Bisby, V. Kodur, M. F. Green, E. Chowdhury, "Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs", Composites: Part A, Vol. 37, pp. 1151-1160, 2006.

[3.46] P.J. Burke, L.A. Bisby, M.F. Green, "Structural Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs at Elevated Temperature", disponível em <http://www.hughesbros.com/aslan200/NSM%20systems%20with%20elevated%20temp-BISBY.pdf>.

[3.47] T. T. Lie, "Structural Fire Protection", American Society of Civil Engineers Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 78, ASCE, New York, 1992.

[3.48] V. Kodur, L. A. Bisby, M. F. Green, "Experimental evaluation of fire behavior of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns", Fire Safety Journal, Vol. 41, pp. 547-557, 2006.

4. Estudo experimental do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP

4.1. Programa experimental

4.1.1. Objectivos do programa experimental

As propriedades mecânicas dos materiais que constituem o sistema de reforço estudado, ou seja, laminados de fibra de carbono (CFRP) e adesivo à base de resina epoxídica, sofrem uma degradação significativa com o aumento da temperatura, o que constitui um forte entrave à aplicação deste tipo de sistemas em edifícios. Neste sentido, a presente dissertação tem como principal objectivo estudar o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com CFRP, analisando a eficácia de dois tipos de protecção passiva normalmente utilizadas em construção metálica.

Os ensaios que constituíram o corpo do programa experimental do presente trabalho foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) do Instituto Superior Técnico, nos quais se pretendia avaliar:

- O comportamento do sistema de reforço quando sujeito a um incêndio padrão, nomeadamente o seu tempo de resistência e o respectivo modo de rotura;
- O incremento no tempo de resistência ao fogo do sistema de reforço pela adopção de dois tipos de protecção passiva;
- O possível efeito benéfico do isolamento térmico das zonas de ancoragem nas vigas reforçadas.
- O comportamento mecânico das vigas em situação de incêndio no que refere à evolução dos deslocamentos e extensões axiais na secção de meio vão.

O incêndio padrão adoptado está de acordo com o definido na norma ISO 834 e os sistemas de protecção baseiam-se na aplicação de argamassa de vermiculite e perlite (VP) e painéis de silicato de cálcio (SC).

Para que os objectivos anteriores fossem atingidos foram ensaiadas seis vigas, simplesmente apoiadas, sujeitas ao incêndio padrão: duas vigas sem qualquer tipo de protecção ao fogo, sendo que uma delas também não se encontrava reforçada com CFRP; duas vigas reforçadas à flexão e protegidas com argamassa de vermiculite e perlite (25 e 40 mm de espessura) e duas vigas, também reforçadas à flexão, protegidas com painéis de silicato de cálcio (25 e 40 mm de espessura). Refira-se que as espessuras adoptadas para os sistemas de protecção foram condicionadas pelas dimensões de painéis de SC comercializadas por empresas de protecção ao fogo. Além dos ensaios de resistência ao fogo, foram realizados ensaios de resistência mecânica a duas vigas de referência, simplesmente apoiadas num vão de 1.50 m, com o objectivo de confirmar experimentalmente o dimensionamento efectuado e o seu comportamento para o nível de carga em situação de incêndio.

Foram ainda realizados estudos experimentais complementares que permitiram determinar propriedades termofísicas e termomecânicas dos laminados e do adesivo. Através de ensaios de colorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA) estimou-se a temperatura de decomposição (T_d). As análises mecânicas dinâmicas (DMA), permitiram determinar a temperatura de transição vítreia (T_g) de ambos os materiais. Por fim, realizaram-se ensaios de tracção simples ao adesivo que permitiram determinar a sua resistência e o módulo de elasticidade.

4.2. Materiais

No programa experimental foram utilizados os seguintes cinco tipo de materiais, cujas propriedades à temperatura ambiente se descrevem nesta secção: (i) betão; (ii) aço em varão; (iii) laminados de CFRP; (iv) adesivo epóxido; e (v) materiais de protecção ao fogo.

4.2.1. Betão

O betão utilizado nas vigas foi produzido no LERM com a composição indicada na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Composição do betão das vigas ensaiadas.

Material constituinte	Relação em massa [kg/kg de cimento]
Cimento Portland de calcário (CEM II/A-L, Classe 42.5 R)	1.00
Areia de rio (tipo 1, fina)	2.30
Brita calcária (tipo 1, fina)	3.60
Água	0.55

Para quantificar a resistência do betão à compressão foram ensaiados 5 provetes cúbicos de 15 cm de aresta, 28 dias após a betonagem das vigas. Estes provetes foram submetidos a um processo de cura numa câmara húmida com temperatura e humidade controladas (humidade de 100% e temperatura constante de 20 °C), de modo a minimizar a influência da retracção e microfissuração nos respectivos resultados. Refira-se que antes dos ensaios à compressão todos os provetes foram pesados de modo a detectar a eventual presença de vazios no interior dos mesmos.

Os ensaios à compressão foram realizados de acordo com o preconizado na norma NP EN 12390-3 [4.1]. Para tal, recorreu-se a uma prensa hidráulica com uma taxa de aplicação de carga de 11,3 kN/s (0,5 MPa/s). Na tabela 4.2 apresentam-se os resultados dos ensaios, incluindo a média ($f_{cm.28\text{ dias}}$) e o desvio padrão (S_n) da resistência à compressão.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias em cubos.

Provete	Massa [g]	Força [kN]	f_{ci} [MPa]
1	7779.0	697.5	31.00
2	7080.0	688.9	30.62
3	7918.0	783.7	34.83
4	7792.0	679.1	30.18
5	7930.0	767.2	34.10
			$f_{cm.28\text{ dias}}$ [MPa]
			32.15
			S_n [MPa]
			2.15

Admitindo que os valores obtidos seguem uma distribuição normal, a resistência característica do betão à compressão em cubos ($f_{ck,cubos}$) pode ser determinada pela expressão 4.1,

$$f_{ck,cubos} = f_{cm,cubos} - 1.64 \times S_n \quad (4.1)$$

em que:

- $f_{ck,cubos}$ - valor característico da resistência à compressão em cubos;
- $f_{cm,cubos}$ - valor médio da resistência à compressão em cubos;
- S_n - desvio padrão.

Aplicando a expressão 4.1 obteve-se um valor característico de 28.62 MPa; deste modo, conclui-se que o betão produzido apresenta propriedades intermédias das dos betões C25/30 e C20/25. Assumindo que a resistência à compressão em cilindros ($f_{ck,cilindros}$) é, aproximadamente, 80% da obtida nos cubos, obtém-se um valor de 22.89 MPa, o que confirma o resultado anterior.

Para a obtenção do módulo de elasticidade não foram realizados ensaios específicos. No entanto, este parâmetro foi estimado recorrendo aos resultados dos ensaios de compressão nos cubos, recorrendo à formulação indicada na parte 1.1 do EC2 [4.2]. Essa norma indica que o valor aproximado do módulo de elasticidade secante (E_{cm}) pode ser estimado pela expressão 4.2,

$$E_{cm} = 0.9 \times \left[22 \times \left(\frac{f_{cm,cubos}}{10} \right)^{0.3} \right] \quad (4.2)$$

em que:

- E_{cm} - valor aproximado do módulo de elasticidade secante [GPa];
- $f_{cm,cubos}$ - valor médio da resistência à compressão [MPa].

Na expressão 4.2 o valor 0.9 está relacionado com o facto de os agregados utilizados na produção do betão serem de natureza calcária, tal como sugerido no EC2 [4.2]. Aplicando esta expressão aos resultados indicados anteriormente obteve-se o valor de 28.11 GPa para o módulo de elasticidade secante.

Para quantificar a resistência do betão à tracção foram ensaiados 4 provetes cilíndricos, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, 28 dias após a betonagem das vigas. Tal como os provetes cúbicos, os provetes cilíndricos foram submetidos a um processo de cura numa câmara húmida com temperatura e humidades controladas até ao momento do ensaio. O parâmetro em causa foi determinado com base no ensaio de compressão diametral, realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 [4.3]. Para tal, recorreu-se a uma prensa hidráulica, com taxa de aplicação de carga de 1.3 kN/s (aproximadamente 0.045 MPa/s), e registaram-se os valores das cargas (radiais) máximas. Introduzindo estes valores na expressão 4.3, foi possível estimar a resistência do betão à tracção. Na tabela 4.3 apresentam-se os resultados dos ensaios, assim como a sua média ($f_{ctm,28\text{ dias}}$) e desvio padrão (S_n).

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4.3)$$

Em que:

- f_{ct} – resistência à tracção por compressão diametral [MPa];
- F – força radial máxima [N];
- L – altura dos provetes cilíndricos [mm];
- d – diâmetro dos provetes cilíndricos [mm].

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de resistência à tração aos 28 dias por compressão diametral.

Provete	Massa [g]	Força [kN]	f_{cti} [MPa]
1	12431.0	152.9	2.16
2	12285.0	143.6	2.03
3	12329.0	151.3	2.14
4	12303.0	160.9	2.28
		$f_{ctm,28\text{ dias}}$ [MPa]	2.15
		S_n	0.10

A resistência característica do betão à tração (f_{ctk}) foi determinada adaptando a expressão 4.1 para as grandezas em causa, tendo-se obtido o valor de 1.99 MPa.

Na tabela 4.4 encontram-se resumidas as propriedades mecânicas do betão após 28 dias da betonagem das vigas.

Tabela 4.4. Propriedades mecânicas do betão aos 28 dias.

Propriedade	Média \pm desvio padrão	Cv [%]
$f_{cm,cubos}$ [MPa]	32.15 ± 2.15	6.69
$f_{cm,cilindros}$ [MPa]	25.72 ± 1.72	6.69
$f_{ck,cubos}$ [MPa]	28.62 ± 2.15	7.52
$f_{ck,cilindros}$ [MPa]	22.89 ± 1.72	7.52
E_{cm} [GPa]	28.11 ± 0.56	2.01
f_{ctm} [MPa]	2.15 ± 0.10	4.66
f_{ctk} [MPa]	1.99 ± 0.10	5.05

Dado que o programa experimental se prolongou por várias semanas, realizaram-se mais ensaios a cubos e cilindros de forma a determinar as propriedades do betão nos seguintes instantes:

- 54 dias após a betonagem: momento que correspondeu aos ensaios de resistência mecânica a duas vigas de referência;
- 74 dias após a betonagem: primeira série de ensaios de resistência ao fogo;
- 116 dias após a betonagem: segunda série de ensaios de resistência ao fogo.

Na tabela 4.5 apresentam-se as propriedades do betão nos referidos instantes.

Tabela 4.5. Propriedades mecânicas do betão com diferentes idades.

Propriedade	Idade do betão		
	54 dias	74 dias	116 dias
$f_{cm,cubos}$ [MPa]	32.87 ± 0.90	35.31 ± 2.32	34.69 ± 2.13
$f_{cm,cilindro}$ [MPa]	26.30 ± 0.72	28.25 ± 1.85	27.75 ± 1.71
$f_{ck,cubos}$ [MPa]	31.40 ± 0.90	31.51 ± 2.32	31.19 ± 2.13
$f_{ck,cilindros}$ [MPa]	25.12 ± 0.72	25.21 ± 1.85	24.95 ± 1.71
E_{cm} [GPa]	28.29 ± 0.23	28.91 ± 0.57	28.76 ± 0.53
f_{ctm} [MPa]	-	-	2.32 ± 0.09
f_{ctk} [MPa]	-	-	2.17 ± 0.09

Refira-se que, contrariamente ao esperado, os valores de resistência à compressão aos 116 dias são ligeiramente inferiores aos obtidos aos 74 dias. Esta diferença pode ser explicada por uma deficiente vibração de alguns dos provetes ensaiados aos 116 dias, conduzindo a um betão menos compacto, e, como tal, com menor resistência. Esta afirmação pode ser comprovada pela observação dos valores da massa dos provetes, presente na tabela I.1 do Anexo I. Contudo, tendo em conta os valores da dispersão verificados naqueles ensaios, considera-se que as diferenças referidas não terão relevância estatística.

Não foram realizados ensaios específicos para a determinação da extensão última de compressão do betão (ε_{cu}), pelo que no presente trabalho foi considerado o valor de referência $\varepsilon_{cu} = 0.3\%$.

4.2.2. Aço em varão

O aço utilizado nas armaduras ordinárias das vigas é do tipo A400 NR. No programa experimental não foram previstos ensaios para aferir as propriedades mecânicas deste material, pelo que em todos os cálculos efectuados se admitiram os valores apresentados na tabela 4.6, em que f_{yk} , f_{yd} e f_{ym} são os valores característicos, de cálculo e médio da tensão de cedência, respectivamente, f_{um} é o valor médio da tensão de rotura, E_s é o módulo de elasticidade e ε_{syk} , ε_{syd} e ε_{sym} são os valores característicos, de cálculo e médio da extensão de cedência.

Tabela 4.6. Propriedades mecânicas do aço das armaduras ordinárias.

Propriedade	Valor
f_{yk} [MPa]	400
f_{yd} [MPa]	348
f_{ym} [MPa]	562
f_{um} [MPa]	582
E_s [GPa]	200
ε_{syk} [%]	2.00
ε_{syd} [%]	1.74
ε_{sym} [%]	2.91

4.2.3. Laminados de CFRP

Os laminados de CFRP utilizados para o reforço à flexão das vigas ensaiadas apresentam uma secção transversal de 50 mm x 1.2 mm, sendo produzidos e comercializados pela empresa *S&P Clever Reinforcement Ibérica* com a designação *S&P Laminates CFK 150/2000*. São constituídos por fibras de carbono orientadas na direcção longitudinal dos laminados e por uma matriz de resina epoxídica. Por razões técnicas do processo de fabrico, de acordo com o fabricante, a percentagem volumétrica máxima de fibras está limitada a 70%. Na tabela 4.7 estão presentes os valores médios das propriedades mecânicas, indicados pela S&P, que deverão ser utilizados no dimensionamento dumha solução de reforço com laminados instalados à superfície, em que b_f e t_f são a largura e espessura do laminado, respectivamente, A_f é a área da sua secção transversal, E_f é o módulo de elasticidade, ε_{fu} é a extensão de rotura e σ_{fu} é a tensão de rotura.

Tabela 4.7. Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP a utilizar no dimensionamento.

Tipo	S&P Laminates CFK 150/2000 50 x 1.2
b_f [mm] x t_f [mm]	50 x 1.2
A_f [mm ²]	60
E_f [GPa]	165
ε_{fu} [%]	6.0
σ_{fu} [MPa]	1000

4.2.4. Adesivo

O adesivo utilizado para o sistema de reforço das vigas, produzido pela empresa *S&P Clever Reinforcement Ibérica*, é constituído por resina epoxídica, tendo a denominação comercial de *S&P Resin 220 epoxy adhesive*. Estudos realizados por Fonseca [4.4] no mesmo material (de um lote diferente) revelaram uma quantidade significativa de adições/fillers (55% em massa), nomeadamente de silicato de cálcio carbonatado. Este adesivo é fornecido em dois componentes com igual massa volúmica ($\rho = 1750$ kg / m³), A e B, os quais são misturados com um rácio de 4:1, respectivamente. O fabricante indica que os valores de resistência à compressão (σ_{cu}) e à tracção em flexão (σ_{fu}) são superiores a 90 MPa e 30 MPa, respectivamente. Relativamente à temperatura de transição vítreia (T_g), o fabricante refere que deverá ser, no mínimo, igual a 56°C.

4.2.4.1. Ensaios de tracção

a) Objectivo dos ensaios

No âmbito da campanha experimental foram realizados ensaios de tracção a provetes do referido adesivo. Estes ensaios têm como objectivo avaliar a resistência dos provetes à tracção, o módulo de elasticidade e a extensão na rotura em tracção dos provetes, propriedades que podem ser obtidas através das seguintes expressões,

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{tu}}{b_p \times t_p} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{tu} = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (4.5)$$

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (4.6)$$

em que,

- σ_{tu} - tensão de rotura à tracção;
- F_{tu} - força de rotura em tracção;
- b_p - largura do provete;
- t_p - espessura do provete;
- ε_{tu} - extensão de rotura à tracção;
- ΔL – variação do comprimento de referência do provete até à rotura;
- L_o – comprimento de referência (livre) do provete;

- E_t – módulo de elasticidade do adesivo à tracção;
- $\Delta\sigma$ - variação de tensão;
- $\Delta\varepsilon$ - variação de extensão.

Para a obtenção dos parâmetros anteriores foram ensaiados 7 provetes, 3 dos quais instrumentados com um extensómetro, cuja cura foi realizada à temperatura ambiente durante um período de 2 meses, aproximadamente.

b) Descrição dos ensaios

Os ensaios de tracção foram realizados de acordo com a norma ISSO 527 - partes 1 e 2 [4.5, 4.6], referentes à determinação das propriedades em tracção de plásticos moldados ou extrudidos. As dimensões adoptadas para os moldes dos provetes estão indicadas na figura 4.1. Na tabela 4.8 apresentam-se os valores da largura (b_p) e espessura (t_p) dos provetes obtidos a partir da média das medições efectuadas em 3 secções distintas, bem como o respectivo comprimento livre (L_o), correspondente à distância entre garras da máquina de ensaios.

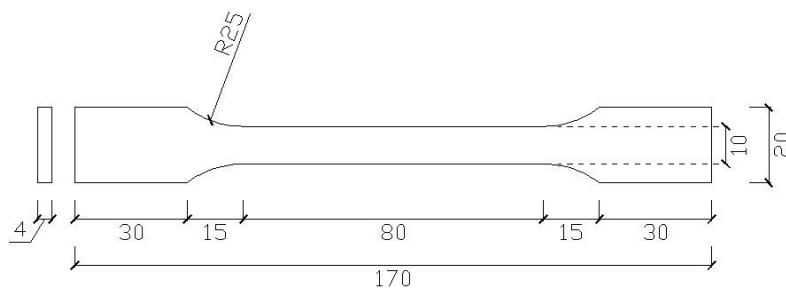


Figura 4.1. Dimensões dos moldes dos provetes (em mm).

Tabela 4.8. Dimensões médias da secção e comprimento inicial livre dos provetes.

Provete	b_p [mm]	t_p [mm]	L_o [mm]
EP1	10.38	4.30	76.41
EP2	10.07	4.31	72.17
EP3	10.04	4.34	72.44
EP4	10.03	4.25	72.20
EP5	10.15	4.20	72.31
EP6	10.36	4.45	72.07
EP7	10.09	4.28	72.35

A carga foi aplicada com recurso a uma máquina hidráulica do Laboratório de Construção do IST, da marca *Lloyd Instruments*, modelo *LR 50K*, com uma capacidade de 50 kN e um sistema de garras de aperto, tal como se observa na figura 4.2. O ensaio foi realizado em controlo de deslocamentos, tendo a carga sido aplicada com uma velocidade de 5 mm/min até à rotura dos provetes, para determinar a tensão e extensão últimas, e a 0.5 mm/min para determinar o módulo de elasticidade. A força foi medida com uma célula de carga da marca *Peek* com um capacidade de 30 kN e o deslocamento entre garras foi medido com um deflectómetro electrónico da marca *TML* com um curso de 25 mm. Os valores das cargas e dos deslocamentos foram registados num computador por intermédio de uma unidade de aquisição de dados de 8 canais, da marca *HBM* e modelo *Spider 8*.

Nestes ensaios, tal como se observa na figura 4.3, foram colocados extensómetros da marca *TML* (FLK-6-11-3L) nos provetes EP5 a EP7 com o objectivo de medir a sua extensão.



Figura 4.2. Máquina hidráulica e pormenor do sistema de garras de aperto.

Figura 4.3. Localização dos extensómetros nos provetes EP5 a EP7.

c) Análise e discussão dos resultados

Na figura 4.4 apresentam-se os diagramas força-deslocamento dos provetes ensaiados. Observa-se um andamento não linear até à rotura, mais notório nos provetes EP1 e EP2, que se pode explicar pelo comportamento não linear do material (para valores mais elevados da força) e, sobretudo, pelo possível escorregamento dos provetes nas garras. Na mesma figura destaca-se a curva obtida no provete EP3, com uma rigidez consideravelmente inferior à dos restantes provetes. Dado que as condições de fabrico e de cura foram idênticas em todos os provetes, esta diferença de comportamento explica-se por um deficiente aperto das garras, permitindo o escorregamento gradual do provete durante todo o ensaio.

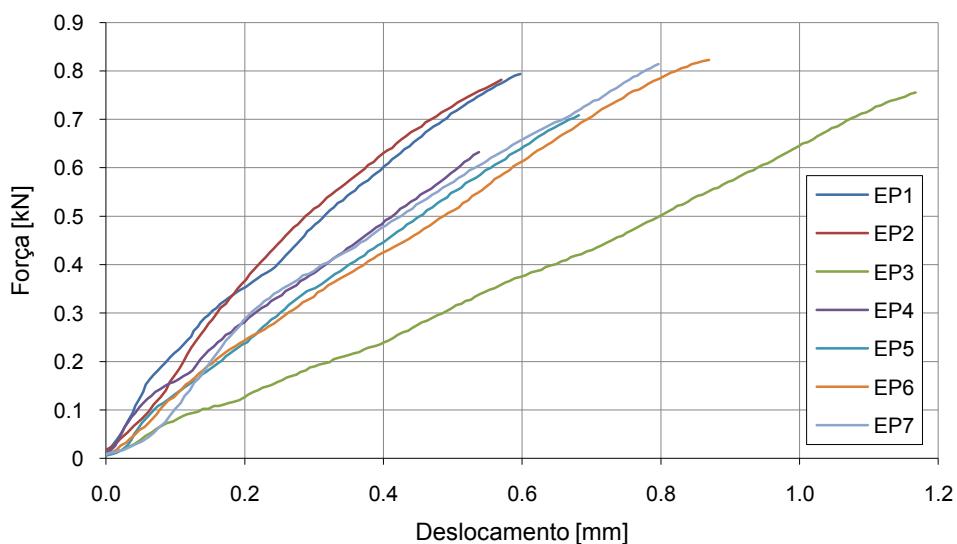


Figura 4.4. Diagrama força-deslocamento dos provetes ensaiados.

Em todos os provetes a rotura ocorreu de forma frágil. No entanto, no caso dos provetes EP2 e EP4, esta ocorreu na zona da garra de aperto e numa secção do provete com vazios, respectivamente. Na figura 4.5 apresentam-se todos os provetes após o ensaio descrito, onde é possível observar as secções onde a rotura ocorreu. A existência duma imperfeição no provete EP4, ilustrada na figura 4.6, explica a menor força de rotura obtida.

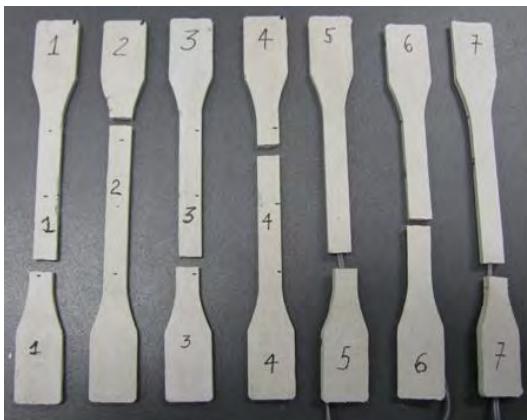


Figura 4.5. Rotura de todos os provetes ensaiados

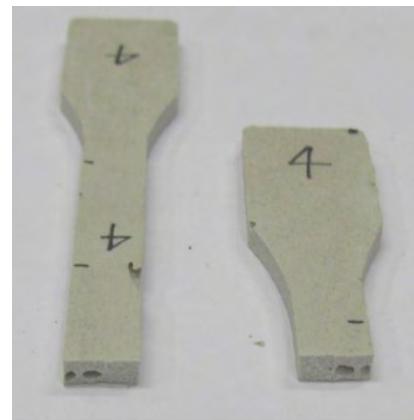


Figura 4.6. Pormenor da rotura do provete EP4 numa zona com vazios.

Determinou-se o módulo de elasticidade por regressão linear dos pontos da curva tensão-deformação dos provetes EP5, EP6 e EP7 para extensões até cerca de 600 μ strain, apesar de a norma ISO 527 – Parte 1 [4.5] sugerir que aquele cálculo seja efectuado no intervalo de extensões [500 ; 2500] μ strain. Não se recorreu ao intervalo indicado na norma pelo facto de as extensões atingidas nos ensaios apresentarem valores inferiores ao limite máximo aí sugerido.

Na figura 4.7 constata-se que os resultados dos provetes EP5 e EP6 são bastante semelhantes, apresentando um andamento praticamente linear para os valores de tensão em causa.

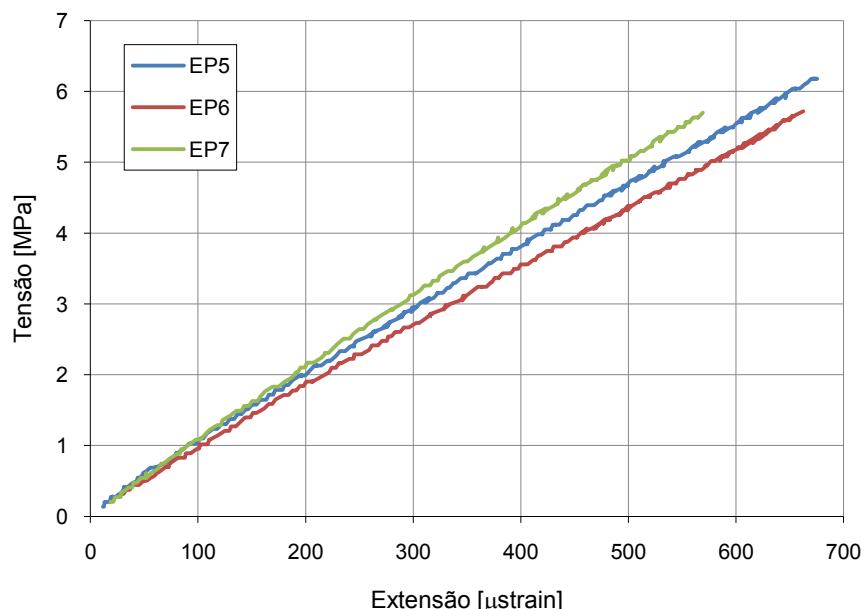


Figura 4.7. Diagrama tensão-extensão determinado para os provetes EP5, EP6 e EP7.

Os valores da carga (F_{tu}), tensão (σ_{tu}) e extensão (ε_{tu}) de ruptura e do módulo de elasticidade (E_t) em tracção são apresentados na tabela 4.9. A partir deles foram calculados os valores médios das referidas grandezas, apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.9. Força, tensão e extensão na ruptura, e módulo de elasticidade em tracção dos provetes de adesivo.

Provete	F_{tu} [kN]	σ_{tu} [MPa]	ε_{tu} [μ strain]	E_t [GPa]
EP1	0.793	17.80	-	-
EP2	0.782	18.01	-	-
EP3	0.755	17.33	-	-
EP4	0.632	14.83	-	-
EP5	0.709	16.61	2252	8.60
EP6	0.823	17.85	2824	8.32
EP7	0.814	18.87	2369	9.36

Tabela 4.10. Resumo das propriedades em tracção dos provetes de adesivo.

Propriedades	Média \pm desvio padrão	C_v [%]
F_{tu} [kN]	0.758 ± 0.068	8.91
σ_{tu} [MPa]	17.33 ± 1.30	7.48
ε_{tu} [μ strain]	2482 ± 302	12.17
E_t [GPa]	8.76 ± 0.54	6.14

No programa experimental desenvolvido por Fonseca [4.4] foram realizados ensaios a três adesivos existentes no mercado após um mês de tempo de cura, de acordo com a mesma norma adoptada no presente estudo. Os valores da tensão de ruptura à tracção variaram entre 7.2 e 26.4 MPa e os do módulo de elasticidade entre 0.86 e 9.20 GPa. Desta forma, analisando os resultados apresentados na tabela 4.11 é possível concluir que estão de acordo com o esperado. Saliente-se que o valor elevado do módulo de elasticidade pode ser explicado pelo prolongado tempo de cura, comparativamente ao dos provetes ensaiados por Fonseca [4.4].

4.2.5. Sistemas de protecção ao fogo

Nos ensaios de resistência ao fogo foram testados dois sistemas de protecção passiva: painéis de silicato de cálcio e argamassa à base de vermiculite e perlite. Ambos os materiais de protecção foram fornecidos pela empresa TRIA.

Os painéis de SC são constituídos por silicato de cálcio hidratado submetido a autoclave e reforçado com fibras especiais que lhe conferem maior estabilidade dimensional e aumentam a resistência ao fogo. São fornecidos em painéis de 1250 mm X 2500 mm, em diferentes espessuras, sendo trabalháveis com o equipamento convencional para madeira. Estes painéis são normalmente utilizados como sistema de protecção passiva em estruturas metálicas, tectos falsos, paredes e condutas de ventilação [4.7]. O fabricante indica as seguintes propriedades dos painéis, que se assumem válidas para a temperatura ambiente: massa volúmica, $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$; condutibilidade térmica, $k = 0.164 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; módulo de elasticidade, $E = 3.55 \text{ GPa}$; resistência à tracção em flexão, $\sigma_{fu} = 5.5 \text{ MPa}$; resistência à tracção pura, $\sigma_{tu} = 2.58 \text{ MPa}$; resistência à compressão, $\sigma_{cu} = 9.8 \text{ MPa}$ [4.8].

O segundo sistema de protecção ao fogo baseia-se na aplicação de uma argamassa composta por inertes leves de vermiculite e perlite, cargas refractárias e ligantes tipo cimento, cuja designação comercial é *Biofire*. A esta mistura é adicionada água, numa relação entre 0.67 e 0.80 l/kg, podendo ser aplicada por projecção ou espalhamento. Este tipo de sistema é normalmente utilizado para proteger estruturas metálicas, de betão e mistas aço-betão. As suas propriedades à temperatura ambiente, indicadas pelo fabricante, são as seguintes: massa volúmica, $\rho = 450$ a 500 kg/m³; condutibilidade térmica, $\lambda = 0.0581$ W/m°C; resistência à compressão, $\sigma_{cu} = 0.8$ MPa [4.8].

Os fabricantes de sistemas de protecção ao fogo de estruturas metálicas disponibilizam tabelas que auxiliam o dimensionamento da espessura da protecção em função do rácio entre o perímetro exposto ao incêndio e a secção do elemento estrutural, das condições de suporte e da exigência do tempo de protecção. No entanto, ainda não existem tabelas deste tipo aplicáveis a vigas de betão armado reforçadas com materiais compósitos. Por esta razão, e tendo em conta a provável vulnerabilidade deste tipo de soluções em situação de incêndio, optou-se por estudar a eficácia dos dois sistemas de protecção referidos, com espessuras consideráveis: 25 mm e 40 mm.

4.3. Determinação das propriedades térmicas e termomecânicas do sistema de reforço

As propriedades termofísicas e termomecânicas dos laminados de CFRP e da resina de colagem utilizadas neste estudo foram determinadas através de análises mecânicas dinâmicas (DMA), realizadas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e de ensaios de calometria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA), realizados no Departamento de Engenharia Química e Biológica do IST.

4.3.1. Análises mecânicas dinâmicas (DMA)

4.3.1.1. Objectivo e fundamento dos ensaios

Os ensaios de análise mecânica dinâmica foram realizados em provetes de laminado de CFRP e de resina de colagem com o objectivo de determinar as respectivas temperaturas de transição vítreia (T_g), que marcam a transição entre o estado vítreo e o viscoso, correspondendo a uma relaxação à qual está associada uma diminuição significativa das propriedades mecânicas dos materiais.

De uma forma geral, a deformação de um material polimérico quando sujeito a um carregamento é composta por uma componente elástica e outra inelástica ou viscosa que depende do tempo. Por esta razão, é possível afirmar que grande parte dos materiais poliméricos exibe um comportamento viscoelástico. Num ensaio de DMA, os provetes são sujeitos a uma força oscilatória sinusoidal com frequência fixa e, enquanto a temperatura aumenta com uma taxa de aquecimento constante, as amplitudes dos ciclos de carregamento e da deformação e o ângulo entre esses ciclos são registados. Devido à resposta viscoelástica do material, as curvas tensão-tempo ($\sigma-t$) e extensão-tempo ($\epsilon-t$) exibem um desfasamento, causado por um atraso na deformação. Quando as duas curvas são sobrepostas, as áreas comuns representam a rigidez do material, ou módulo de armazenamento, E'' , que se relaciona com a energia armazenada em cada ciclo de carregamento. As áreas que não se sobrepõem representam a contribuição viscosa da deformação, ou módulo de perda, E''' , que reflecte a energia dissipada em cada ciclo, normalmente sob a forma de calor. O ângulo de fase, δ , é definido pela diferença entre a tensão e a deformação. Em materiais puramente elásticos este ângulo é nulo, em materiais puramente viscosos o ângulo de fase é de 90° e em

polímeros são usuais valores intermédios. A tangente deste ângulo, $\tan(\delta)$, denominada por factor de perda, é igual ao quociente entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento, $\tan(\delta) = E''/E'$, e é utilizada para avaliar o amortecimento do material [4.9, 4.10].

A determinação da temperatura de transição vítreia através do ensaio de DMA é possível devido ao facto de os módulos de armazenamento e de perda e o factor de perda sofrerem alterações significativas com a temperatura. Quando a temperatura atinge valores próximos da temperatura de transição vítreia, o valor do módulo de armazenamento regista uma forte diminuição, enquanto que o módulo de perda e o factor de perda apresentam consideráveis aumentos. Normalmente, estas variações não ocorrem exactamente à mesma temperatura, sendo que a partir do factor de perda se obtém um majorante da temperatura de transição vítreia, do módulo de armazenamento um minorante e do módulo de perda uma estimativa intermédia. A norma ISO 6721 [4.10, 4.11], seguida no presente estudo, não especifica qual das curvas deve ser considerada para estimar a temperatura de transição vítreia. Por outro lado, a norma ASTM E1640 [4.12], de uma forma conservativa, especifica que a temperatura de transição vítreia deve ser obtida a partir da curva que descreve a variação do módulo de armazenamento com a temperatura, tal como se indica na figura 4.8.

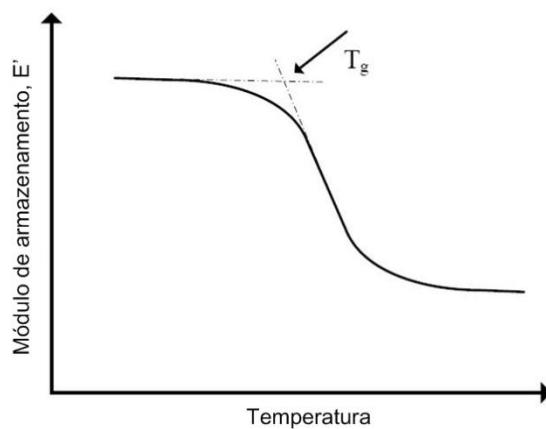


Figura 4.8. Determinação da temperatura de transição vítreia de acordo com a norma ASTM E1640-99 (adaptado de [4.12]).

A temperatura de transição vítreia determinada pelo ensaio de DMA depende, de entre outros parâmetros, da taxa de aquecimento e da frequência oscilatória. Quanto maiores forem os valores destas duas grandezas maior será o valor estimado de T_g . Por esta razão, a norma ASTM E1640 especifica que a temperatura de transição vítreia deve ser determinada com uma taxa de aquecimento de 1 °C/min e com uma frequência de 1 Hz. A norma ISO 6721 apenas refere que taxas de aquecimento entre 1 °C/min e 2 °C/min são aceitáveis. De assinalar ainda que esta temperatura também depende do tipo de esforço introduzido nos provetes (tracção, compressão, corte, flexão ou torção), pois a resposta do material é bastante diferenciada para cada tipo de esforço, sobretudo no caso de polímeros com fibras unidirecionais.

4.3.1.2. Descrição dos ensaios

Os ensaios de DMA foram realizados num aparelho Q800 da marca *TA Instruments*, semelhante ao ilustrado na figura 4.9, existente no LNEC. Neste equipamento podem ser montadas várias configurações de garras, permitindo introduzir nos provetes diferentes tipos de deformação. No presente estudo foram adoptadas 3 garras que, através do movimento cíclico de uma delas (neste

caso, a central), introduzem flexão no provete. Na figura 4.10 observa-se que este esquema de ensaio assemelha-se a um sistema de viga com bordos encastrados e uma carga cíclica pontual a meio vão. Este equipamento tem a capacidade de aplicar cargas até 18 N com uma precisão de leitura de 1×10^{-4} N. Os deslocamentos podem ser medidos com uma precisão de 1×10^{-9} m.



Figura 4.9. Aparelho para ensaios DMA.



Figura 4.10. Sistema de garras de fixação.

Foram ensaiados provetes de adesivo epoxídico e de laminado de CFRP a taxas de aquecimento de 2 °C/min, 5 °C/min e 10 °C/min, com uma frequência de oscilação constante e igual a 1 Hz, entre as temperaturas de 25 °C e 250 °C em ar atmosférico. Do ponto de vista de caracterização do material, respeitando a norma ISO 6721, a taxa de 2 °C/min afigura-se como a mais adequada. No entanto, numa situação de incêndio, as taxas de aquecimento são bastante superiores, pelo que se optou por realizar ensaios com os restantes fluxos, tendo como objectivo estimar a temperatura a partir da qual os dois materiais vêem as propriedades mecânicas diminuídas numa situação real.

Os provetes de adesivo epoxídico foram moldados e ensaiados após aproximadamente 4 meses de cura. Relativamente ao laminado de CFRP, foram cortados provetes com a maior dimensão paralela à direcção das fibras. As dimensões médias das secções estão indicadas na tabela 4.11. O comprimento dos provetes, cerca de 60 mm, foi o necessário para que as garras de extremidade os fixassem convenientemente.

Tabela 4.11. Dimensões médias das secções dos provetes ensaiados.

Fluxo de aquecimento [°C/min]	Provetes de CFRP		Provetes de adesivo	
	Largura [mm]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
2	15.31	1.17	10.06	4.44
5	15.41	1.20	10.08	4.75
10	14.69	1.20	10.04	4.30

4.3.1.3. Análise e discussão dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de DMA para os provetes de CFRP e adesivo apresentam-se nas figuras 4.11 e 4.12, respectivamente. Em ambas as figuras é possível observar a existência de um aumento considerável e posterior redução nos valores do módulo de perda e do factor de perda, e uma redução do módulo de armazenamento com a temperatura. Estas variações são mais acentuadas e ocorrem para menores valores de temperatura nas curvas referentes aos ensaios do adesivo, pelo que é possível concluir que as propriedades físicas deste material são mais afectadas pelo aumento da temperatura do que as dos laminados de CFRP. De referir que nos resultados dos

provetas de CFRP destacam-se máximos locais nas curvas do módulo de perda, o que corresponde a um rearranjo da estrutura interna do material.

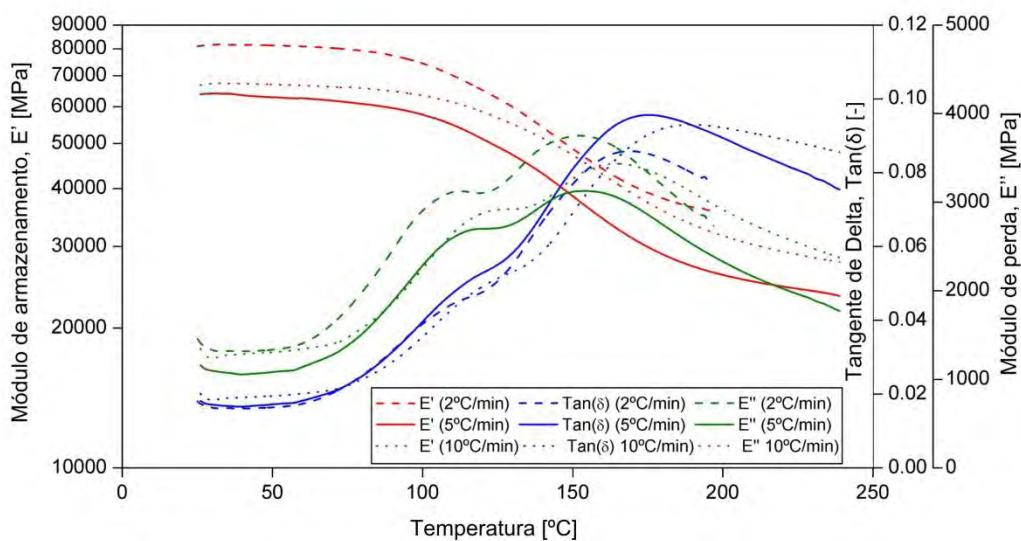


Figura 4.11. Resultados dos ensaios de DMA aos provetes de CFRP: módulo de armazenamento, módulo de perda e factor de perda em função da temperatura, para diferentes taxas de aquecimento.

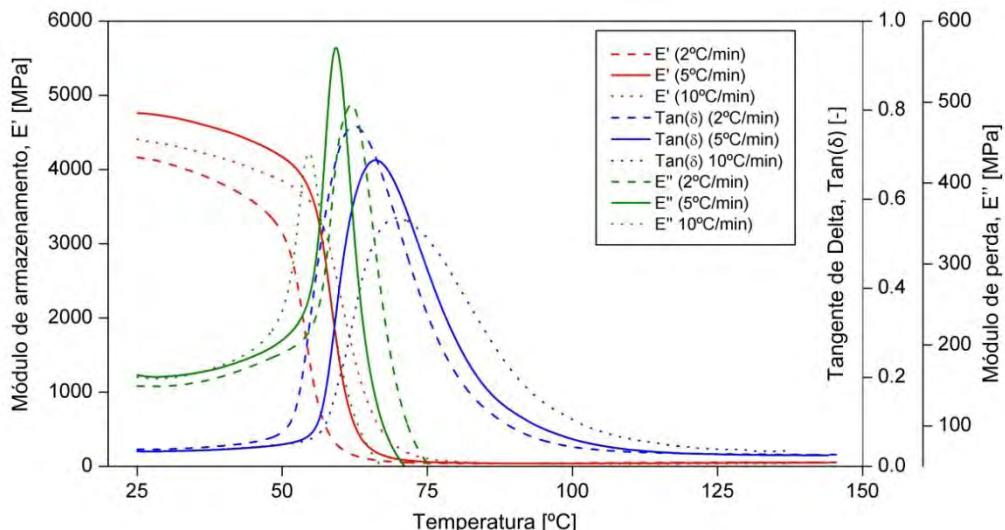


Figura 4.12. Resultados dos ensaios de DMA aos provetes de adesivo: módulo de armazenamento, módulo de perda e factor de perda em função da temperatura, para diferentes taxas de aquecimento.

Nas curvas do módulo de perda e do factor de perda, os valores máximos correspondem à relaxação vítreia do material, sendo, em ambos os casos, estimativas do valor de T_g . Na tabela 4.12 apresentam-se, para cada taxa de aquecimento, as estimativas para a temperatura de transição vítreia obtida por estas duas formas, bem como pela metodologia proposta pela norma ASTM E1640 que recorre ao decaimento da curva do módulo de armazenamento (figura 4.8).

Tabela 4.12. Temperaturas de transição vítreia obtidas pelas diferentes curvas e para cada taxa de aquecimento.

Material	Fluxo de aquecimento [°C/min]	T _g , E' [°C]	T _g , E'' [°C]	T _g , tan(δ) [°C]
CFRP	2	137.6	152.5	168.5
	5	144.4	153.5	175.3
	10	153.4	164.1	190.2
Adesivo	2	53.8	54.5	62.4
	5	58.6	59.4	66.1
	10	59.8	62.1	68.9

Na tabela 4.12 observa-se que para cada fluxo de aquecimento, a estimativa mais elevada da temperatura de transição vítreia é obtida através da curva do factor de perda $\tan(\delta)$ e a menor pelo método gráfico que recorre à curva do módulo de armazenamento E''. Por outro lado, conclui-se que, para cada método, a estimativa do valor de T_g aumenta com a taxa de aquecimento. Tal facto pode ser explicado por um atraso na resposta do material e por uma distribuição de temperatura não uniforme na secção dos provetes quando sujeitos a elevados fluxos de aquecimento. Desta constatação é possível concluir que numa situação real de incêndio, em que as taxas de aquecimento podem ser bastante elevadas, poderá ser demasiado conservativo considerar como “temperatura de segurança” do sistema de reforço o valor da temperatura de transição vítreia, que, de acordo com os documentos normativos, é determinada para taxas de aquecimento bastante inferiores.

A realização destes ensaios permitiu perceber as dificuldades em definir um único valor para a temperatura de transição vítreia, dado a dependência de vários factores, a multiplicidade de métodos para a sua estimativa e o facto de o processo de transição ocorrer não a uma dada temperatura, mas sim ao longo de um intervalo. Desta forma, recorrendo à recomendação presente na norma ASTM E1640 (através da construção geométrica indicada na figura 4.8) e com o objectivo de facilitar a análise dos resultados dos ensaios de resistência ao fogo, optou-se por definir **138 °C** e **54 °C** como valores de referência (indicativos) das temperaturas de transição vítreia dos laminados de CFRP e do adesivo epoxídico, respectivamente.

4.3.2. Ensaios de DSC/TGA

4.3.2.1. Objectivos e fundamento dos ensaios

Os ensaios de calorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA) foram realizados no Departamento de Engenharia Química e Biológica do IST, de acordo com a norma ISO 11357 [4.13]. Nestes ensaios recorreu-se a amostras de laminado de CFRP e de adesivo epoxídico com o objectivo de determinar as variações de massa e de energia em função da temperatura. Através das curvas que descrevem a evolução da primeira grandeza é possível estimar a temperatura de decomposição (T_d) de ambos os materiais. Na figura 4.13 observa-se uma curva massa-temperatura, típica de um ensaio DSC/TGA a um polímero reforçado com fibras, ilustrando o processo de decomposição da matriz polimérica. Nessa figura indica-se uma construção geométrica e 5 pontos notáveis, que podem representar estimativas para o valor de T_d. No entanto, como os documentos normativos não são claros na definição do ponto a utilizar, é comum considerar T_{d,m} com a temperatura de decomposição.

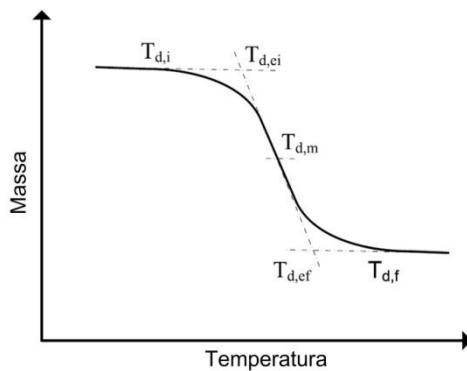


Figura 4.13. Curva típica massa-temperatura de um polímero reforçado com fibras (adaptado de [4.9]).

Neste tipo de ensaios, as amostras de material são colocadas dentro de um forno, sendo sujeitas a uma taxa de aquecimento predefinida num determinado meio ambiente. Durante todo o processo a massa da amostra de material é constantemente monitorizada, permitindo elaborar curvas que descrevem a sua variação em função da temperatura. Além disso, a diferença entre o fluxo de calor fornecido à amostra em análise e um material de referência são medidos em função da temperatura, o que permite identificar variações de energia ao longo de processo de aquecimento e a natureza das reacções que ocorrem, nomeadamente o seu carácter endotérmico ou exotérmico. O material de referência tem de ser termicamente inactivo no intervalo de temperaturas ao qual será sujeita a amostra em estudo, e as suas propriedades térmicas devem ser conhecidas e suficientemente homogéneas para que seja possível a calibração do aparelho de ensaio [4.9, 4.13].

4.3.2.2. Descrição dos ensaios

Os ensaios foram realizados num analisador termogravimétrico da *TA Instruments*, modelo SDT2960, que permite, simultaneamente, realizar ensaios DSG e TGA (Figura 4.14).

As amostras de laminado de CFRP foram obtidas através do corte de paralelepípedos de pequena dimensão a partir da lámina fornecida pela *S&P*. Por outro lado, as amostras de resina resultaram do corte de provetes após um mês de tempo de cura, semelhantes aos utilizados nos ensaios descritos em 4.3.1, tendo-se obtido pequenos grânulos. As amostras de CFRP e resina, com massas iniciais de 11.87 mg e 2.69 mg, respectivamente, foram colocadas no interior de um cadinho de platina (Figura 4.15) e aquecidas em ar atmosférico, da temperatura ambiente até cerca de 1000°C, no caso do CFRP, e 800°C, no caso da resina, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Procedeu-se à medição e registo do tempo, da temperatura, da massa e do fluxo de calor em cada um dos ensaios.



Figura 4.14. Analisador DSC/TGA.



Figura 4.15. Cadiños de platina para colocação de amostras de referência e de análise.

4.3.2.3. Análise e discussão dos resultados

As figuras 4.16 e 4.17 mostram, para os laminados de CFRP e para o adesivo, a evolução da massa e respectiva derivada em ordem ao tempo, e o fluxo de calor em função da temperatura, respectivamente.

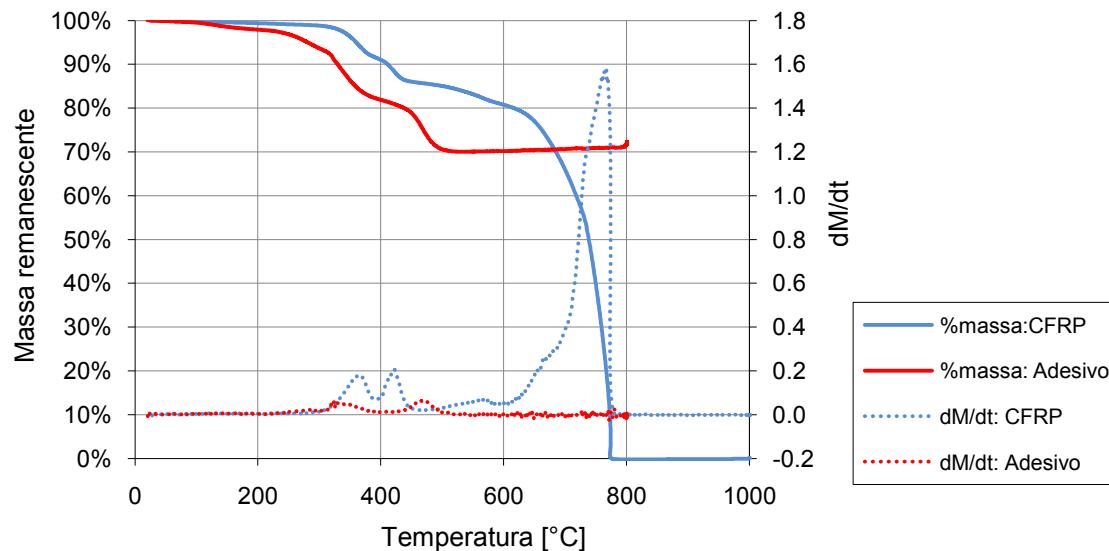


Figura 4.16. Massa remanescente em função da temperatura e respectiva derivada.

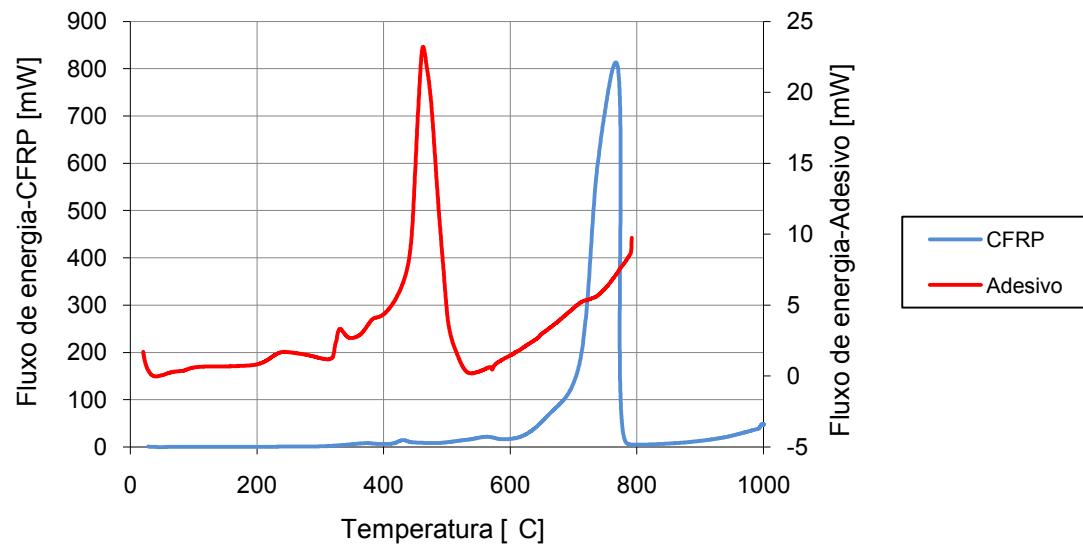


Figura 4.17. Fluxo de energia em função da temperatura.

A percentagem de massa remanescente relativa à amostra de CFRP apresenta duas diminuições significativas, uma entre 350°C e 425°C, e outra entre 625°C e 775°C. Tal como se observa pelo valor da derivada da massa em ordem ao tempo, a segunda diminuição ocorre a uma taxa bastante superior. É possível afirmar que o primeiro intervalo corresponderá, na sua maioria, à decomposição da matriz polimérica, enquanto que no segundo ocorre a decomposição das fibras de carbono. A partir de 775°C toda a amostra foi decomposta, o que indica uma percentagem nula de matéria inorgânica neste material. Pela observação da figura 4.17 conclui-se que existe uma correspondência entre a decomposição das fibras de carbono, identificada na figura 4.16, e o “pico” do fluxo de energia

registado entre 625°C e 775°C. Este “pico” exotérmico deve-se ao elevado calor gerado pela ignição e queima das fibras. A temperatura de decomposição do CFRP foi estimada com base no método gráfico apresentado na figura 4.13 aplicado à primeira diminuição significativa da massa (figura 4.16), tendo-se obtido o valor de $T_{d,m} = 380.3^\circ\text{C}$. A esta temperatura verifica-se uma diminuição da massa de 7.7%.

Relativamente à resina epoxídica, verifica-se uma diminuição considerável da massa entre 200°C e 500°C, à qual corresponde um “pico” exotérmico na curva apresentada na figura 4.17. A partir de 500°C não se registaram alterações significativas no valor da massa, concluindo-se que este material é constituído em 72% por matéria inorgânica. A temperatura de decomposição foi determinada pelo método indicado anteriormente, tendo-se obtido $T_{d,m} = 379.1^\circ\text{C}$, correspondendo a 82.9% de massa remanescente.

4.3.2.4. Resultados obtidos em estudos anteriores

Na campanha experimental realizada por Correia [4.9] foram realizados ensaios de DSC/TGA aos materiais de protecção ao fogo utilizados no presente estudo. Seguidamente, apresentam-se as principais conclusões obtidas nos referidos ensaios.

a) Argamassa de vermiculite e perlite

Os ensaios realizados a este material de protecção permitiram concluir que entre 110°C e 160°C ocorre a evaporação da água livre, enquanto que a água de constituição apenas é libertada entre 700°C e 800°C. Para temperaturas da ordem de 1000°C a massa remanescente é cerca de 75%.

b) Silicato de cálcio

Neste material de protecção a variação da massa é praticamente linear com a temperatura até cerca de 700°C. Até este valor ocorre a evaporação da água livre, a desidratação do “gel de silicato de cálcio”, a desidratação do hidróxido de cálcio e a descarbonatação do carbonato de cálcio. A partir de 700°C não se registam alterações na massa, restando 81% do valor inicial. Relativamente às oscilações do fluxo de calor, estas são bastantes inferiores às registadas na argamassa de vermiculite e perlite, dado que a protecção de VP contém uma quantidade de água livre bastante superior.

4.4. Ensaios de flexão das vigas de referência

Foram realizados ensaios de resistência mecânica a duas vigas de referência, simplesmente apoiadas num vão de 1.50 m, com o objectivo de confirmar experimentalmente o dimensionamento efectuado e o seu comportamento para o nível de carga em situação de incêndio. Além disso, pretendeu-se determinar os seus modos de ruptura e respectivas cargas de colapso. Por uma razão de simplicidade será utilizada a seguinte nomenclatura: viga VA para a viga de referência em betão

armado sem qualquer sistema de reforço e *viga VB* para a viga de referência em betão armado reforçada à flexão com laminados de CFRP.

O tipo de carregamento destas duas vigas foi idêntico ao utilizado nos ensaios de resistência ao fogo, duas cargas concentradas aplicadas a uma distância dos apoios de 1/3 de vão. O modelo de cálculo adoptado está ilustrado na figura 4.18. Refira-se que o comprimento total da viga é 2.10 metros, no entanto, para efeitos de cálculo, foram desprezadas as consolas indicadas a traço interrompido na figura 4.18.

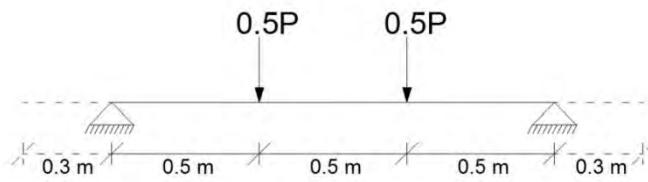


Figura 4.18. Modelo de cálculo adoptado.

4.4.1. Dimensionamento das vigas de betão armado e do sistema de reforço

As dimensões adoptadas para a secção das vigas, 12 cm de altura e 10 cm de largura, resultaram numa esbelteza geométrica ($L_{vão}/h_{secção}$) de 12.5. Foram adoptadas armaduras que conduziram a taxas de reforço usuais para vigas de betão armado. Nas figuras 4.19 e 4.20 apresentam-se, respectivamente, a distribuição de armaduras ao longo das vigas e a pormenorização de uma secção genérica.

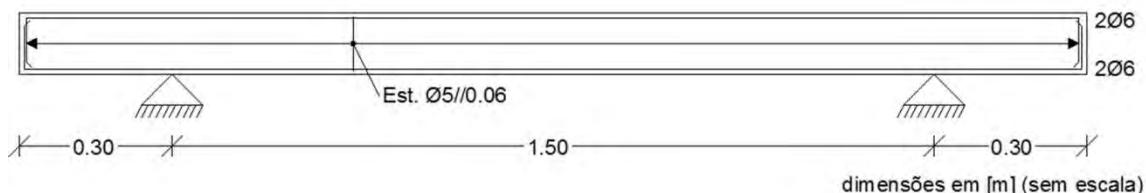


Figura 4.19. Distribuição longitudinal das armaduras das vigas.

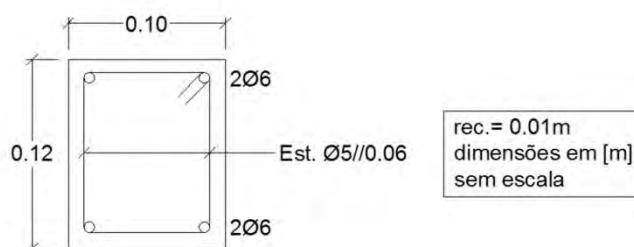


Figura 4.20. Pormenorização de armaduras numa secção genérica das vigas.

4.4.1.1. Viga VA – sem reforço

Neste ponto do presente documento apresenta-se o resumo das principais verificações de segurança efectuadas à *viga VA*, tendo por objectivo a confirmação do dimensionamento apresentado nas figuras 4.19 e 4.20. No Anexo II.1 estão presentes os cálculos justificativos do respectivo dimensionamento.

Numa primeira fase, verificou-se que a armadura longitudinal adoptada é superior à armadura mínima especificada no Eurocódigo 2. Seguidamente, recorrendo a tabelas de betão armado [4.14], calcularam-se os momentos flectores resistentes, considerando os valores de cálculo ($M_{rd,VA}$) e médios ($M_{rm,VA}$) das propriedades dos materiais. Obtiveram-se os momentos flectores resistentes $M_{rd,VA} = 1.9 \text{ kN.m}$ e $M_{rm,VA} = 3.2 \text{ kN.m}$.

Relativamente às verificações de segurança que envolvem o esforço transverso, adoptou-se a filosofia sugerida no Eurocódigo 2. Verificou-se que a área de armadura adoptada resistente ao esforço transverso é bastante superior ao valor mínimo especificado naquele regulamento. Os valores obtidos dos esforços transversos resistentes, considerando os valores de cálculo ($V_{rd,VA}$) e médios ($V_{rm,VA}$) das propriedades dos materiais são $V_{rd,VA} = 33.1 \text{ kN}$ e $V_{rm,VA} = 55.0 \text{ kN}$.

Recorrendo aos valores anteriores dos esforços resistentes e aos diagramas de esforços apresentados na figura 4.21, obtiveram-se os seguintes valores de cálculo ($P_{rd,VA}$) e médio ($P_{rm,VA}$) para a carga resistente:

- $P_{rd,VA} = 7.6 \text{ kN}$, sendo o modo de rotura por flexão, considerando os valores de dimensionamento das propriedades dos materiais;
- $P_{rm,VA} = 12.8 \text{ kN}$, igualmente com o modo de rotura por flexão, mas considerando os valores médios das propriedades dos materiais.

De referir que no procedimento de cálculo não foi contabilizado o peso próprio da viga. Como este representa, no máximo, cerca de 6% do valor de cálculo da carga de rotura, optou-se por desprezá-lo. Esta simplificação será assumida ao longo de todo o documento.

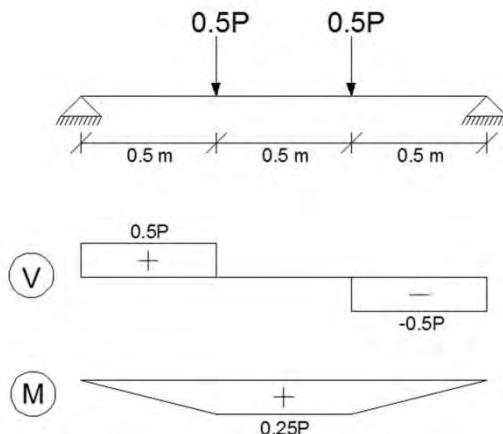


Figura 4.21. Diagrama de esforço transverso (ao meio) e de momento fletor (em baixo) para o carregamento indicado.

Em ensaios de resistência mecânica de vigas de betão armado, a carga que provoca a fendilhação da peça (P_{cr}) é um dos valores notáveis. O momento de fendilhação (M_{cr}) é dado pelo produto do módulo de flexão elástico (W_{el}) pelo valor médio da resistência do betão à tracção ($f_{ctm,28dias}$). Para a situação em causa obteve-se $M_{cr,VA} = 0.5 \text{ kN.m}$ e $P_{cr,VA} = 2.1 \text{ kN}$.

No presente programa experimental, a carga a aplicar durante os ensaios de resistência ao fogo surge como um valor de carregamento bastante importante. Segundo a norma ISO 834 [4.14] essa carga deverá corresponder à da combinação quase permanente de acções, que se considerou ser o valor que provoca na viga uma flecha de $L/250$, em que L é o vão livre da viga em metros. Desta

forma, foi necessário estimar qual o valor da carga que provoca esse deslocamento ($P_{\delta=L/250}$). Para tal, recorreu-se ao método dos coeficientes globais. Para aplicar este método foi necessário calcular a flecha elástica da viga, valor que foi obtido com recurso ao princípio dos trabalhos virtuais. Dado que nos ensaios experimentais de resistência ao fogo o carregamento actuará, no máximo, durante 4 horas, optou-se por desprezar a parcela de deformação a longo prazo. Assim, obteve-se $P_{\delta=L/250,VA} = 9.5 \text{ kN}$.

Na tabela 4.13 resumem-se os valores dos esforços e das cargas, apresentados anteriormente.

Tabela 4.13. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VA.

Parâmetro	Valor
$M_{rd,VA} [\text{kN.m}]$	1.9
$M_{rm,VA} [\text{kN.m}]$	3.2
$V_{rd,VA} [\text{kN}]$	33.1
$V_{rm,VA} [\text{kN}]$	55.0
$P_{rd,VA} [\text{kN}]$	7.6
$P_{rm,VA} [\text{kN}]$	12.8
$M_{cr,VA} [\text{kN/m}]$	0.5
$P_{cr,VA} [\text{kN}]$	2.1
$P_{\delta=L/250,VA} [\text{kN}]$	9.5

Pela observação da tabela anterior destaca-se o facto de o valor de cálculo da carga última ($P_{rd,VA}$) ser inferior à estimativa da carga que provoca o deslocamento de $L/250$ ($P_{\delta=L/250,VA}$). Note-se que se considerou a carga para uma combinação de acções quase permanente equivalente a $P_{\delta=L/250,VA}$, situação que não é corrente no dimensionamento de estruturas de betão armado. Tomou-se esta opção por não existir à partida um conjunto de acções actuantes claramente definidas. No entanto, o que este resultado mostra é que, para a viga VA, não é correcto comparar o valor de $P_{\delta=L/250,VA}$ a uma carga de serviço. Assim caso a carga de serviço fosse correctamente definida, a flecha associada seria consideravelmente inferior a $L/250$. Este conjunto de resultados mostra que o estado limite último de flexão foi condicionante no dimensionamento.

4.4.1.2. Viga VB – com reforço

Neste ponto apresenta-se um conjunto de resultados que justificam o dimensionamento da secção dos laminados que irão reforçar à flexão a viga de betão armado. No Anexo II.2 estão presentes os cálculos justificativos do respectivo dimensionamento. A pormenorização de armaduras, idêntica à da viga VA, é a indicada nas figuras 4.22 e 4.23.

No procedimento de cálculo foram seguidas, simultaneamente, recomendações sugeridas pelo ACI 440.2R-08 [4.16], pelo Bulletin 14 da fib [4.17], pelas especificações do fabricante dos laminados [4.18], pelo Eurocódigo 2 no que refere às verificações relacionadas com o esforço transverso e pelo manual produzido por Bank [4.19]. O critério de dimensionamento adoptado foi o da flecha máxima, tendo sido considerado o valor de $L/250$ para a “carga de serviço”, de acordo com o especificada no documento normativo ISO 834 [4.14]. No entanto, devido a limitações na oferta do fabricante, optou-se por impor uma dada secção de laminado e, com essa, estimar a carga que seria necessário aplicar para se obter a deformação pretendida. Posteriormente foi efectuado um conjunto de verificações, ao estado limite e em serviço, que permitiram validar o dimensionamento efectuado.

O laminado adoptado, cujas propriedades mecânicas estão definidas no ponto 4.2.3, apresenta uma secção de 50 mm × 1.2 mm e tem a denominação comercial de S&P CFK Laminates CFK 150/2000-50/1.2. As propriedades da resina de colagem estão definidas em 4.2.4. O comprimento do laminado é de 1.35 m, coincidente com a largura do forno onde serão realizados os ensaios de resistência ao fogo. Refira-se que o critério de escolha do comprimento do laminado está relacionado com o comportamento das vigas ao fogo, aspecto esse que será aprofundado no ponto 4.5. Nas figuras 4.22 e 4.23 apresentam-se, respectivamente, um corte longitudinal da viga VB e a pormenorização da secção de meio vão.

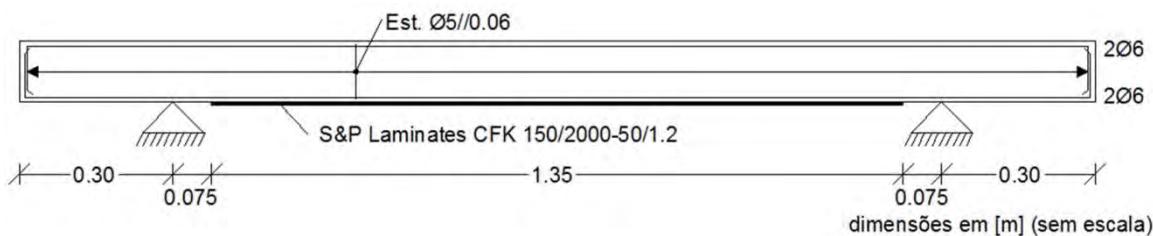


Figura 4.22. Corte longitudinal da viga VB.

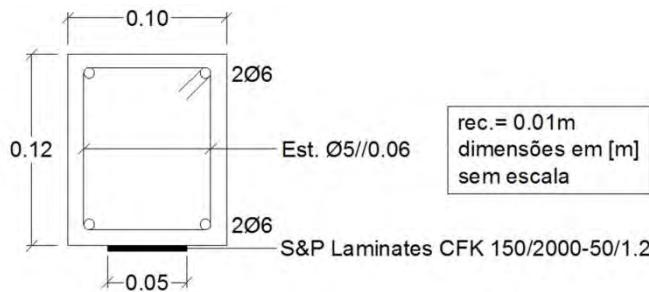


Figura 4.23. Pormenorização da secção de meio vão da viga VB.

O valor da carga que provoca na viga VB uma flecha de L/250 ($P_{\delta=L/250,VB}$) foi obtido com recurso à expressão da flecha elástica (calculada através do princípio dos trabalhos virtuais – ver expressão II.5 do Anexo II.1), na qual se substituiu a rigidez de flexão elástica (EI) pela rigidez de flexão da secção composta (reforçada) em estado fendilhado (EI_2). O valor de (EI_2) foi determinado pela formulação sugerida no manual de Bank [4.19], cuja explicação se encontra no Anexo II.2. Desta forma, obteve-se $P_{\delta=L/250,VB} = 16.4 \text{ kN}$. Neste procedimento de cálculo considerou-se que a rigidez de flexão (EI_2) era constante ao longo de toda a viga, o que não se verifica na realidade. No entanto, assumiu-se como válida essa simplificação.

Relativamente ao comportamento em serviço da viga reforçada, o regulamento ACI 440.2R-08 [4.16] recomenda que a tensão na armadura ordinária deverá ser inferior a 85% da sua tensão de cedência, a tensão de compressão no betão inferior a 45% da sua tensão resistente e a tensão no CFRP inferior a 55% do valor de σ_{fu} . Em virtude do critério de dimensionamento do sistema de reforço ter sido o da flecha admissível, verificou-se, posteriormente, que tal opção não permitiu que as duas primeiras recomendações fossem respeitadas. Para a carga que provoca a flecha de L/250 estima-se que a tensão de tracção nas armaduras atinja 340.0 MPa, sendo a tensão de compressão no betão de 23.9 MPa e a de tracção no laminado de CFRP de 335.0 MPa. No entanto, refira-se que não é totalmente correcto afirmar que o valor de $P_{\delta=L/250,VB}$ corresponde a uma situação de serviço, dado que não foram definidas acções. Assim, para a situação em causa, considera-se que a não verificação de tal critério não adquire uma grande relevância.

A verificação da segurança ao estado limite último de flexão foi efectuada com recurso ao método do diagrama rectangular simplificado (MDRS) e às recomendações presentes no ACI 440.2R-08 [4.16], através das quais se obteve um momento resistente de dimensionamento $M_{rd,VB} = 5.1 \text{ kN.m}$. A este momento corresponde uma carga de rotura de dimensionamento $P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4 \text{ kN}$. A rotura por flexão ocorre por esmagamento do betão, quando no aço se verifica a extensão $\varepsilon_s = 4.0\%$ (aço em cedência) e no laminado a extensão $\varepsilon_f = 5.3\%$ (o que corresponde a uma tensão de 842 MPa). No entanto, como a extensão no aço é inferior o 5.0% classifica-se a rotura como semi-dúctil [4.16].

Com o objectivo de estimar o valor médio do momento resistente da viga ($M_{rm,VB}$), foi seguido o mesmo procedimento de cálculo, considerando agora os valores médios das propriedades dos materiais. Obteve-se um momento resistente médio $M_{rm,VB} = 8.1 \text{ kN.m}$, ao qual corresponde a carga de rotura média $P_{rm,VB}^{\text{flexão}} = 32.3 \text{ kN}$.

Em relação à viga VA, prevê-se que o sistema de reforço apresentado nas figuras 4.22 e 4.23 permita aumentar em 168% o momento resistente, considerando os valores de dimensionamento, e em 151% quanto se utilizam as propriedades médias dos materiais. O regulamento ACI 440.2R-08 [4.16] em vez de fixar uma percentagem máxima para o aumento da capacidade resistente, refere que a viga de betão armado não reforçada deverá resistir a determinadas percentagens das cargas permanente e variável. No presente documento, estes valores não estão definidos, visto o objectivo principal ser a avaliação do comportamento ao fogo de vigas sujeitas a uma carga que provoca a flecha de $L/250$. Ainda assim, é possível afirmar que a taxa de reforço conseguida com o sistema apresentado é bastante elevada.

As verificações de segurança ao estado limite último de esforço transverso são em tudo idênticas às apresentadas em 4.4.1.1, pelo que se obteve $V_{rd,VB} = 33.1 \text{ kN}$ e $V_{rm,VB} = 55.0 \text{ kN}$.

Tal como efectuado para a viga VA, calculou-se o momento de fendilhação da viga VB ($M_{cr,VB}$) e a respectiva carga ($P_{cr,VB}$). Determinou-se o centro de rigidez da secção reforçada, seguindo-se o cálculo da sua inércia ($I_{\text{total}} = 1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^4$). Recorrendo ao valor da inércia, da tensão resistente do betão à tracção e à distância entre o centro de rigidez e a fibra inferior da secção, calculou-se o momento de fendilhação $M_{cr,VB} = 0.6 \text{ kN.m}$, a que corresponde uma força $P_{cr,VB} = 2.2 \text{ kN}$.

Foram ainda efectuadas verificações que permitiram averiguar a ocorrência de mecanismos de rotura por delaminação/arrancamento. Como o ACI 440.2R-08 [4.16] não apresenta uma formulação explícita para estas verificações, optou-se por recorrer ao Bulletin 14 da fib [4.17].

Relativamente à carga que provoca a ocorrência de um modo de rotura por perda de aderência betão-CFRP numa zona afastada da extremidade do laminado ($P_{rd,VB}^{\text{aderência}}$), obteve-se $P_{rd,VB}^{\text{aderência}} = 23.1 \text{ kN}$, superior à estimativa da carga que provoca a rotura por flexão na secção de meio vão ($P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4 \text{ kN}$), pelo que se prevê que aquele modo de rotura não ocorrerá. Esta conclusão é também válida para os valores médios das propriedades materiais, pois obteve-se $P_{rm,VB}^{\text{aderência}} = 37.5 \text{ kN}$, superior à estimativa da carga média que provoca a rotura por flexão na secção de meio vão ($P_{rm,VB}^{\text{flexão}} = 32.3 \text{ kN}$).

Por último, recorrendo novamente às recomendações presentes no Bulletin 14 da fib [4.17], foi efectuada uma verificação de segurança relativa à zona de extremidade do laminado, na qual se procedeu ao cálculo da secção de dispensa do laminado, que se denominou por secção X''_1 . Da aplicação do respectivo procedimento de cálculo obteve-se que a secção X''_1 se localiza a 56 mm do apoio. Observando a figura 4.22, conclui-se que o laminado foi dispensado a 75 mm do apoio. Tal como referido anteriormente, adoptou-se o comprimento de 1.35 m para o laminado apenas para que coincidisse com a dimensão do forno onde vão ser realizados os ensaios de resistência ao fogo. No

entanto, em face dos resultados obtidos, conclui-se que tal opção poderá conduzir a um mecanismo de rotura de arrancamento na zona de extremidade do laminado.

Finalmente, na tabela 4.14 resumem-se os principais valores dos esforços e das cargas, apresentados nas páginas anteriores.

Tabela 4.14. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VB.

Parâmetro	Valor
$M_{rd,VB}$ [kN.m]	5.1
$M_{rm,VB}$ [kN.m]	8.1
$V_{rd,VB}$ [kN]	33.1
$V_{rm,VB}$ [kN]	55.7
$P_{rd,VB}^{\text{flexão}}$ [kN]	20.4
$P_{rm,VB}^{\text{flexão}}$ [kN]	32.3
Paderência $[kN]$ $P_{rd,VB}$	23.1
Paderência $[kN]$ $P_{rm,VB}$	37.5
$M_{cr,VB}$ [kN/m]	0.6
$P_{cr,VB}$ [kN]	2.2
$P_{\delta=L/250,VB}$ [kN]	16.4

4.4.2. Fabrico das vigas

As vigas VA e VB foram fabricadas no LERM. Numa primeira fase procedeu-se à montagem das armaduras de acordo com a pormenorização apresentada nas figuras 4.19 e 4.20. Na secção do meio vão das vigas foram colocados 4 extensómetros (um em cada varão longitudinal) com a referência FLA-5-11 e comercializados pela empresa TML. Nas figuras 4.24 a) e 4.24 b) observam-se, respectivamente, um pormenor das armaduras longitudinais com os extensómetros instalados e um esquema com a nomenclatura utilizada para identificar a posição de cada um deles. Refira-se que na figura 4.24 a) os extensómetros já se encontram protegidos com uma manga plástica para evitar que fossem danificados durante as operações de betonagem. Após a montagem, as armaduras foram introduzidas em cofragens de contraplacado, previamente pulverizadas com óleo descofrante. Note-se que foram incluídos espaçadores do tipo “roseta” com o objectivo de garantir um recobrimento mínimo de 1 cm, tal como se observa na figura 4.24 c).

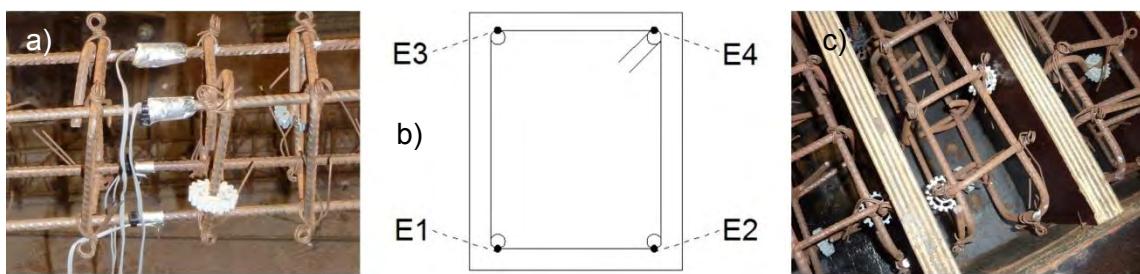


Figura 4.24. a) pormenor dos extensómetros nos varões longitudinais; b) esquemas com a nomenclatura utilizada ao longo do documento; c) pormenor das armaduras no interior das cofragens com os espaçadores do tipo roseta.

A fase seguinte correspondeu à produção de betão de acordo com a composição indicada na tabela 4.2. Para aferir a massa necessária dos componentes por cada amassadura recorreu-se a uma balança digital com precisão de 1 grama. As amassaduras foram elaboradas numa betoneira

basculante eléctrica, tal como se ilustra na figura 4.25 a). Num processo simultâneo, o betão foi sendo progressivamente colocado nas cofragens e nos moldes dos provetes cúbicos e cilíndricos com recurso a uma pá, e vibrado com um vibrador de agulha (processo ilustrado na figura 4.25 b). Refira-se que por uma razão de economia de tempo e meios, a betonagem de todas as vigas (*vigas de referência VA e VB* e as destinadas aos ensaios de resistência ao fogo) foi efectuada no mesmo dia. Após se garantir, através de uma vibração cuidada, que todas as armaduras se encontravam convenientemente envolvidas por betão, procedeu-se à regularização da superfície das vigas, tal como observado na figura 4.25 c).



Figura 4.25. a) betoneira basculante eléctrica; b) colocação e vibração simultânea do betão; c) regularização da superfície do betão.

Durante os 5 dias que se seguiram à betonagem, a superfície do betão foi mantida húmida através de regas sucessivas, com o objectivo de minimizar o desenvolvimento de fendas associadas ao processo de retracção por secagem. Após esse período procedeu-se à descofragem das vigas e à desmoldagem dos provetes (figura 4.26 a).

Relativamente à viga VB, foi necessário preparar a sua face inferior com um martelo de agulhas (figura 4.26 b), tendo como objectivo promover uma correcta aderência betão-resina. Neste procedimento houve o cuidado de regular a pressão do martelo de forma a reduzir ao máximo a micro-fissuração introduzida pela sua vibração/impacto, visto ter sido realizado apenas 15 dias após a betonagem. No final desta operação a superfície do betão apresentava um aspecto rugoso, tal como se observa na figura 4.26 c).



Figura 4.26. a) vigas após descofragem; b) preparação da superfície do betão com martelo de agulhas; c) aspecto da superfície do betão após preparação com martelo de agulhas.

A última fase do fabrico da viga VB correspondeu à aplicação do sistema de reforço. Antes de aplicar a resina de colagem foi necessário limpar a superfície do betão, eliminando todos os detritos que comprometeriam a aderência. As faces do laminado foram igualmente limpas com um líquido desengordurante. Refira-se que estes dois pormenores têm um papel preponderante no bom funcionamento do reforço. Seguidamente, misturaram-se os dois componentes da resina de colagem com recurso a um misturador eléctrico, até o seu aspecto ser homogéneo. Tal como indicado nas especificações do fabricante, com a ajuda de uma espátula aplicou-se uma camada de resina com

cerca de 1 mm de espessura na superfície do betão (figura 4.27 a). Uma outra camada, com cerca de 2 mm de espessura, foi aplicada na superfície do laminado com recurso a uma peça metálica construída especificamente para o efeito (figura 4.27 b). Finalmente, o laminado foi colocado na sua posição final, sendo pressionado por um rolo metálico de forma a eliminar possíveis vazios e a promover a ligação das duas camadas de resina (figura 4.27 c).

Após a instalação do sistema de reforço, a viga VB foi colocada em repouso à temperatura ambiente para permitir a cura da resina (segundo o fabricante, o tempo de cura deve ser no mínimo 3 dias). Alguns dias após a aplicação do laminado foi-lhe aplicado um extensómetro (tipo 20/120LY41, marca HBM) na secção de meio vão da viga, que se denominou por E5.



Figura 4.27. a) aplicação de uma camada de resina sobre a superfície de betão; b) aplicação de uma camada de resina sobre a superfície do laminado; c) rolo metálico a realizar pressão sobre o laminado.

4.4.3. Esquema e procedimento de ensaio

O esquema de ensaio adoptado para as vigas de referência (coerente com o modelo de cálculo apresentado na figura 4.18) está ilustrado na figura 4.28. Tal como referido anteriormente, caracteriza-se por uma viga simplesmente apoiada com um carregamento simétrico, composto de duas cargas pontuais aplicadas a uma distância dos apoios igual a 1/3 do comprimento do vão.

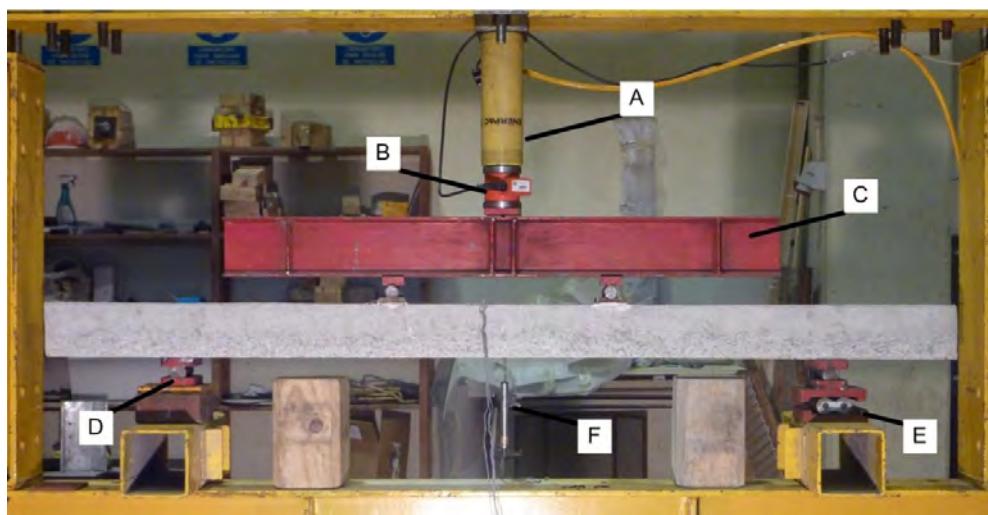


Figura 4.28. Esquema de ensaio das vigas de referência. A - macaco hidráulico; B - célula de carga; C - viga de distribuição de carga; D - apoio fixo; E - apoio móvel; F – deflectómetro.

Com recurso a um macaco hidráulico com capacidade de 200 kN (marca Enerpac) a carga foi transmitida à viga em dois pontos através de uma viga de distribuição metálica. Optou-se por introduzir uma célula de carga (da marca Novatech e com 200 kN de capacidade) entre a viga de distribuição e o macaco hidráulico, pois concluiu-se que seria a forma mais correcta de medir a força

total aplicada. O deslocamento a meio vão foi medido por um deflectómetro da marca *APEK* com 50 mm de curso e 0.001 mm de precisão. O registo dos valores da carga, deslocamento e extensões foi realizado em PC por intermédio de uma unidade de aquisição de dados de 100 canais, da marca *HBM* e modelo UPM100.

O procedimento de ensaio pode descrever-se pelas seguintes fases:

- **1^a Fase:** carregamento até à carga $P_{\delta=L/250}$ prevista (9.5 kN e 16.4 kN, nas *vigas VA* e *VB*, respectivamente), seguido de uma descarga total;
- **2^a Fase:** carregamento até ao valor de cálculo da carga de rotura por flexão (7.6 kN e 20.4 kN, nas *vigas VA* e *VB*, respectivamente), seguido de uma descarga total;
- **3^a Fase:** carregamento até à rotura da viga.

No entanto, devido a uma falha no sistema de leitura no decorrer do ensaio à *viga VA*, não foi possível cumprir integralmente o procedimento anterior – nesta viga a carga aplicada na 1^a fase foi de 5.8 kN.

Note-se que antes de cada uma das descargas referidas foram medidas as aberturas de fendas a meio vão das vigas.

Não é possível determinar exactamente a velocidade a que o carregamento foi aplicado, pois o sistema de controlo do macaco hidráulico foi operado manualmente. No entanto, tentou-se que esta fosse relativamente lenta, aproximadamente constante e igual para as duas vigas.

4.4.4 Resultados e discussão

Neste ponto do presente documento serão apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios às *vigas de referência VA* e *VB*. No entanto, não se procederá a uma análise exaustiva dos mesmos, visto que o objectivo principal do trabalho é estudar o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com CFRP.

Na figura 4.29 apresentam-se os diagramas que traduzem a evolução do valor da força total em função do deslocamento da secção de meio vão em ambas as vigas.

O gráfico momento flector-curvatura da secção de meio vão está ilustrado na figura 4.30. Refira-se que os valores de curvatura foram determinados com base nos valores das leituras dos extensómetros da armadura longitudinal, presentes no anexo III. No caso da *viga VA*, a partir da carga de 15 kN, verificou-se uma diminuição nos valores das extensões de compressão e tracção, sendo, por isso, desprezados no cálculo da curvatura. Esta afirmação pode ser comprovada pela observação do gráfico 1 presente no referido anexo. Estas leituras anómalas poder-se-ão dever a falhas nos extensómetros, motivadas por um possível descolamento destes sensores. De facto, verificou-se que o colapso desta viga ocorreu devido à rotura (por flexão) da secção onde estavam instalados os extensómetros, o que poderá comprovar a afirmação anterior.

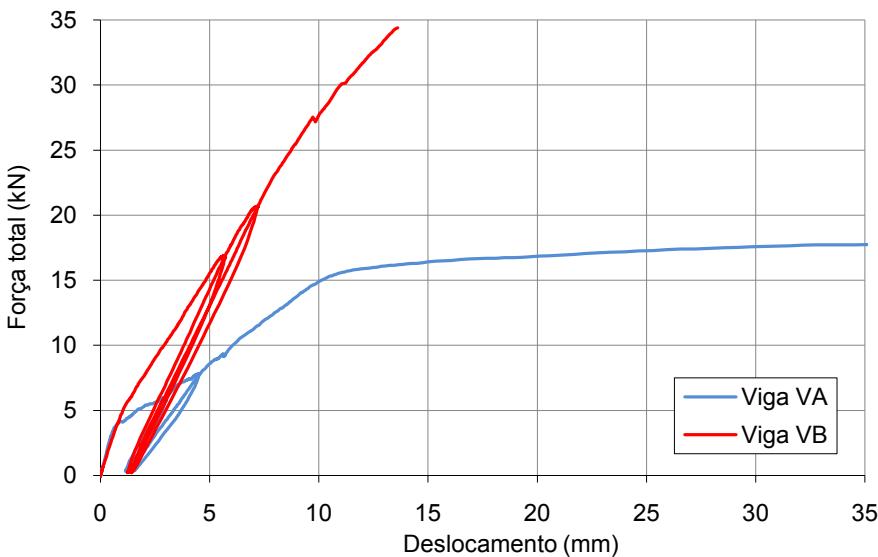


Figura 4.29. Diagramas força-deslocamento das vigas VA e VB na secção de meio vão.

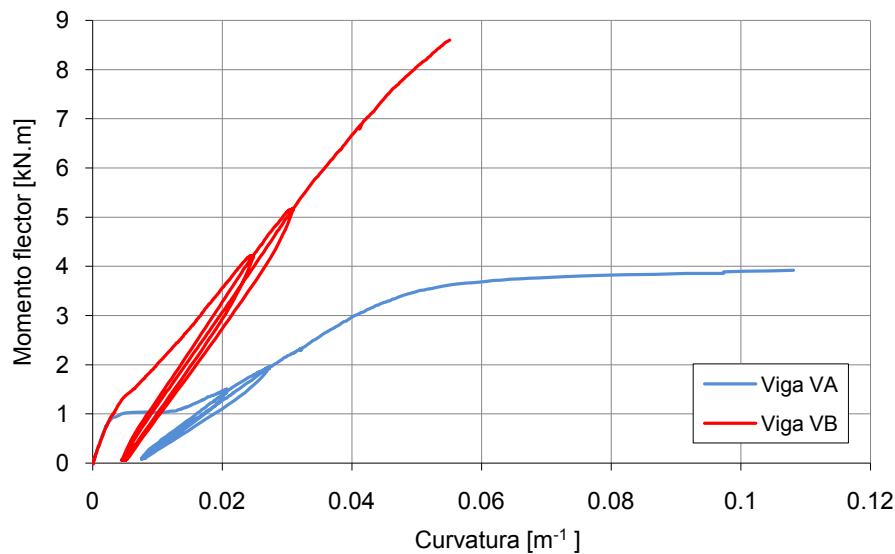


Figura 4.30. Diagramas momento-curvatura das vigas VA e VB na secção de meio vão.

Relativamente ao diagrama força-deslocamento da viga VA, são visíveis três andamentos distintos, associados, cada um, a valores de rigidez diferentes. Desde o início do carregamento até um valor de carga da ordem dos 3.7 kN constata-se o maior declive do diagrama, correspondendo ao valor da rigidez elástica da viga. A partir desta carga, e até cerca de 15 kN, verifica-se que cada incremento no valor da força está associado um maior deslocamento na secção de meio vão, o que pode ser explicado pelo facto de, para este intervalo de valores, algumas secções da viga já se encontrarem fendilhadas. Para cargas superiores a 15 kN, as armaduras inferiores da viga já atingiram a sua tensão de cedência, dado que o declive do diagrama evidencia uma rigidez com um valor bastante inferior. Esta afirmação pode ser comprovada por observação do gráfico do momento fletor em função da curvatura da secção de meio vão (figura 4.30), onde na viga VA, a partir do momento 3.75 kN.m (momento causado pela carga de 15 kN), a curvatura da secção regista um aumento significativo.

No que diz respeito às duas descargas efectuadas, verifica-se que o andamento dos diagramas quando se procede à descarga é praticamente idêntico ao que se obtém quando o valor da carga inicial é retomado. Este é um padrão típico de comportamento de vigas de betão armado.

Pela observação do gráfico força-deslocamento relativo à viga VB conclui-se que a adição do laminado de CFRP foi responsável por um aumento considerável da carga de colapso e da rigidez de flexão da viga após a fendilhação do betão. É visível uma ligeira alteração no declive no diagrama aos 6 kN, motivada pela fendilhação do betão. Pelos diagramas força-deslocamento e momento-curvatura não é possível identificar o ponto em que as armaduras atingem a cedência. No entanto, consultando a leitura dos valores de extensão das armaduras inferiores (gráfico 2 do Anexo III), concluiu-se que este fenómeno ocorreu a partir dos 30 kN, aproximadamente. A adição de uma área considerável de reforço levou a que a cedência das armaduras não implicasse uma redução drástica da rigidez da viga, situação que se observou na viga VA. Contudo, apesar do aumento da resistência última, o reforço não permitiu tirar o total partido da ductilidade do aço das armaduras, pois o colapso da viga ocorreu de forma frágil devido ao descolamento prematuro do laminado. Acrescente-se que próximo da carga de rotura da viga VB, o declive dos diagramas força-deslocamento e momento-curvatura sofreram uma ligeira diminuição, o que se deveu à cedência das armaduras.

Na tabela 4.15 encontra-se a comparação entre as estimativas da carga de “serviço” ($P_{\delta=L/250}$) e carga última e os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 4.15. Comparação entre as estimativas de carga e os valores obtidos experimentalmente.

	<i>Viga VA</i>			<i>Viga VB</i>		
	Estimativa	Experimental	Desvio	Estimativa	Experimental	Desvio
$P_{\delta=L/250}$ [kN]	9.5	9.8	+3.6%	16.4	17.7	+7.8%
$P_{rm}^{flexão}$ [kN]	12.8	17.7	+27.6%	32.3	-	-
$P_{rm,VB}^{aderência}$ [kN]	-	-	-	37.5	34.4	- 9.0%

Por observação da informação contida na tabela anterior conclui-se que, com excepção da rotura da viga VB, as estimativas dos valores de carga se aproximam, inferiormente, dos valores obtidos nos ensaios. Destaque para a estimativa da carga resistente ($P_{rm}^{flexão}$) da viga VA, que é consideravelmente inferior ao valor medido, podendo ser explicado, em parte, por uma resistência última das armaduras superior à prevista. Além disso, não foi tido em consideração o acréscimo na tensão resistente do betão à compressão conferido pela acção de confinamento dos estribos.

Relativamente à viga VB, recorde-se que se concluiu que a rotura ocorreria por descolamento da extremidade do laminado para um valor de carga inferior à estimativa da carga de rotura por flexão ($P_{rm,VB}^{flexão}=32.3$ kN). De facto, a rotura ocorreu efectivamente por descolamento da extremidade do laminado, no entanto, para um valor superior ao da carga de rotura por flexão, mas inferior à estimativa de $P_{rm,VB}^{aderência}$. Este resultado mostra que o momento resistente da secção reforçada foi estimado inferiormente. Recorde-se que na rotura as extensões das armaduras traccionadas e do laminado seriam, respectivamente $\epsilon_s = 4.0\%$ e $\epsilon_f = 5.3\%$. No ensaio foram registadas extensões de $\epsilon_s^{exp.} = 3.6\%$ e $\epsilon_f^{exp.} = 3.8\%$. No entanto, as metodologias de cálculo utilizadas basearam-se em algumas simplificações, nomeadamente na perfeita aderência entre os materiais, que, no caso do reforço se mostra demasiado grosseira. Além disso, como não foram realizados ensaios de resistência e deformabilidade ao laminado de CFRP, no cálculo do momento resistente recorreu-se ao valor do módulo de elasticidade indicado pelo fabricante. Na realidade, este poderá ser ligeiramente superior ao valor fornecido, contribuindo para um acréscimo do momento fletor resistente. O facto de a rotura ter ocorrido por descolamento do laminado para um valor inferior ao

esperado, poderá indicar que a estimativa da tensão resistente do betão ao corte não foi a mais acertada. Este é um parâmetro que apresenta uma grande variabilidade, nomeadamente em betões de fraca qualidade, como o utilizado neste programa experimental. O valor da máxima extensão mobilizada no laminado ($\varepsilon_f^{\text{exp.}} = 3.8\%$) foi relativamente reduzido, comparativamente aos valores correntes de cerca de 6%. No entanto, note-se que, em relação à área de armaduras, a área de reforço adoptada é anormalmente elevada, conduzindo a que, mesmo para extensões reduzidas, a força mobilizada seja muito elevada, o que, associado a um betão de fraca qualidade, poderá justificar o valor de $\varepsilon_f^{\text{exp.}}$ verificado no ensaio.

Nas figuras 4.31 e 4.32 ilustram-se, respectivamente, as *vigas VA* e *VB* após sujeitas ao carregamento que as conduziu à rotura.



Figura 4.31. a) vista geral da rotura da *viga VA*; b) pormenor da rotura da armadura longitudinal inferior.

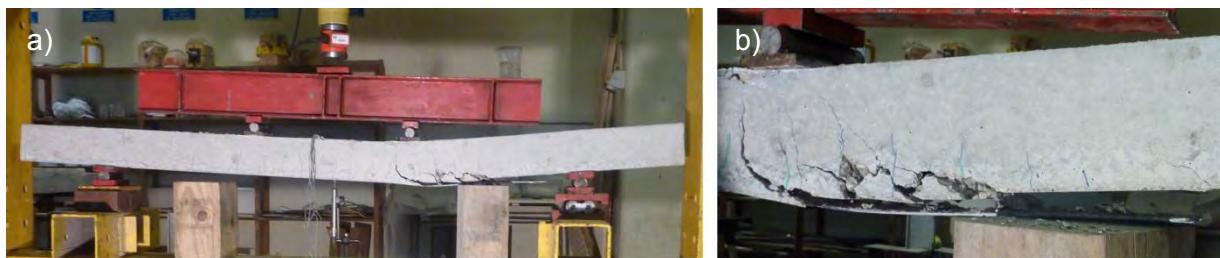


Figura 4.32. a) vista geral da rotura da *viga VB*; b) pormenor do descolamento da extremidade do laminado com arrancamento de betão.

Na figura 4.31 observa-se que a *viga VA* atingiu o colapso através de um mecanismo de rotura por flexão da secção de meio vão. Relativamente à rotura da *viga VB*, observa-se na figura 4.32 o descolamento de uma das extremidades do laminado e o arrancamento de betão em secções mais próximas do ponto de aplicação de carga. Apesar destes dois fenómenos serem praticamente simultâneos, durante o ensaio foi possível concluir que o descolamento da extremidade do laminado ocorreu numa primeira fase, à qual se seguiu a rotura por flexão da secção sob o ponto de aplicação de carga, em que houve arrancamento de betão (figura 4.32 b).

Na tabela 4.16 apresentam-se os valores da abertura de fendas (w_k) a meio vão medidos antes de cada uma das descargas efectuadas.

Tabela 4.16. Abertura de fendas a meio vão das vigas para os carregamentos indicados.

<i>Viga VA</i>		<i>Viga VB</i>	
Força [kN]	w_k [mm]	Força [kN]	w_k [mm]
5.8	0.05	16.4	0.03
7.6	0.10	20.4	0.08

Pela observação da tabela anterior conclui-se que a *viga VB*, quer para a carga que provoca o deslocamento de $L/250$ a meio vão ($P_{\delta=L/250}$), quer para o valor de cálculo da carga de rotura, apresenta uma menor abertura de fendas. Apesar de a comparação referida ser feita para valores de força diferentes, aquele resultado corresponde ao esperado, pois o laminado instalado na face inferior proporciona uma melhor transferência de tensões de tracção, contribuindo para uma menor distância entre fendas, o que, por sua vez, conduz a uma abertura de fendas inferior.

4.5. Ensaios de resistência ao fogo

Os ensaios de resistência ao fogo, que constituíram o corpo principal do programa experimental, foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Instituto Superior Técnico. Tal como referido anteriormente, estes ensaios tinham como objectivo avaliar:

- O comportamento do sistema de reforço quando sujeito a um incêndio padrão, nomeadamente o seu tempo de resistência e o respectivo modo de rotura;
- O incremento no tempo de resistência ao fogo do sistema de reforço pela adopção de dois tipos de protecção passiva;
- O possível efeito benéfico do isolamento térmico das zonas de ancoragem nas vigas reforçadas.
- O comportamento mecânico das vigas em situação de incêndio, no que diz respeito à evolução dos deslocamentos e extensões nos varões longitudinais na secção de meio vão.

Para que os objectivos anteriores fossem atingidos foram ensaiadas 6 vigas, com a nomenclatura e características indicadas na tabela 4.17, sujeitas ao incêndio padrão definido na norma ISO 834 [4.15].

Tabela 4.17. Descrição geral das vigas utilizadas nos ensaios de resistência ao fogo.

Designação	Descrição
Viga RC	Viga de betão armado não reforçada e sem protecção ao fogo
Viga CFRP	Viga de betão armado reforçada com CFRP e sem protecção ao fogo
Viga VP25	Viga de betão armado reforçada com CFRP e com protecção VP 25 mm
Viga VP40	Viga de betão armado reforçada com CFRP e com protecção VP 40 mm
Viga SC25	Viga de betão armado reforçada com CFRP e com protecção SC 25 mm
Viga SC40	Viga de betão armado reforçada com CFRP e com protecção SC 40 mm

Tal como referido no ponto 4.4.1, o comprimento adoptado para o laminado é 1.35 m, coincidente com a largura exterior do forno onde serão realizados os ensaios de resistência ao fogo. Esta opção pretende simular uma situação em que as extremidades do laminado estão protegidas com uma espessura de isolamento superior à aplicada na zona central da viga, pois o comprimento do reforço coincidente com as paredes laterais do forno não terá a acção directa do fogo. Esta foi uma questão levantada no programa experimental desenvolvido por Burke *et. al.* [4.20] onde, devido a um erro de montagem num dos ensaios, uma das extremidades do reforço não foi sujeita à acção do calor, tendo-se verificado, por isso, um tempo até à rotura superior.

4.5.1. Fabrico das vigas

As vigas *RC* a *SC40* foram fabricadas em simultâneo com as *vigas de referência VA e VB*, pelo que a composição do betão e as condições de cura foram similares. No entanto, como os objectivos e as características destes ensaios são diferentes, foi necessário recorrer a instrumentação específica.

Seguidamente apresentam-se os pormenores da instalação dos diversos equipamentos de medição, bem como a aplicação dos diferentes tipos de protecção ao fogo.

4.5.1.1. Colocação dos extensómetros

Na secção de meio vão das reforçadas (*vigas CFRP, VP25, VP40, SC25 e SC40*) foram colocados 4 extensómetros (um em cada varão longitudinal) com a referência ZFLA-3-11, da marca *TML*. Estes extensómetros têm a particularidade de efectuarem leituras em ambientes com temperatura até 300°C. O adesivo utilizado para a colagem dos extensómetros à armadura (com a referência NP-50 e fornecido pelo mesmo fabricante) mantém as suas propriedades até essa temperatura. Apesar de se prever que a temperatura ao nível das armaduras atingisse valores superiores nas vigas sem protecção, não estavam disponíveis no mercado extensómetros com uma temperatura de operação superior a um preço comportável. A nomenclatura utilizada para identificar a posição de cada um deles é igual à das vigas de referência, estando ilustrada na figura 4.24 b). Devido ao elevado custo destes extensómetros optou-se por não instrumentar a *Viga RC*, visto ser a que menos contribui para a concretização dos objectivos do programa experimental.

4.5.1.2. Colocação dos termopares

As medições dos valores de temperatura durante os ensaios foram efectuadas com recurso a termopares do tipo K. Por razões de disponibilidade deste tipo de sensores e do número de canais de leitura do aparelho de aquisição de dados, apenas foi possível instrumentar a zona de meio vão das vigas com 8 termopares, excepto na *Viga SC40*, onde se adicionaram mais 2 na zona de extremidade do laminado, tal como se explicitará adiante. Na figura 4.33 a) está representada uma secção de meio vão com a sua disposição esquemática. Refira-se que a decisão de adicionar os termopares T1" e T2" foi tomada após a betonagem das vigas (pois os termopares T1 a T6 não forneciam informação sobre a temperatura na zona central da secção), pelo que se optou por colocá-los a uma distância de cerca de 10 cm da secção de meio vão para não a fragilizar. Dada a proximidade entre estas duas secções, considerou-se que o perfil de temperaturas seria praticamente coincidente. Para garantir que durante a betonagem os termopares se mantinham na posição pretendida, estes foram fixados com uma tira de fita adesiva a um pequeno espeto de madeira (figura 4.33 b) que, por sua vez, com recurso a braçadeiras de serrilha, foi fixado à armadura da viga (figura 4.33 c). Os termopares T1 a T6 foram colocados alternadamente à esquerda e direita do eixo vertical da secção para evitar a existência de um grande volume sem betão.

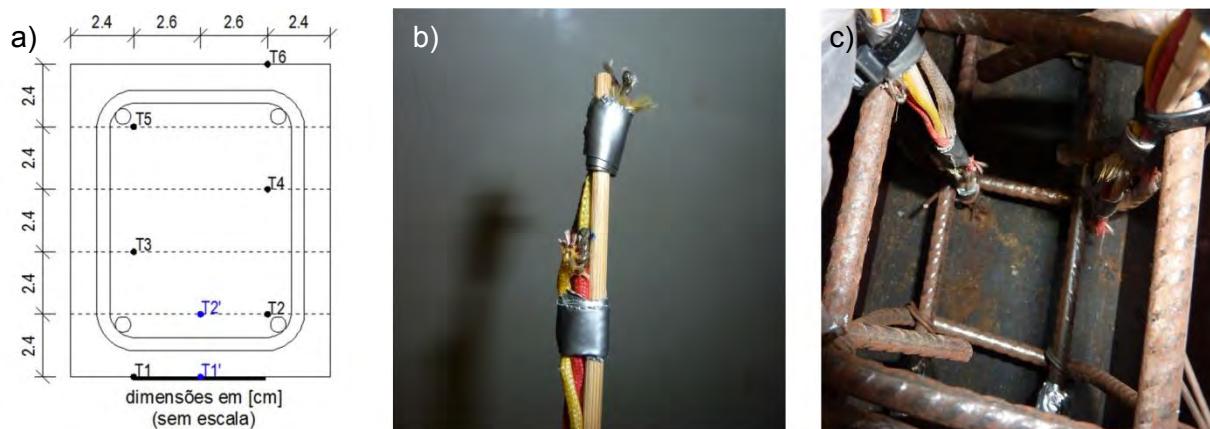


Figura 4.33. a) localização esquemática dos termopares; b) pormenor da fixação dos termopares ao espeto de madeira; c) fixação dos conjuntos de termopares à armadura com braçadeiras de serrilha.

Os termopares T1" e T2" foram adicionados posteriormente, o que obrigou à execução de um furo com um berbequim eléctrico (figura 4.34 a). Nestes, não foi utilizado o espeto de madeira de forma a minimizar o diâmetro necessário do furo. Após realizados os furos nas vigas procedeu-se à limpeza do seu interior com recurso a ar em pressão e a uma escova específica (figura 4.34 b). Finalmente, introduziram-se os termopares nos furos e selou-se o interior com calda de cimento (figura 4.34 c), tendo o cuidado de remover o ar aprisionado com a ajuda de um pequeno arame de aço.



Figura 4.34. a) execução dos furos para colocação dos termopares T1" e T2" com berbequim eléctrico; b) instrumentos utilizados para limpeza dos furos; c) selagem dos furos com calda de cimento.

De acordo com o referido anteriormente, na Viga SC40 foram colocados dois termopares adicionais na zona de extremidade do laminado. A sua localização exacta está definida na figura 4.35. Tal como os sensores T1" e T2", optou-se por colocar estes termopares após a betonagem da viga, segundo o procedimento indicado na figura 4.34. É de referir que estes termopares foram colocados na interface betão-resina. A nomenclatura utilizada está relacionada com o facto de um dos termopares estar instalado precisamente na extremidade do laminado (TE.L.) e o outro numa secção que coincide com a parede interior do forno na zona do isolamento (TP.F.). Estes sensores foram colocados nas posições indicadas pois era expectável que a temperatura atingida nesta zona fosse consideravelmente inferior à das secções de meio vão. Esta situação pode assemelhar-me à colocação de uma protecção de maior espessura na zona de ancoragem dos laminados. De facto, e tal como referido anteriormente, esta foi uma questão que ficou em aberto no estudo desenvolvido por Burke *et. al.* [4.20].

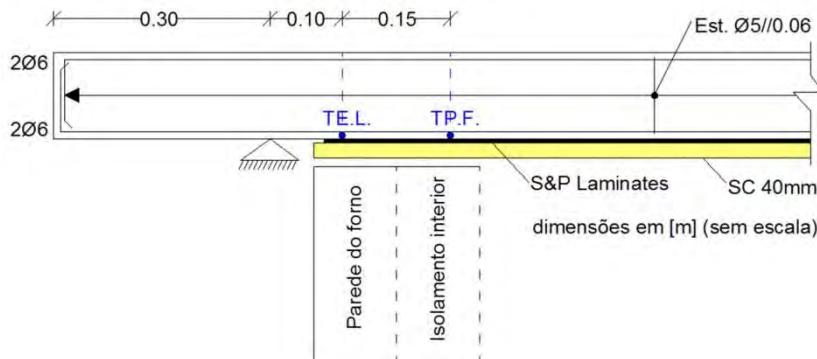


Figura 4.35. Localização dos termopares adicionais na Viga SC40.

4.5.1.3. Aplicação dos sistemas de protecção ao fogo

No presente programa experimental foram utilizados, como sistemas de protecção ao fogo, painéis de silicato de cálcio e argamassa à base de vermiculite e perlite, ambos com espessuras de 25 e 40 mm. Estes sistemas foram aplicados apóis instalação do laminado de CFRP, descrito no ponto 4.4.2.

Procedeu-se ao corte dos painéis de silicato de cálcio, fornecidos nas referidas espessuras, com as dimensões de 0.10 x 1.40, recorrendo a ferramentas de corte de madeira. Estes foram aplicados na face inferior das vigas SC25 e SC40 através de uma fixação mecânica em 4 pontos com chapas quinadas em forma de U e pregos de aço instalados em furos previamente executados (figura 4.36 a e b). As chapas de fixação foram posteriormente pintadas com tinta intumescente com o objectivo de aumentar a sua resistência ao fogo, pois a sua destruição durante os ensaios comprometeria a integridade de todo o sistema de protecção.



Figura 4.36. a) vista geral das vigas SC25 e SC40, protegidas com painéis de SC fixados mecanicamente;
b) Pormenor do sistema de fixação mecânica.

A argamassa à base de vermiculite e perlite foi aplicada por espalhamento, pelo que foi necessário proceder à montagem de cofragens laterais nas vigas VP25 e VP40 (figura 4.37 a). Dado que com esta técnica a aderência à base não é tão eficaz como quando se utiliza a projecção, optou-se por colocar uma rede metálica no interior da camada de argamassa. No entanto, ainda antes da colocação da rede, procedeu-se à picagem da superfície de betão que iria ficar em contacto com a argamassa, com o auxílio de um martelo de agulhas. Posteriormente, a rede foi fixada nas suas extremidades com parafusos inseridos em buchas metálicas (figura 4.37 b e c), de modo a que com a deformação da viga a camada de protecção não se destacasse da sua face inferior. Refira-se que no isolamento de 40 mm de espessura se aplicaram duas camadas de rede metálica. A fase seguinte consistiu no fabrico da argamassa de acordo com as especificações do fabricante (indicadas no ponto 4.2.5), onde se recorreu a um misturador eléctrico (figura 4.40 a). Após esta etapa, humidificou-se a superfície do betão, de forma a promover uma melhor aderência, e, com recurso a uma colher, preencheu-se o espaço definido pelas cofragens com a argamassa (figura 4.38 b e c).

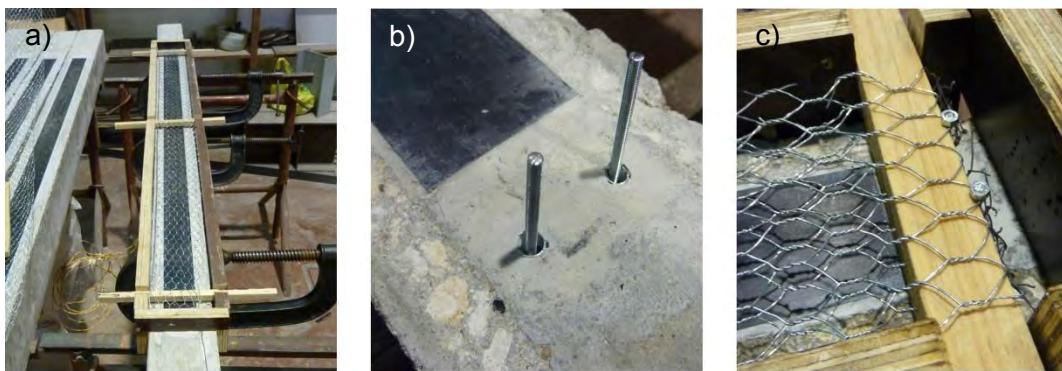


Figura 4.37. a) vista geral da cofragem e rede metálica para aplicação da protecção de VP; b) parafusos inseridos em buchas metálicas; c) pormenor da fixação da extremidade da rede metálica.



Figura 4.38. a) preparação da argamassa de VP com recurso a misturadora eléctrica; b) preenchimento das cofragens com ajuda de uma colher; c) vista geral do sistema de protecção.

4.5.2. Sistema e procedimento de ensaio

4.5.2.1. Forno

Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados num forno vertical com as seguintes dimensões exteriores: 1.35 m de largura, 2.10 m de altura e 1.20 m de espessura (figura 4.39 a). O fundo do forno é coberto por tijolos refractários, enquanto que as suas paredes e topo são compostas interiormente por várias camadas de lã cerâmica, delimitando uma superfície horizontal livre com 0.95 m x 0.80 m. O forno tem duas aberturas: uma frontal (figura 4.39 b), normalmente utilizada quando se pretende ensaiar elementos verticais, tais como portas ou pilares; e outra, localizada no topo do forno, que pode ser utilizada em ensaios a elementos horizontais, como vigas ou lajes.

O forno é alimentado por 6 queimadores a gás controlados por uma unidade de controlo que lê a temperatura através de 3 termopares no seu interior e ajusta a quantidade de gás queimado para que, tanto quanto possível, a curva temperatura-tempo se aproxime da definida teoricamente. Os queimadores encontram-se distribuídos pelas paredes laterais do forno, existindo 3 queimadores em cada parede com um espaçamento vertical de cerca de 60 cm. Um dos termopares interiores encontra-se a meia altura e os outros dois estão distanciados da base e do topo cerca de 30 cm.

A inexistência de uma janela impede que seja possível observar a face exposta ao calor dos elementos ensaiados.



Figura 4.39.a) Vista exterior do forno; b) vista interior do forno através da abertura frontal.

4.5.2.2. Sistemas de apoio e de selagem lateral das vigas

Para a realização dos ensaios de resistência ao fogo foi necessário proceder à montagem de um pórtico de carga envolvente ao forno. Este foi posicionado de forma a que a travessa ficasse alinhada com o centro do forno. Sobre a travessa foi colocada uma campânula, à qual se ligou um sistema de extracção de fumos (figura 4.40 a).

As vigas foram posicionadas sobre a abertura superior do forno, alinhadas com a travessa do pórtico e com o eixo central do forno. Os apoios das vigas (com dimensões 8 cm x 10 cm) foram soldados a chapas metálicas adjacentes às paredes laterais do forno, para que durante todo o programa experimental a sua posição não sofresse alterações. Cada uma dessas chapas foi suspensa na travessa do pórtico com recurso a 4 varões rosados de 24 mm de diâmetro. Para assegurar que as chapas permaneciam imóveis, foram soldados varões horizontais que, por sua vez, se fixaram aos montantes. Este sistema, completamente isolado do forno, permitiu garantir uma distância entre apoios de 1.5 m. Na figura 4.40 b) apresenta-se uma vista geral de uma viga colocada sobre o forno e na figura 4.40 c) o pormenor dos apoios. Refira-se que a altura dos apoios foi calibrada de forma a que quando fosse aplicado o carregamento, a face inferior das vigas não tocasse nas paredes do forno.



Figura 4.40. a) pórtico envolvente ao forno e campânula aplicada na travessa; b) vista geral da viga sobre o forno; c) pormenor dos apoios da viga.

As aberturas adjacentes às faces laterais das vigas foram isoladas através da sobreposição de duas placas de lã mineral, cada uma com 5 cm de espessura. Na figura 4.41 apresenta-se um corte esquemático com o posicionamento destas placas. Para aumentar a resistência térmica deste

isolamento, as faces das placas em contacto com o interior do forno foram revestidas com tinta intumescente.

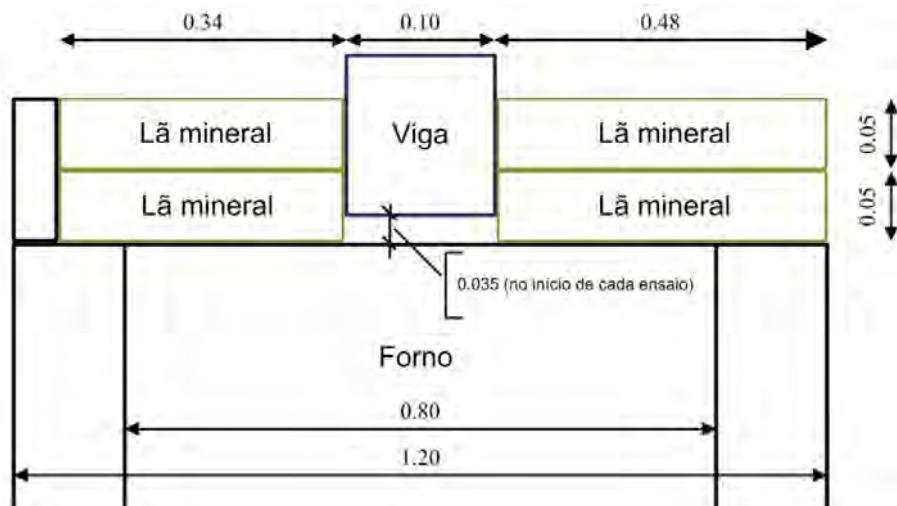


Figura 4.41. Corte esquemático do isolamento lateral das vigas (dimensões em metros - sem escala).

Para garantir um correcto isolamento da viga, a interface lã mineral-viga foi selada com mástique resistente a altas temperaturas (figura 4.42 a), tal como a zona das arestas inferiores das vigas (figura 4.42 b). O espaço compreendido entre as paredes laterais do forno e a face inferior das vigas (com 0.035 m de altura) foi preenchido com pedaços de lã mineral. Todo este sistema permitiu que apenas a face inferior das vigas estivesse directamente exposta ao calor do forno e garantiu a existência de fronteiras adiabáticas nas faces laterais das vigas. O aspecto geral do referido isolamento pode ser observado na figura 4.42 c). Tal como seguidamente se explicará, no sistema de isolamento lateral das vigas VP40 e SC40 procedeu-se a pequenas alterações.



Figura 4.42. a) selagem da interface lã mineral-viga com mástique resistente a altas temperaturas; b) selagem das arestas inferiores da viga; c) aspecto geral do sistema de isolamento lateral das vigas (excepto vigas VP40 e SC40).

Durante o decorrer dos ensaios às vigas com sistema de protecção ao fogo de 25 mm de espessura (vistas VP25 e SC25) foi notório que o isolamento lateral composto por duas placas de lã mineral não resistiria a ensaios com duração superior. Assim, para os ensaios das vigas VP40 e SC40 (em que o sistema de protecção das vigas tinha mais espessura), optou-se por adicionar duas placas de 25 mm em cada um dos lados das vigas e sob as placas de lã mineral. Estas, além de isoladas com mástique na superfície de contacto com as vigas, foram aparafusadas entre si (figura 4.43 a). Na figura 4.43b) observa-se a ordem com que foram sobrepostas as camadas de material isolante para os ensaios das vigas VP40 e SC40.

Refira-se que em todos os ensaios de resistência ao fogo foram colocados pesos (chapas metálicas) nas extremidades das placas de isolamento lateral, para, através da pressão exercida, evitar qualquer fuga de calor ou fumo (figura 4.43 c).



Figura 4.43. a) aparafulamento das placas de silicato de cálcio para isolamento lateral; b) disposição das diferentes placas de isolamento lateral nos ensaios das vigas VP40 e SC40; c) pesos nas extremidades das placas de isolamento lateral.

4.5.2.3. Definição da curva do incêndio padrão

Nos ensaios de resistência ao fogo foi adoptada a curva de incêndio padrão definida na norma ISO 834 [4.15] que se pode descrever pela seguinte equação:

$$T(t) = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (4.7)$$

em que,

- T – temperatura do forno em °C;
- t – tempo em minutos;
- T_0 - temperatura inicial do forno em °C.

A curva temperatura-tempo definida na norma ISO 834 tem como objectivo simular a evolução da temperatura durante um incêndio num edifício. Apesar de existirem outras formulações que reproduzem de uma forma mais real um incêndio num edifício, a curva da ISO 834 permite a comparação de resultados experimentais obtidos em vários laboratórios. Além disso, a maioria dos regulamentos nacionais define a resistência ao fogo dos elementos estruturais como a capacidade de manterem a sua função de suporte quando sujeitos a incêndios padronizados, tais como a curva definida na ISO 834.

Na figura 4.44 apresenta-se a curva temperatura-tempo do incêndio padrão definida na referida norma. Por observação da figura seguinte é possível concluir que as temperaturas aumentam consideravelmente nos primeiros minutos, atingindo 500°C após 3 min, 750°C ao fim de, aproximadamente 15 minutos e 1000°C após 90 minutos.

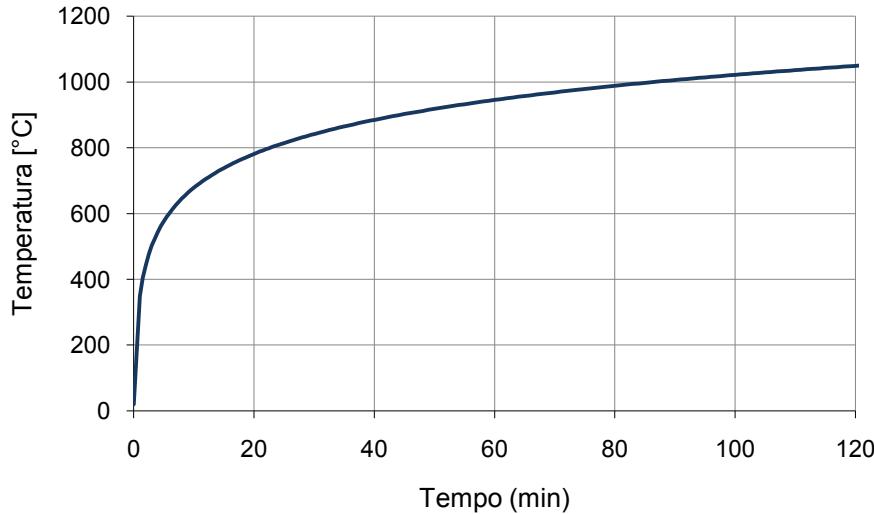


Figura 4.44. Curva do incêndio padrão de acordo com a norma ISO 834 [4.15].

4.5.2.4. Sistema de carregamento gravítico

O sistema de carregamento das vigas utilizado nestes ensaios é constituído por uma viga de transmissão de carga, à qual estão ligados pesos em cada uma das extremidades. Esta viga possui duas peças metálicas que transmitem a carga às vigas ensaiadas. Na figura 4.45 apresenta-se um esquema do referido sistema, onde se indicam as principais dimensões, e na figura 4.46 a viga de distribuição em pormenor.

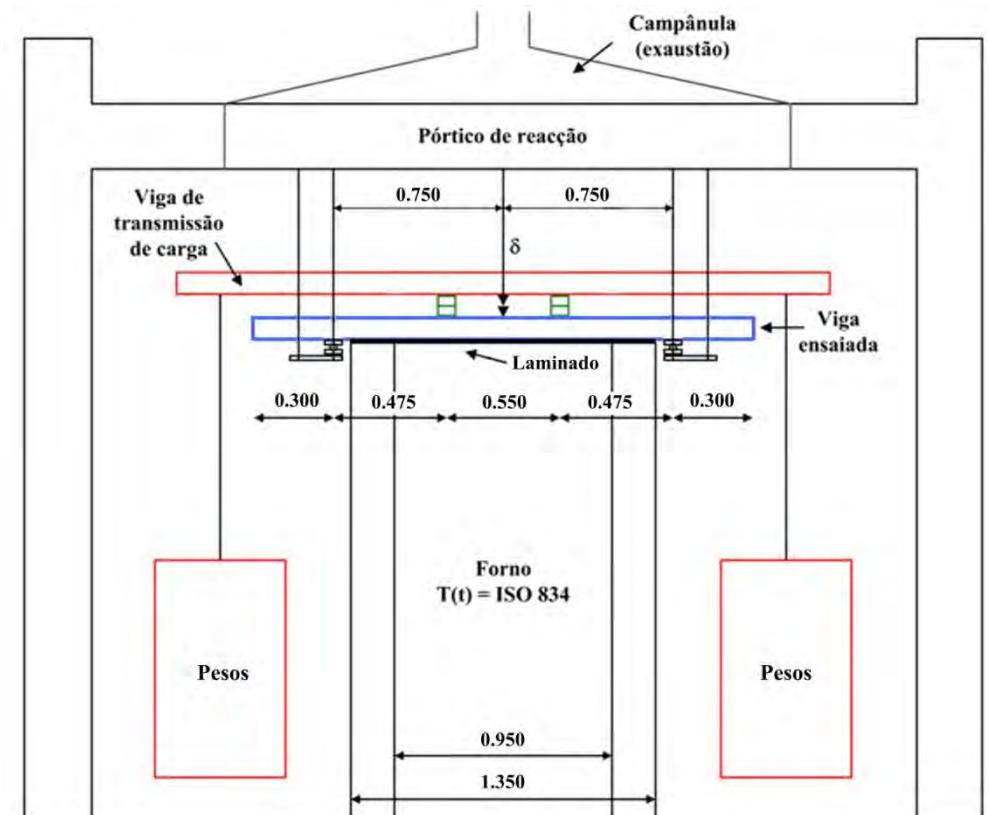


Figura. 4.45. Esquema do sistema de aplicação de carga (vista frontal; dimensões em metros; sem escala; adaptado de [4.9]).

As vigas foram ensaiadas no forno com o sistema de carregamento indicado na figura 4.45, no qual se recorreu a dois apoios fixos distanciados entre si de 1.50 m. O referido sistema aplica duas cargas concentradas no vão da viga a uma distância dos apoios de 0.475 m. Desta forma, as vigas apresentam condições de apoio e carregamento simétricos. No entanto, a distância entre cargas é ligeiramente inferior à considerada nos ensaios das vigas de referência. Assim, as estimativas das cargas que provocam uma flecha nas vigas de L/250, deveriam ser corrigidas tendo em conta este distanciamento. Esta situação só foi detectada já durante os ensaios de resistência ao fogo, pelo que foram consideradas as estimativas de carga indicadas no ponto 4.4.1. Este pormenor será analisado com maior detalhe no ponto 4.5.3.4.

Como pesos utilizaram-se blocos de betão que, no caso das vigas reforçadas (*vigas CFRP a SC40*), foram complementados com chapas de aço. Estes pesos foram colocados sobre chapas rectangulares, às quais foram soldados cabos de aço em cada um dos cantos. Os cabos de aço permitiram, com recurso a cadernais conectados à viga de distribuição, a elevação dos pesos e o consequente carregamento da viga ensaiada. Na figura 4.47 apresenta-se o sistema numa das extremidades da viga de distribuição. Tal como se referiu, a extremidade oposta está munida do mesmo sistema.



Figura 4.46. Pormenor da viga de distribuição de carga.



Figura 4.47. Sistema de suspensão dos pesos numa das extremidades da viga de distribuição (nesta figura são visíveis os pesos utilizados nos ensaios às vigas reforçadas).

Tal como referido anteriormente, a carga a aplicar durante os ensaios de resistência ao fogo, segundo a norma ISO 834 [4.14], deveria corresponder à da combinação quase permanente de acções, que se considerou ser a que provocava nas vigas uma flecha de $L/250$ ($P_{\delta=L/250}$). Assim, utilizaram-se pesos de forma a que a carga transmitida às vigas fosse o mais próximo possível dos valores de $P_{\delta=L/250}$ estimados no ponto 4.4.1. Na tabela 4.18 apresenta-se a comparação entre os valores dos carregamentos utilizados nestes ensaios e as estimativas de $P_{\delta=L/250}$. Refira-se que, no caso da Viga RC, tendo em conta a massa dos objectos disponíveis, não foi possível uma melhor aproximação ao valor de $P_{\delta=L/250}$.

Tabela 4.18. Comparação entre o carregamento utilizados nos ensaios e as estimativas anteriormente efectuadas.

	<i>Viga RC (sem reforço)</i>	<i>Vigas CFRP a SC40 (com reforço)</i>
Carga total aplicada [kN]	10.15	16.26
Estimativa de $P_{\delta=L/250}$ [kN]	9.50	16.36

4.5.2.5. Instrumentação

Nas vigas reforçadas (CFRP, VP25, VP40, SC25 e SC40) foram colados extensómetros aos varões longitudinais na secção de meio vão. No ponto 4.5.1.1. descreveram-se os pormenores da sua aplicação e na figura 4.24 b) é possível observar a nomenclatura utilizada ao longo do presente documento. Foi ainda monitorizado o deslocamento vertical da secção de meio vão de todas as vigas através de um deflectómetro de fio de marca *TML*, modelo CDP-500, com 500 mm de curso. Fixou-se a extremidade do fio a um pequeno gancho metálico introduzido num orifício previamente executado na face superior da viga, tal como se ilustra na figura 4.48 a). O deflectómetro foi colocado numa caixa de silicato de cálcio, fabricada especificamente para este tipo de ensaios, que foi colocada sobre o banzo inferior do perfil da travessa do pórtico, de forma a proteger o equipamento do calor proveniente do forno. Os dados de extensão e deslocamento foram registados em computador por intermédio de uma unidade de aquisição de 100 canais da marca *HBM* e modelo UPM 100.

Relativamente aos valores da temperatura, estes foram medidos com recurso a termopares do tipo K, colocados na secção central de todas as vigas, com a disposição e nomenclatura indicadas na figura 4.33 a). Acrescente-se que na Viga SC40 se adicionaram 2 termopares na zona de extremidade do laminado (TE.L. e TP.F.), tal como ilustrado nas figura 4.35 e 4.48 b). Além da instrumentação no interior das vigas, foi colocado um termopar para medição da temperatura do ar imediatamente acima destas e dois termopares no interior do forno para complementar a leitura dos sensores integrados neste equipamento. Os dados da temperatura dos termopares tipo K foram registados em computador por intermédio de uma unidade de aquisição de 20 canais da marca *HBM* e modelo MX1609. Os valores da temperatura medidos pelos termopares integrados no forno foram projectados na consola do controlador e registados manualmente com um intervalo de 30 segundos ao longo de todos os ensaios.

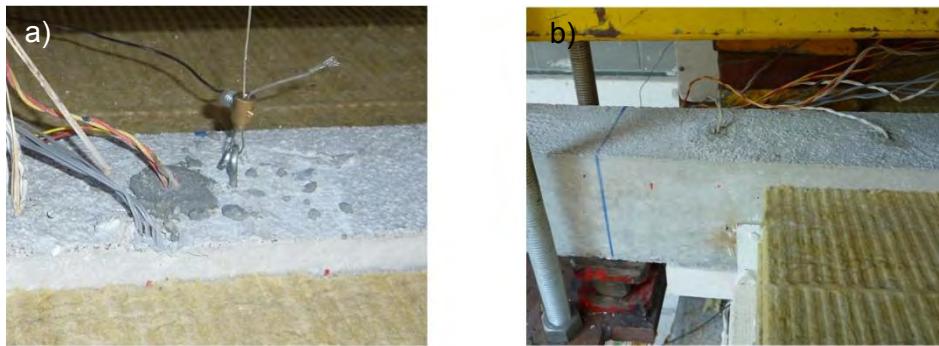


Figura 4.48. a) pormenor da fixação do fio do deflectómetro na face superior das vigas; b) pormenor dos termopares adicionais na Viga SC40.

4.5.2.6. Procedimento de ensaio

A primeira fase dos ensaios correspondeu à aplicação da carga, que foi dividida em dois passos. Em primeiro lugar colocou-se a viga de transmissão de carga na posição correcta, carregando a viga ensaiada apenas com o seu peso próprio. Em seguida, com recurso aos cadernais e numa operação simultânea, suspendeu-se lentamente os pesos na viga de distribuição até que estes ficassem a uma altura do solo de cerca de 10 cm, de forma a evitar um eventual contacto com este durante o processo de deformação da viga ensaiada. Com este passo concluiu-se o processo de aplicação de carga. De acordo com as recomendações presentes na ISO 834, é necessário aguardar 30 minutos para que a deformação introduzida na viga estabilize; no entanto, verificou-se que os valores das leituras de deslocamento e extensões permaneciam constantes ao fim de um período mais curto.

Na segunda fase dos ensaios os queimadores do forno foram activados e a viga começou a ser sujeita a um aumento de temperatura na sua face inferior de acordo com a curva temperatura-tempo definida na norma ISO 834. O ensaio decorreu até que fosse atingida a rotura da viga ou o tempo máximo de funcionamento do forno definido em 210 minutos, após os quais os queimadores foram desactivados.

Após a realização de cada ensaio, foi necessário esperar que todo o equipamento arrefecesse até uma temperatura que possibilitasse a sua manipulação. Para acelerar este processo optou-se por abrir a porta frontal do forno.

4.5.3 Resultados e discussão

4.5.3.1. Síntese de resultados

Neste ponto apresenta-se uma síntese dos ensaios de resistência ao fogo, onde se inclui a sua duração total, o tempo de resistência do sistema de reforço, a temperatura máxima atingida no forno, a temperatura média na interface betão-adesivo na secção de meio vão no momento da rotura do reforço (nas vigas CFRP a SC40), e, no caso da viga SC40, a temperatura nessa interface na secção coincidente com a parede do forno (termopares TP.F e TE.L.).

a) Viga RC – viga de betão armado não reforçada e sem protecção ao fogo

Este ensaio foi interrompido ao fim de 69 minutos de exposição ao incêndio padrão devido a uma falha no sistema de isolamento lateral da viga que comprometia a continuação do ensaio nas

condições de segurança adequadas e ao facto de a viga ter entrado em contacto com uma peça da estrutura metálica, alterando as condições de apoio. Por estas razões não foi possível levar a viga a uma situação de rotura. A temperatura máxima atingida no forno foi de 969°C.

b) Viga CFRP – viga de betão armado reforçada com CFRP e sem protecção ao fogo

Verificou-se o descolamento do laminado de CFRP ao fim de 23 minutos de tempo de exposição, com a temperatura do forno a registar 793°C. Nesse momento, a temperatura na secção de meio vão na interface betão-resina era 414°C. O ensaio terminou ao fim de 60 minutos, instante em que ocorreu a rotura da secção de meio da viga. A temperatura máxima atingida no forno foi de 942°C.

c) Viga VP25 - viga de betão armado reforçada com CFRP e protecção VP-25 mm

Neste ensaio a viga atingiu a rotura por flexão na secção de meio imediatamente após o descolamento do laminado. Estes fenómenos ocorreram 89 minutos após a activação dos queimadores. A temperatura máxima atingida no forno foi de 1008°C, enquanto que na secção de meio vão a interface betão-resina atingiu 176°C.

d) Viga VP40 - viga de betão armado reforçada com CFRP e protecção VP-40 mm

A viga protegida com uma camada de 40 mm de espessura de argamassa à base de vermiculite e perlite não atingiu a rotura, dado que os queimadores foram desactivados após 210 minutos de funcionamento. Com esta protecção conseguiu-se proteger o sistema de reforço durante 167 minutos, instante em que ocorreu o seu descolamento. A temperatura na secção de meio vão na interface betão-resina no momento da rotura do reforço era 187°C. A temperatura máxima atingida no forno foi de 1114°C.

e) Viga SC25 - viga de betão armado reforçada com CFRP e protecção SC-25 mm

Neste ensaio, tal como no caso da *Viga RC*, não foi possível atingir a rotura da viga devido a uma falha no sistema de isolamento lateral quando estavam decorridos 86 minutos desde o início do ensaio. Ainda assim, foi possível verificar um tempo de protecção do sistema de reforço de 60 minutos, instante em que se deu o descolamento do laminado. A temperatura na secção de meio vão na interface betão-resina no momento da rotura do reforço era 119°C. A temperatura máxima atingida no forno foi de 996°C.

f) Viga SC40 - viga de betão armado reforçada com CFRP e protecção SC-40 mm

Devido à iminência duma falha no sistema de isolamento lateral o ensaio foi interrompido ao fim de 182 minutos. Não foi atingida a rotura da viga, no entanto verificou-se um tempo de protecção do reforço de 137 minutos, instante em que a temperatura média na secção de meio vão na interface betão-resina atingiu 146°C. No momento da rotura do reforço a temperatura na extremidade do laminado (termopar TE.L.) era 26°C e ao nível da parede do forno (termopar TP.F.) era 78°C. A temperatura máxima atingida no forno foi de 1111°C.

4.5.3.2. Evolução da temperatura no interior do forno

A evolução da temperatura no interior do forno (dada pela média dos registo dos 3 termopares existentes nas suas paredes) durante os ensaios às vigas *RC* a *SC40* está representada na figura 4.49, onde também se apresenta a curva teórica temperatura-tempo presente na norma ISO 834 (definida pela expressão 4.41).

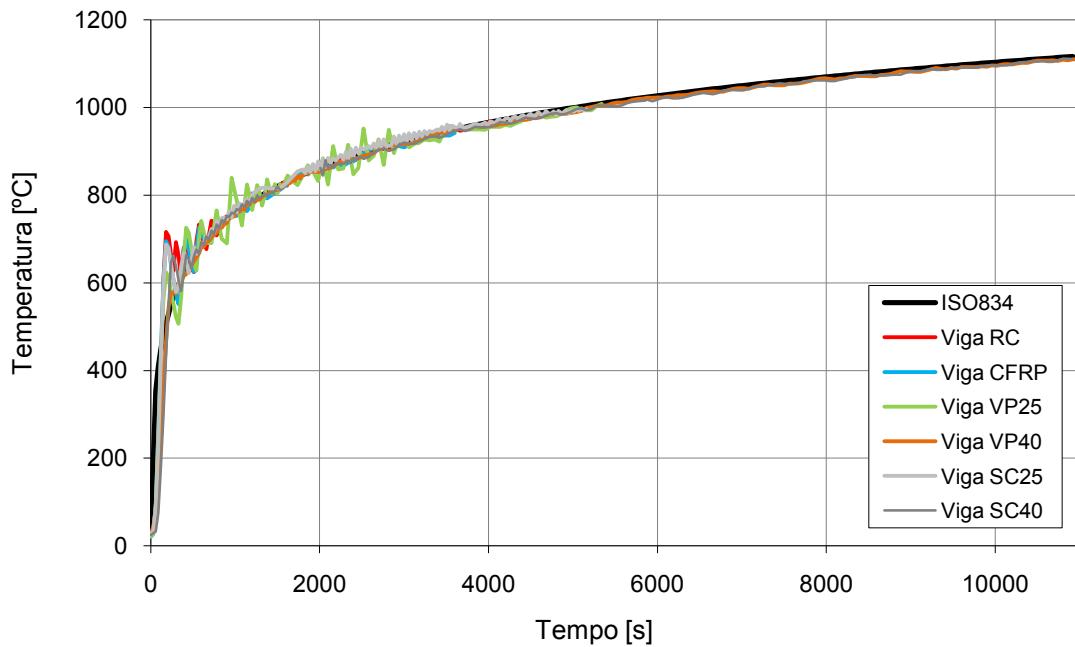


Figura 4.49. Curvas temperatura-tempo do forno nos ensaios às vigas RC a SC40.

Tal como se observa na figura 4.49, a evolução da temperatura ao longo do tempo é semelhante nos vários ensaios, aproximando-se bastante da curva teórica. Destacam-se os momentos iniciais, onde a elevada taxa de aquecimento do incêndio padrão levou a que os queimadores funcionassem no seu regime máximo, justificando o facto de em alguns momentos a curva experimental se situar acima da teórica. Com o decorrer dos ensaios estas oscilações foram diminuindo, verificando-se desvios de apenas $\pm 20^{\circ}\text{C}$, correspondentes aos momentos de activação ou desactivação dos queimadores. Refira-se que no ensaio à Viga SC40 existiu um período de 7 minutos (entre os segundos 1560 e 1980) durante o qual o controlador do forno indicou uma falha que impossibilitou a leitura dos valores de temperatura. Dado que após este período a situação voltou à normalidade, optou-se por desprezar este acontecimento, unindo com uma recta os pontos da curva temperatura-tempo adjacentes a este fenômeno.

4.5.3.3. Evolução da temperatura nas vigas

A evolução dos valores das leituras dos termopares no interior das vigas na secção de meio vão (e nas extremidades do laminado na viga SC40) e da temperatura do forno em cada um dos ensaios está presente nas figuras 4.51 a 4.56, onde também se indicam os valores das temperaturas de transição vítreia (T_g) e de decomposição (T_d) da resina de colagem, determinadas no ponto 4.3, por ser o material do sistema de reforço mais susceptível a temperaturas elevadas. Nas figuras 4.52 a 4.56 estão assinalados os instantes em que ocorreu a rotura do sistema de reforço através de um tracejado vertical de cor vermelha. De forma a facilitar a análise dos resultados, apresenta-se a figura 4.50, onde se indicam as posições e a nomenclatura dos vários termopares, tal como descrito anteriormente. As figuras seguintes podem ser consultadas em formato A4 no Anexo IV.

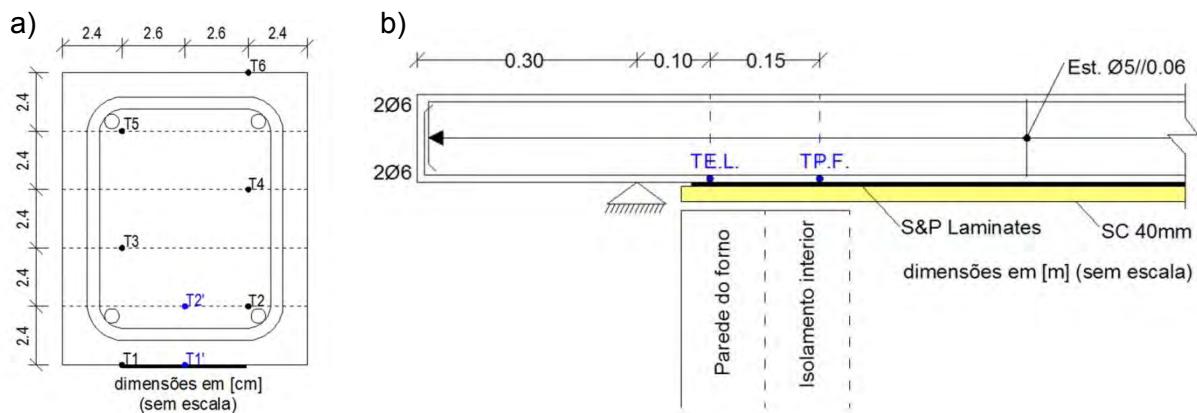


Figura 4.50. a) localização dos termopares na secção de meio vão das vigas RC a SC40; b) localização dos termopares adicionais na viga SC40.

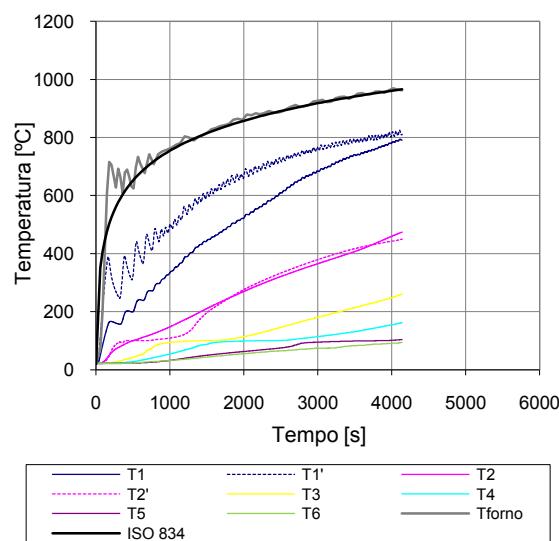


Figura 4.51. Diagrama temperatura-tempo da Viga RC.

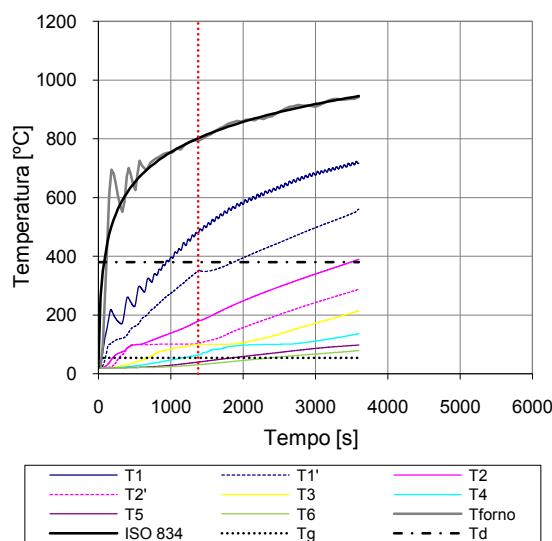


Figura 4.52. Diagrama temperatura-tempo da Viga CFRP.

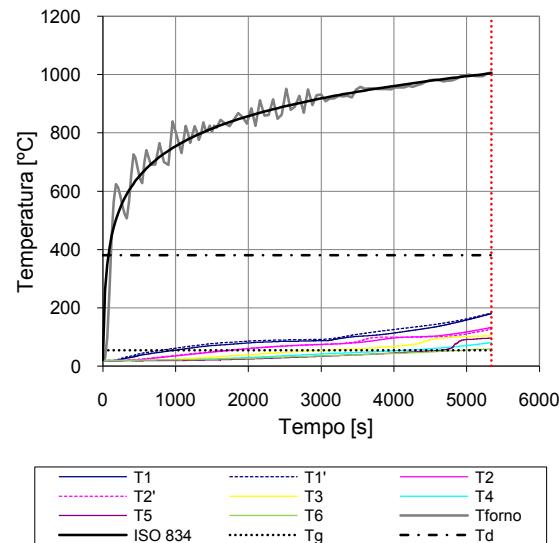


Figura 4.53. Diagrama temperatura-tempo da Viga VP25.

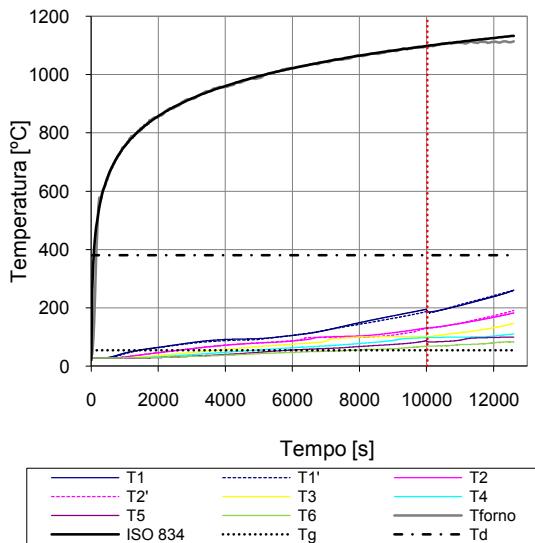


Figura 4.54. Diagrama temperatura-tempo da Viga VP40.

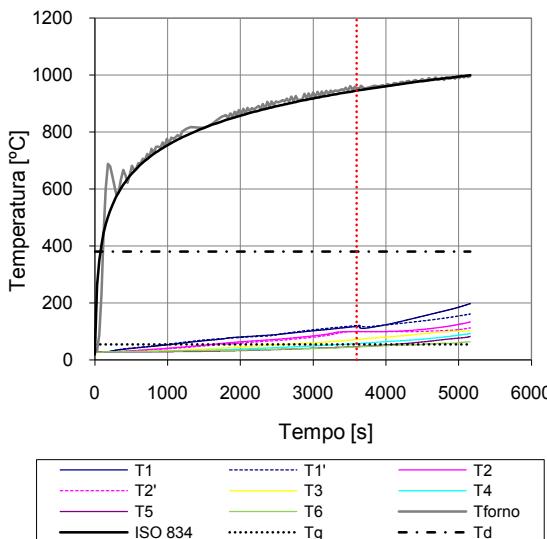


Figura 4.55. Diagrama temperatura-tempo da Viga SC25.

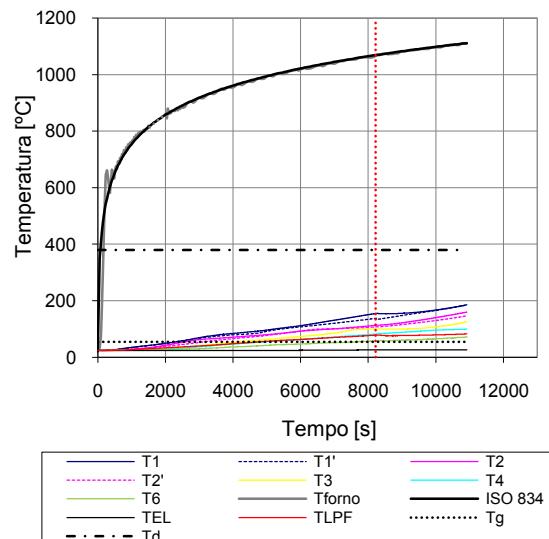


Figura 4.56. Diagrama temperatura-tempo da Viga SC40.

O registo dos valores de temperatura ao longo dos ensaios foi realizado com sucesso, excepto no caso da viga SC40, onde ocorreu uma falha no termopar T5, impossibilitando a sua leitura. Esta falha poderá ter sido motivada pela danificação do sensor durante as operações de betonagem e vibração.

Por observação dos diagramas anteriores conclui-se que, em todos os ensaios, como era esperado, a temperatura registada pelos termopares mais próximos da face exposta da viga (face inferior) é superior à verificada por aqueles que se encontram num plano superior. Além disso, em todos os termopares verifica-se um aumento da temperatura com o tempo, embora com diferentes taxas consoante o tipo e espessura de protecção da viga. Por estas razões, é possível afirmar que as leituras efectuadas são válidas.

Nas vigas sem qualquer tipo de protecção ao fogo (vistas RC e CFRP) é notório que as leituras dos termopares colocados na face inferior das vigas (T1 e T1") são as que seguem mais aproximadamente o andamento da curva temperatura-tempo do forno, sendo visíveis nalguns casos as oscilações correspondentes aos instantes em que os queimadores são activados e desactivados. Nestas duas vigas existe uma diferença assinalável entre as leituras dos termopares T1 e T1" e entre T2 e T2", ou seja, entre termopares colocadas à mesma distância da face exposta. Recorde-se que os sensores T1" e T2" foram adicionados após a betonagem das vigas através da realização de um furo que, posteriormente, foi selado com calda de cimento. Assim, a diferença de valores de temperatura pode ser explicado pela conjugação dos seguintes factores: propriedades térmicas da calda do cimento ligeiramente diferentes das do betão constituinte da viga; existência de pequenos vazios por falha na selagem dos furos; a própria heterogeneidade do betão; e diferente distância dos termopares à face exposta ao calor. De facto, este último factor deverá ser o que mais contribui para o diferencial de valores entre os termopares T1 e T1", que, nalguns instantes atinge 200°C na Viga RC e 190°C na Viga CFRP. Estes dois termopares são os que se localizam junto à face inferior da viga, pelo que basta que um deles esteja um pouco mais distante da face exposta, para se verificarem tais diferenças. Nas vigas VP25 a SC40 (figuras 4.53 a 4.58) o sistema de protecção permitiu uma diminuição considerável dos valores de temperatura ao nível dos termopares T1, T1", T2 e T2", o que fez com que o anterior fenómeno não fosse tão notório. Atendendo apenas às figuras 4.51 e 4.52 verifica-se que, para o mesmo tempo de exposição, na viga reforçada (Viga CFRP) os valores de temperatura são inferiores aos registados na viga não reforçada (Viga RC), diferença que pode ser explicada, em parte, pela presença do sistema de reforço.

Na Viga CFRP, a rotura do sistema de reforço ocorreu num instante em que na face inferior da secção de meio vão se registaram temperaturas bastante superiores à temperatura de transição vítreia da resina de colagem, ultrapassando até, na leitura do termopar T1, o valor de T_d .

Relativamente às vigas com sistema de protecção ao fogo (figuras 4.53 a 4.56), e comparando com os resultados das vigas RC e CFRP, observa-se uma diminuição bastante significativa nos valores de temperatura na secção de meio vão, repercutindo-se num maior tempo de funcionamento do sistema de reforço. Em nenhuma das vigas protegidas a temperatura atingiu o valor da temperatura de decomposição da resina epoxídica, embora a temperatura de transição vítreia tenho sido ultrapassada durante longos períodos. Para o mesmo material de protecção, verificou-se que o aumento da sua espessura conduziu a um maior tempo de protecção do reforço de CFRP. A comparação dos resultados das vigas VP25 e SC25, e das vigas VP40 e SC40, permite concluir que a argamassa à base de vermiculite e perlite é mais eficaz na protecção do reforço do que as placas de silicato de cálcio. Esta constatação vem confirmar as conclusões apresentadas no estudo desenvolvido por Correia em perfis pultrudidos de GFRP [4.9].

Tal como referido anteriormente, os ensaios às vigas RC e SC25 foram interrompidos antes de ser atingida a rotura das vigas devido a uma falha no sistema de ensaio (na Viga RC além de uma falha do isolamento lateral, verificou-se, no mesmo momento, a existência de um terceiro ponto de apoio). Atendendo aos instantes finais de cada um destes ensaios (figuras 4.51 e 4.55) observa-se que nos termopares T1 e T2 (mais próximos das faces laterais da viga) a temperatura aumentou a uma taxa superior à verificada nos termopares T1" e T2" (localizados sob o eixo vertical da secção). Este fenómeno terá sido motivado pela degradação das placas de isolamento lateral, possibilitando que parte das faces laterais das vigas fosse sujeita ao calor do forno, deixando de constituir fronteiras adiabáticas.

Outro fenómeno interessante, registado em todas as vigas reforçadas (vistas CFRP a SC40), é o facto de a partir do momento da rotura do reforço o declive do diagrama temperatura-tempo dos termopares colocados junto à face inferior da viga (T1 e T1") sofrer uma ligeira alteração. Não foi encontrada uma explicação válida para esta evolução do diagrama, mas o facto de apenas ser registada por estes termopares indica que poderá estar associada a pequenas alterações da face inferior da viga motivadas pela rotura do reforço. No entanto, as alterações verificadas são mínimas, podendo ser, por isso, desprezadas.

Um aspecto que merece realce é o facto de com o aumento da espessura do sistema de protecção, a rotura do reforço ocorrer ao fim de um maior período de exposição mas para valores superiores de temperatura na viga. No entanto, recorde-se que este é um fenómeno que apenas foi medido nas secções de meio vão. Observando a figura 4.56, referente aos resultados da única viga onde foi instrumentada a zona próxima do apoio, conclui-se que, para o instante de rotura do reforço, as temperaturas nos termopares colocados ao nível da extremidade do laminado (TE.L) e na secção coincidente com a parede do forno (TP.F.), eram, respectivamente, 26°C e 78°C. Desta forma, conclui-se que na extremidade do laminado existe um comprimento em que a resina de colagem não atingiu o valor de T_g , o que justifica o facto de, nos ensaios às vigas CFRP a SC40, a zona de meio vão apresentar temperaturas superiores a este valor notável e, ainda assim, não existir a rotura do sistema de reforço por perda de aderência. O isolamento adicional conferido pelas paredes do forno, permitiu simular uma situação em que nas zonas de amarração do laminado é aplicado um sistema de protecção com espessura superior. Esta conclusão poderá suscitar particular interesse em desenvolvimentos posteriores, onde apenas se proteja a zona de extremidade do laminado. De facto, os resultados obtidos parecem confirmar uma questão levantada no programa experimental desenvolvido por Burke et. al. [4.20] em que, devido a um erro de montagem, uma das extremidades do reforço não foi sujeita à acção do calor, tendo-se verificado, por isso, um tempo até à rotura superior.

De uma forma geral, observam-se andamentos distintos dos diagramas temperatura-tempo das vigas protegidas com silicato de cálcio (SC) e argamassa de vermicullite e perlite (VP). Nos casos em que se recorreu à protecção de VP, nota-se uma evolução mais lenta das temperaturas até cerca de metade da duração dos ensaios. Durante esse período, ocorreu a evaporação da água de constituição deste material de protecção. Quando grande parte dessa água foi consumida, as temperaturas aumentaram com a taxa superior. Esta situação não se verificou nas vigas protegidas com placas de silicato de cálcio. Nestas, as temperaturas aumentaram a um ritmo idêntico ao longo dos ensaios, visto a quantidade de água de constituição ser menor, e, como tal, menos influente no desempenho do material.

Nas figuras 4.57 a 4.62 a evolução dos valores de temperaturas em cada um dos ensaios é apresentada através de perfis que, em dados instantes, fornecem o valor da temperatura em função da distância à face inferior das vigas (não contabilizando a espessura dos materiais de protecção e do sistema de reforço). Refira-se que nos casos em que existem dois termopares à mesma distância (T_1 e T_1'' , T_2 e T_2'') ilustra-se o valor médio das leituras. Optou-se por apresentar esta representação alternativa devido à sua interpretação ser mais intuitiva, apesar de não permitir obter mais conclusões para além das referidas nos parágrafos anteriores.

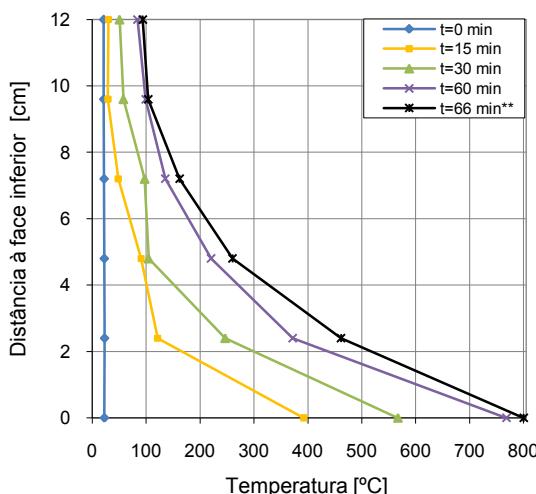


Figura 4.57. Perfis de temperatura na Viga RC.

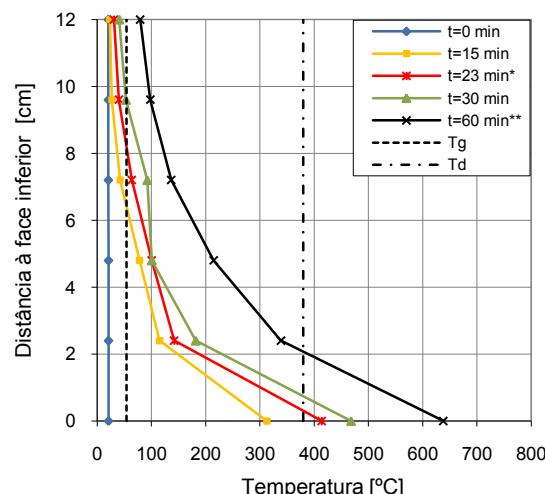


Figura 4.58. Perfis de temperatura na Viga CFRP.

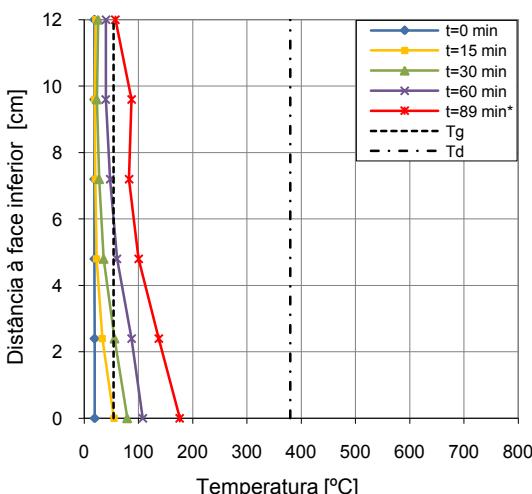


Figura 4.59. Perfis de temperatura na Viga VP25.

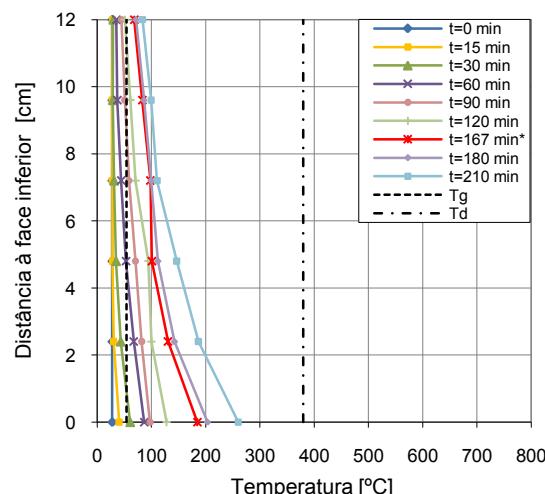


Figura 4.60. Perfis de temperatura na Viga VP40.

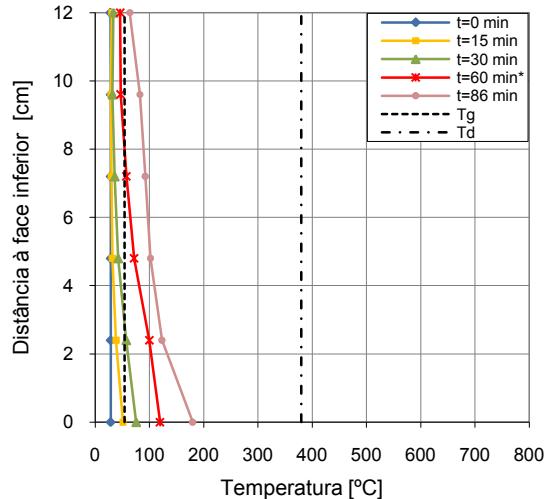


Figura 4.61. Perfil de temperatura na Viga SC25.

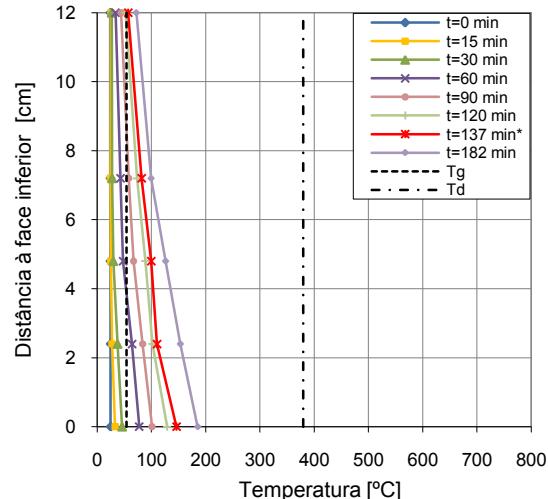


Figura 4.62. Perfil de temperatura na Viga SC40.

Notas: *rotura do reforço; **rotura da viga.

Refira-se que nos diagramas anteriores estão ilustrados os perfis de temperatura no momento da rotura do laminado, que, apesar de assinalados com a mesma cor, ocorrem em instantes diferentes para cada uma das vigas.

As figuras anteriores permitem observar a distribuição em altura das temperaturas nas secções das vigas ensaiadas. Por comparação das figuras 4.58 e 4.59 a 4.62, e tal como se havia concluído anteriormente, verifica-se que os sistemas de protecção possibilitam uma redução significativa dos valores de temperatura nas vigas, principalmente junto à face inferior, repercutindo-se num maior tempo de funcionamento do laminado. No ponto 4.5.3.6 a eficácia de cada um dos sistemas de protecção será discutida com maior detalhe.

4.5.3.4. Resposta mecânica

Na figura 4.63 apresenta-se o diagrama ilustrativo da evolução do deslocamento a meio vão das vigas em função do tempo de exposição ao incêndio padrão. Note-se que o tempo definido com o valor zero corresponde ao instante em que foram activados os queimadores. Nesse sentido, as vigas já tinham sido colocadas em carga.

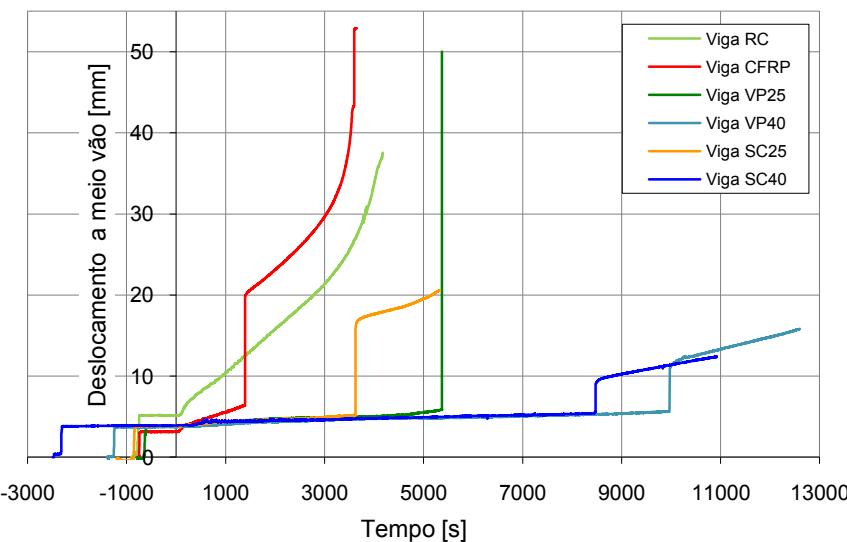


Figura 4.63 Deslocamento a meio vão das vigas em função do tempo de exposição ao calor.

Na figura anterior é possível observar um aumento repentino no valor do deslocamento para tempos inferiores a zero. Estes instantes correspondem ao momento em que a carga foi aplicada em cada uma das vigas. A norma ISO 834 recomenda que até à activação dos queimadores deverá aguardar-se um período de 30 minutos, permitindo que o valor da deformação estabilize. Em todos os ensaios realizados verificou-se que as leituras estabilizaram para períodos inferiores, pelo que se decidiu sujeitar as vigas ao calor antes de decorridos os 30 minutos. Na tabela 4.19 apresentam-se os valores do deslocamento a meio vão das vigas para o instante t=0 segundos.

Tabela 4.19. Valores medidos do deslocamento a meio vão ($\delta_{\text{meio vão}}$) das vigas para t=0 segundos.

Designação da viga	$\delta_{\text{meio vão}} [\text{mm}]$
RC	5.16 ($\cong L/291$)
CFRP	3.14 ($\cong L/478$)
VP25	3.77 ($\cong L/398$)
VP40	3.75 (= L/400)
SC25	3.89 ($\cong L/386$)
SC40	3.91 ($\cong L/384$)

Como referido no ponto 4.5.2.4, a distância entre cargas nos ensaios do forno (0.55 m) foi ligeiramente superior à utilizada nos ensaios às vigas de referência (0.50 m), sendo que a última foi a considerada na estimativa da carga que provoca a flecha de L/250 nas vigas. Assim, recorrendo aos métodos indicados no ponto 4.4.1, à distância correcta entre cargas e ao valor no módulo de elasticidade do betão com idade próxima das vigas ensaiadas (116 dias), estimaram-se os valores das flechas a meio vão provocadas pelas cargas utilizadas nestes ensaios (ver tabela 4.18). Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.20.

Tabela 4.20. Estimativas das flechas a meio vão das vigas após correcção dos valores de carregamento e posicionamento das cargas.

Designação da viga	$\delta_{\text{meio vão}} [\text{mm}]$
RC	6.40
CFRP a SC40	5.73

Relativamente à viga não reforçada (Viga RC), tendo em conta as simplificações inerente à metodologia de cálculo utilizada, a diferença entre o valor medido da flecha e a estimativa efectuada é aceitável. Recorde-se que se recorreu ao método dos coeficientes globais para estimar a deformação, que, entre outras simplificações, considera uma rigidez uniforme ao longo de toda a viga. Além disso, a aplicação deste método envolve a consulta visual de ábacos que se revelou um processo pouco preciso.

Nas vigas reforçadas os valores medidos das flechas a meio vão no instante t=0 segundos são significativamente inferiores à estimativa indicada na tabela 4.20. No procedimento de cálculo recorreu-se a uma fórmula simplificada para a determinação da rigidez de flexão da secção reforçada em estado fendilhado. Além disso, tal como no caso da viga não reforçada, foi admitida uma rigidez constante ao longo de toda a viga. No entanto, no primeiro ensaio de resistência ao fogo (Viga RC) observou-se a libertação de fumos nalgumas zonas do isolamento lateral. Para evitar que tal fenómeno se repetisse, aumentou-se a quantidade de mástique isolante (ver figura 4.42 a), colocaram-se as placas de isolamento a exercer pressão lateral na viga e preencheu-se o espaço entre as paredes laterais do forno e a face inferior das vigas com pedaços de lã mineral. Estas três medidas terão introduzido alguma restrição à deformação das vigas. Os argumentos apresentados

podem, em parte, justificar a diferença registada entre os valores de deformação teóricos e experimentais.

Atendendo de novo à figura 4.63, observa-se um aumento gradual da deformação nas *vigas RC* e *CFRP* (vigas sem protecção ao fogo) logo após o momento de activação dos queimadores. Entre estas duas é notório que na *Viga RC* a taxa de aumento de deformação é superior, até ao momento em que ocorreu a rotura do sistema de reforço na *Viga CFRP*. Neste instante, 1380 segundos (23 minutos) após se ter ligado o forno, a flecha da *Viga CFRP* registou um aumento instantâneo de cerca de 13.5 mm, passando de 6.4 mm para 19.9 mm. Com a rotura do reforço, a rigidez da *Viga CFRP* tornou-se semelhante à da *Viga RC*, no entanto, como a carga aplicada era superior, verificou-se que a deformação aumentou a um ritmo mais elevado. Em ambas as vigas observou-se um aumento quase exponencial do valor da flecha próximo do momento da rotura. Refira-se que a *Viga RC* não chegou a colapsar mas, atendendo à forma da curva, em particular ao aumento quase exponencial do descolamento a meio vão, deveria estar na iminência do colapso. Esta ocorreria para uma flecha menor do que na *Viga CFRP* (37 mm contra 52 mm na *Viga CFRP*). No entanto, é importante realçar que o aumento do valor da flecha da *Viga RC* entre o início do ensaio e o instante da rotura (32.4 mm) é praticamente idêntico ao registado na *Viga CFRP* entre o momento da rotura do reforço e o colapso da viga (33 mm). De facto, quando ocorre a rotura do sistema de reforço à flexão, a secção de betão armado sofre um aumento generalizado das tensões actuantes. Esta situação assemelha-se à aplicação instantânea de uma carga adicional, o que, em parte, pode explicar o valor superior da flecha a meio vão no momento da rotura. Nos instantes finais do ensaio à *Viga RC* é notório que a taxa de aumento do deslocamento-tempo sofreu uma ligeira diminuição, motivada pelo facto de a viga ter entrado em contacto com uma peça metálica, o que constituiu um ponto de apoio adicional. Esse acontecimento, associado à falha no sistema de isolamento lateral, motivou a interrupção do ensaio.

Relativamente às vigas com sistemas de protecção ao fogo (VP25, VP40, SC25 e SC40), verificou-se que o aumento do valor do deslocamento das vigas a meio vão apresentou taxas bastante mais reduzidas. Esta situação era esperada, já que, tal como se concluiu anteriormente, estes sistemas permitiram que a temperatura nas vigas fosse inferior, o que se repercutiu numa menor perda de rigidez por efeitos térmicos.

Realce-se que na viga protegida com uma camada de argamassa à base de vermiculite e perlite de 25 mm de espessura (*Viga VP25*), o colapso total ocorreu imediatamente após à rotura do sistema de reforço. Apesar de o valor da carga actuante ser inferior ao da carga resistente da viga de betão armado não reforçada, a rotura do reforço está associada a um fenómeno brusco e dinâmico, pelo que não é correcta a simples comparação entre valores de forças estáticas. De facto, os efeitos de uma força aplicada dinamicamente equiparam-se aos de uma carga superior aplicada lenta e progressivamente, o que pode explicar o fenómeno verificado nesta viga. Este ensaio mostra a importância deste fenómeno.

As conclusões que se podem retirar em relação à eficácia dos sistemas de protecção já foram apresentadas anteriormente, com o sistema de argamassa de vermiculite e perlite a registar maiores tempos de protecção do reforço, comparativamente às placas de silicato de cálcio com espessuras idênticas. Tal como se pode observar na figura 4.63, os valores dos deslocamentos a meio vão das vigas no momento da rotura do reforço não registam uma diferença assinalável.

No ponto 4.5.3.3 foi possível concluir que com o aumento da temperatura no forno, nas secções centrais das vigas a ligação betão-CFRP foi-se degradando, conduzindo a um acréscimo das tensões de corte na extremidade do laminado, onde a ligação ainda permanecia praticamente inalterada. Com o decorrer dos ensaios, a temperatura dos diversos materiais constituintes foi aumentando, resultando numa diminuição das suas propriedades de resistência e rigidez. Consequentemente, tal como se observou na figura 4.63, verificou-se um incremento dos deslocamentos da viga, o que, por sua vez, provocou um aumento das tensões de corte da zona aderente do laminado até um valor tal

que ocorreu a rotura da ligação. De uma forma simplificada, a partir do momento em que na zona central da viga ocorreu a destruição da ligação betão-CFRP, o sistema de reforço terá passado a funcionar como um “tirante” com as extremidades fixas por aderência ao betão. Como esse “tirante fictício” se encontra na face inferior da viga, a perda de rigidez da secção de betão e o consequente aumento da deformação provocam um acréscimo da tracção no “tirante” até que esta atinja a força de amarração disponível nas extremidades.

Nas vigas protegidas constata-se que nos instantes posteriores à rotura do reforço as taxas de aumento da deformação são semelhantes entre si, mas inferiores à da Viga CFRP, o que leva a concluir que este fenómeno não provocou a destruição do material de protecção, dado que este continua a ser eficaz após a rotura do reforço.

Em todas as vigas reforçadas foram colocados extensómetros nas armaduras longitudinais na secção de meio vão das vigas, tal como referido no ponto 4.5.1.1. No entanto, por razões que não foi possível explicar, os resultados obtidos não são válidos, apesar de se terem aplicado às leituras os factores correctivos dependentes da temperatura recomendados pelo fabricante. A título ilustrativo apresenta-se na figura 4.64 o diagrama extensão-tempo da Viga CFRP, onde se pode observar que, ao fim de pouco tempo de exposição ao calor, ocorreu uma diminuição dos valores de extensão de tracção, quando, na realidade, a variação deveria ter sido a inversa, já que a deformação da viga foi sempre aumentando. Além disso, a partir do instante em que ocorreu a rotura do sistema de reforço (1380 segundos), as leituras sofreram alterações inexplicáveis. Nas restantes vigas verificaram-se situações semelhantes, pelo que os resultados destes sensores não foram utilizados para qualquer tipo de análise.

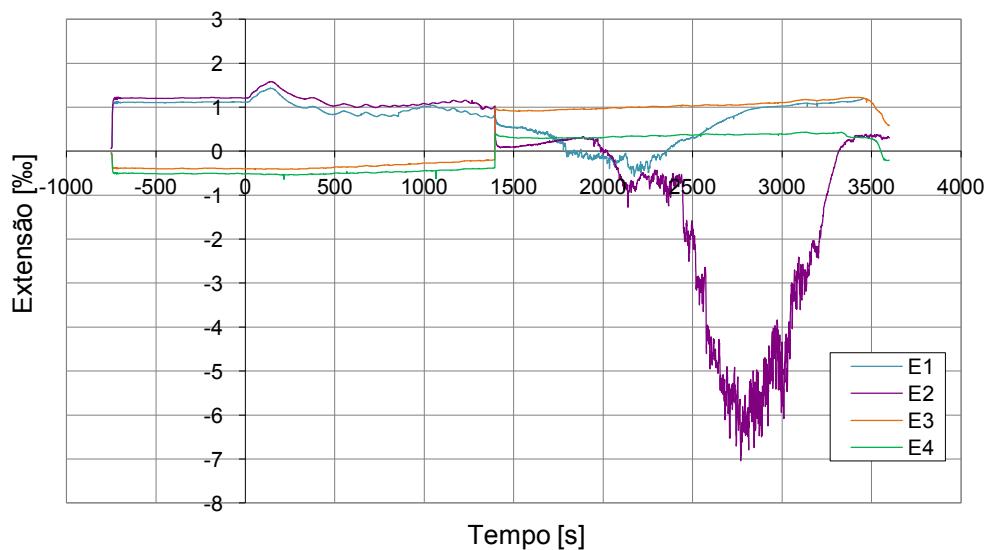


Figura 4.64. Diagrama extensão-tempo da Viga CFRP.

4.5.3.5. Observações pós-fogo

Neste ponto do documento será apresentado um conjunto de imagens das vigas após os ensaios de resistência ao fogo que ajudam a entender o comportamento do sistema de reforço durante a solicitação térmica, e como os diferentes sistemas de protecção contribuíram para a melhoria desse comportamento. Além disso, algumas das conclusões apresentadas nos pontos anteriores podem ser comprovadas pela observação das imagens aqui apresentadas.

a) Viga RC

O ensaio à viga de betão armado não reforçada e sem qualquer tipo de protecção ao fogo foi interrompido ao fim de 69 minutos de exposição ao incêndio padrão devido a uma falha no sistema de isolamento lateral, que apresentava claros sinais de um colapso eminentes, e ao facto de a viga ter entrado em contacto com uma peça metálica que constituiu um novo apoio. Na figura 4.65 a) é ilustrada uma vista inferior deste sistema de isolamento lateral após o ensaio, onde se pode observar o seu estado avançado de degradação. Devido a esta situação não foi possível que esta viga atingisse o colapso, ainda assim, registaram-se fendas com alguma expressão na zona central da viga (figura 4.65 b). À medida que a temperatura no forno foi aumentando, as propriedades de resistência e rigidez do betão e do aço foram, progressivamente, diminuindo, o que contribuiu para um aumento da deformação e da abertura de fendas de tracção.

Com a destruição do sistema de isolamento lateral, as faces laterais da viga deixaram de constituir uma fronteira adiabática. Com isto, as arestas inferiores da viga foram as mais afectadas pela acção do calor, dado que se possibilitou a existência de dois planos de penetração da acção térmica. Por esta razão, foi visível uma forte degradação destas zonas, existindo, nalguns pontos, desagregação de betão, tal como se observa na figura 4.65 b). Devido às elevadas temperaturas, a água de constituição do betão evaporou. Neste processo, caso o vapor de água fique aprisionado no interior do betão, ocorre um aumento da pressão interior, podendo provocar o seu destacamento (*spalling*). Além disso, devido às elevadas temperaturas, ocorreu a destruição dos diversos constituintes da pasta de cimento, contribuindo para a perda de propriedades ligantes, facilitando, por isso, a desagregação.

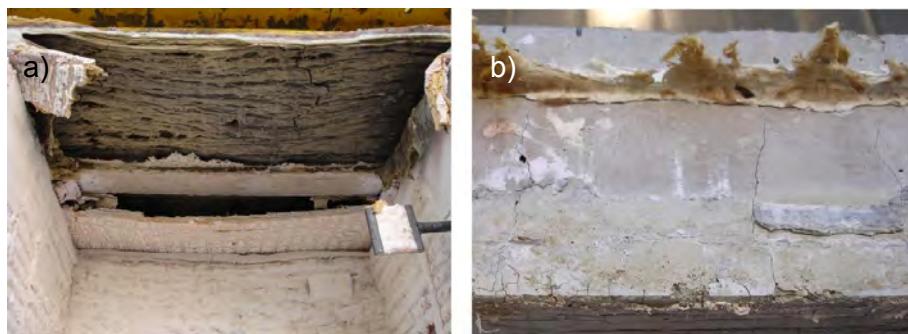


Figura 4.65. Viga RC: a) destruição do sistema de isolamento lateral; b) fendilhação na zona central da viga e desagregação de betão nas arestas inferiores.

b) Viga CFRP

No ensaio à viga reforçada sem qualquer tipo de protecção ao fogo verificou-se a rotura do reforço ao fim de 23 minutos de exposição ao incêndio padrão. Tal como se observa na figura 4.66 a) o modo de rotura foi o descolamento da extremidade do laminado junto do apoio esquerdo da viga. Nessa figura é possível observar que essa extremidade praticamente não sofreu acção do calor, pelo que as características de aderência se mantiveram praticamente inalteradas. Assim, o descolamento ocorreu por rotura do betão devido a tensões de corte. Por outro lado, as secções centrais da viga, como se concluiu nos pontos anteriores, estiveram sujeitas a temperaturas bastante superiores à T_g da resina de colagem, o que conduziu à perda de aderência resina-betão ao fim de pouco tempo de exposição. A figura 4.66 d) mostra o sistema de reforço completamente destacado da viga na sua zona central. Na figura 4.66 c) observa-se que a extremidade do laminado na zona das paredes do forno ficou protegido da acção térmica por um pedaço de lã mineral (além da própria isolamento conferido pelas paredes do forno) que foi colocado para evitar um ponto de fuga de gases e calor para o exterior. A extensão do reforço que ficou protegida, cerca de 20 centímetros, está ilustrada na figura 4.66 b). Esta extensão corresponde, aproximadamente, à espessura das paredes do forno (ver figura 4.45 da

página 113). Com a sequência de figuras seguinte é possível perceber que, após o descolamento do reforço na zona central da viga, o laminado de CFRP passou a comportar-se como um “tirante” com as extremidades fixas através da aderência ao betão.



Figura 4.66. Viga CFRP: a) descolamento da extremidade do laminado; b) comprimento do laminado que ficou protegido; c) isolamento do laminado na zona da parede do forno; d) zona central do laminado completamente destacada da viga.

A temperatura máxima atingida na face inferior da secção de betão foi cerca de 640°C. Este valor é bastante superior à temperatura de decomposição da resina de colagem, que é cerca de 380°C. Recorde-se que nos ensaios de DSC/TGA se concluiu que esta resina apresentava uma grande quantidade de matéria incombustível (72% em massa), pelo que, apesar das elevadas temperaturas atingidas no ensaio de resistência ao fogo era previsível que este material não fosse totalmente consumido. A figura 4.67 a) mostra a rotura da secção central da viga (que ocorreu ao fim de 60 minutos), onde é visível que grande parte da resina de colagem ainda ficou aderente ao laminado de CFRP.

Nos ensaios de DSC/TGA ao laminado de CFRP conclui-se que existiam dois processos de decomposição distintos: a decomposição da matriz polimérica e a decomposição das fibras de carbono. A temperatura de decomposição do laminado (cerca de 380°C) foi determinada a partir do primeiro destes processos. Desta forma, previa-se que a resina que envolve a fibras de carbono do laminado fosse total ou parcialmente consumida. Relativamente às fibras, observou-se nos ensaios de DSC/TGA que a sua decomposição apenas era iniciada para temperaturas próximas de 700°C, pelo que não era expectável que nos ensaios de resistência ao fogo este material fosse totalmente consumido. A figura 4.67 b) confirma que as previsões iniciais estavam correctas, pois são visíveis fibras de carbono individualizadas devido à combustão da matriz polimérica.



Figura 4.67. Viga CFRP: a) rotura por flexão da viga, onde se observa a resina de colagem ainda aderente ao laminado; b) decomposição da matriz polimérica do laminado deixando expostas as fibras de carbono.

c) Viga VP25

Neste ensaio a viga atingiu a rotura por flexão com rotura dos varões traccionados na secção de meio vão imediatamente após o descolamento do laminado. Estes fenómenos ocorreram após 89 minutos de exposição ao incêndio padrão. Na figura 4.68 a) apresenta-se uma vista geral da viga após o ensaio, onde se observa a rotura da secção central. É ainda visível que a camada de argamassa de vermiculite e perlite, apesar da grande deformação, permaneceu aderente à face inferior da viga. Pela observação da figura 4.68 b) conclui-se que a rede metálica colocada no interior da argamassa teve o desempenho pretendido. O aumento da deformação, provocou a fendilhação da camada de protecção, no entanto, devido à presença da rede, nunca se destacou da viga. Nessa figura, para além das fendas transversais, são visíveis pequenas fendas com orientação aleatória (semelhantes às fendas características dos fenómenos de retracção por secagem), causadas pela evaporação da água de constituição do material de protecção.



Figura 4.68. Viga VP25: a) rotura por flexão da viga; b) vista inferior do sistema da argamassa de vermiculite e perlite após o ensaio de resistência ao fogo.

Tal como em todos ensaios onde foram aplicados sistemas de protecção nas vigas, a temperatura na face inferior da viga não atingiu os valores da T_d da resina e do laminado. Por esta razão, era expectável que os danos no sistema de reforço fossem menos severos do que os registados na Viga CFRP. Na figura 4.69 a) é visível que o laminado numa primeira fase descolou da viga na zona central e que a rotura ocorreu na sua extremidade através do betão. Este mecanismo, idêntico ao verificado na Viga CFRP, ocorreu em todas as vigas reforçadas. Na mesma figura observa-se uma menor degradação do laminado, comparativamente à Viga CFRP. Destaca-se a zona central, ilustrada em detalhe na figura 4.69 b), onde se observaram alguns cortes nas fibras. No entanto, é possível que esses cortes tenham sido causados pela elevada deformação da viga após o seu colapso. De qualquer forma, a sua existência não alterou o mecanismo de rotura do reforço.



Figura 4.69. Viga VP25: a) rotura do reforço por descolamento da extremidade; b) pormenor dos cortes nas fibras numa secção central.

d) Viga VP40

A viga protegida com uma camada de 40 mm de espessura de argamassa à base de vermiculite e perlite não atingiu a rotura, dado que os queimadores foram desactivados após 210 minutos de

funcionamento. Com este sistema conseguiu-se proteger o reforço de CFRP durante 167 minutos, instante em que ocorreu o descolamento da zona de extremidade. Na figura 4.70 a) observa-se que, à semelhança do que ocorreu na Viga VP25, a ligação betão-resina perdeu-se na zona central numa fase prematura do ensaio. Nessa figura é ainda possível observar a fendilhação do sistema de protecção. Mais uma vez, a rede metálica colocada no interior na argamassa impediu o seu colapso. Na figura 4.70 b) observa-se pelo aspecto do sistema de protecção que a zona próxima do apoio foi sujeita a uma menor carga térmica.

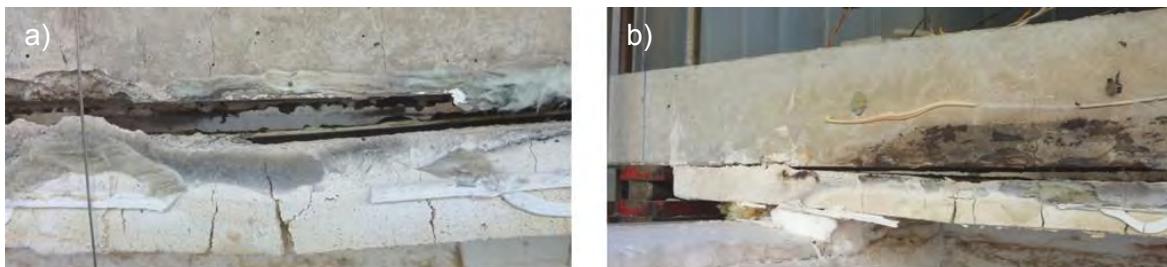


Figura 4.70. Viga VP40: a) perda de aderência betão-resina na zona central da viga; b) comparação do aspecto do sistema de protecção nas zonas de extremidade do laminado e central da viga.

e) Viga SC25

No ensaio à viga protegida com uma placa de silicato de cálcio de 25 milímetros de espessura, tal como no caso da Viga RC, não foi possível atingir a rotura da viga devido a uma falha no sistema de isolamento lateral quando estavam decorridos 86 minutos. Ainda assim, verificou-se um tempo de protecção do sistema de reforço de 60 minutos. O mecanismo de rotura do reforço foi idêntico ao de todas as outras vigas. Na figura 4.71 a) ilustra-se o aspecto geral da viga após o ensaio. A figura 4.71 b) mostra com maior detalhe a zona central, onde se observa que a placa de silicato de cálcio estava na iminência do colapso. Ainda assim, o recurso à fixação mecânica (chapas quinadas em forma de U) impediu que a destruição do sistema de protecção ocorresse numa fase prematura do ensaio. Apesar disso, a placa de silicato de cálcio apresentou um menor número de fendas do que a argamassa de vermiculite e perlite, devido à presença de fibras e de uma menor quantidade de água na sua constituição.



Figura 4.71. Viga SC25: a) aspecto geral da Viga SC25 após o ensaio; b) detalhe da zona central da viga com colapso eminentente do sistema de protecção.

f) Viga SC40

O ensaio à viga protegida com uma placa de silicato de cálcio de 40 milímetros de espessura foi interrompido ao fim de 182 minutos devido à iminência duma falha no sistema de isolamento lateral. Não foi atingida a rotura da viga, no entanto, conseguiu-se um tempo de protecção do reforço de 137 minutos. Recorde-se que devido à elevada duração deste ensaio, o sistema de isolamento lateral era constituído por duas placas de silicato de cálcio, às quais se sobreponeram duas placas de lã mineral. Na figura 4.72 a) apresenta-se uma vista inferior da viga, onde se observa a degradação destas placas, o que obrigou à interrupção do ensaio. Nessa figura é ainda possível observar a fendilhação da placa de protecção da viga, bem como 2 das 4 chapas de fixação. O mecanismo de rotura do reforço foi idêntico ao das restantes vigas, tal como se observa na figura 4.72 b).



Figura 4.72. Viga SC40: a) vista inferior da Viga SC40 e do sistema de isolamento lateral após o ensaio; b) detalhe da rotura do sistema de reforço na zona de extremidade do laminado.

4.5.3.6. Análise comparativa

O objectivo deste ponto é comparar a eficácia dos dois sistemas de protecção utilizados nos ensaios de resistência ao fogo. Pela observação dos diagramas apresentados em 4.5.3.3 e 4.5.3.4 já foi possível concluir que a protecção em argamassa à base de vermiculite e perlite é o sistema que garante um maior tempo de protecção. Ainda assim, elaborou-se o diagrama presente na figura 4.73, onde se ilustra, para cada uma das vigas, o tempo de exposição ao incêndio padrão que levou a que a temperatura na face inferior (interface betão-resina) da secção de meio vão (média das leituras dos termopares T1 e T1") e ao nível da parede do forno (TP.F) atingissem a T_g do adesivo de colagem e, ainda, o tempo de exposição que provocou a rotura do sistema de reforço.

Na figura 4.73 observa-se que na viga com protecção de vermiculite e perlite de 40 mm de espessura (Viga VP40) a temperatura de transição vítreia da resina de colagem foi atingida após o mesmo tempo de exposição da viga protegida com material idêntico, mas com 25 mm de espessura (Viga VP25). Além disso, aquela temperatura foi atingida mais rapidamente na Viga VP40 do que na Viga SC40, com protecção de silicato de cálcio de 40 mm. Esta situação não correspondeu à esperada. Apesar disso, verificou-se que na Viga VP40 o tempo de protecção do reforço foi bastante superior ao das vigas VP25 e SC40, o que demonstra que o posicionamento dos termopares T1 e T1" da Viga VP40 não deverá ter sido o correcto.

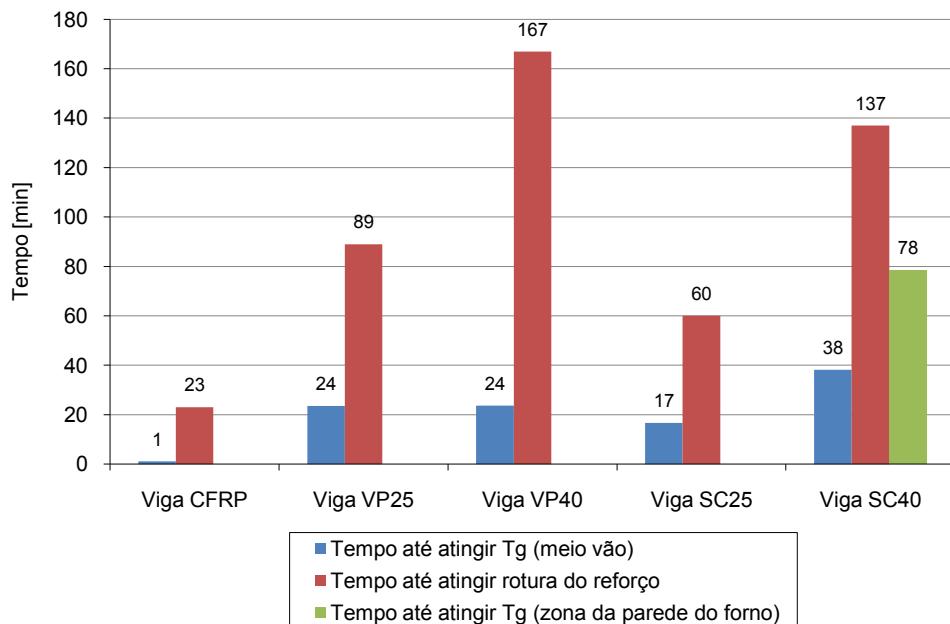


Figura 4.73. Tempos até atingir T_g e rotura do reforço.

A diferença entre os instantes em que se atingiu o T_g do adesivo nas secções de meio vão e a rotura do reforço é significativa, no entanto, está relacionada com o facto de as extremidades do laminado estarem sujeitas a uma carga térmica inferior. Esta afirmação pode ser comprovada no diagrama da Viga SC40, onde foram necessários 78 minutos de exposição para que a temperatura da resina de colagem na secção ao nível da parede do forno atingisse o valor de T_g . Ainda assim, verificou-se que nessa viga a rotura do reforço só ocorreu ao fim de 137 minutos. Esta situação é motivada pelo facto de a zona de extremidade do laminado nunca ter ultrapassado os 30°C (tal como se observa na figura 4.56) e, como tal, por aí se terem preservado as propriedades de aderência iniciais.

Na tabela 4.21 apresenta-se um conjunto de valores notáveis que permitem comparar a eficácia dos sistemas de protecção utilizados.

Tabela 4.21. Resumo de alguns dos resultados dos ensaios de resistência ao fogo das vigas reforçadas (valores obtidos a meio vão).

	Viga CFRP	Viga VP25	Viga VP40	Viga SC25	Viga SC40
Temperatura na ligação betão-resina no momento da rotura do reforço [°C]	414	176	187	119	146
Taxa média de aumento de temperatura até à rotura do reforço na ligação betão-resina [°C/min]	17.09	1.76	0.95	1.51	0.89
Deslocamento a meio vão no momento da rotura do reforço [mm]	6.38	5.86	5.81	5.17	5.37
Acréscimo de deslocamento a meio vão desde o início do ensaio até à rotura do reforço [mm]	3.23	2.09	2.07	1.29	1.46
Tempo de protecção do reforço [min]	23	89	167	60	137

O principal parâmetro que indica a eficácia de um determinado sistema é o tempo de protecção da estrutura que se consegue garantir. Nesse aspecto é indiscutível a vantagem da argamassa de vermiculite e perlite face ao silicato de cálcio. No entanto, atendendo aos valores obtidos para outros

parâmetros, esta vantagem poderá não ser tão óbvia. Tal como se concluiu pela observação dos diagramas temperatura-tempo, nos momentos iniciais dos ensaios às vigas protegidas com argamassa de vermiculite e perlite, as temperaturas aumentaram lentamente devido à evaporação da água de constituição. Quando grande parte dessa água é evaporada, a taxa de aumento das temperaturas é superior, o que justifica que, em média, os valores dos aumentos de temperatura até à rotura do reforço em °C/min sejam superiores aos verificados nas vigas protegidas com silicato de cálcio.

As zonas de extremidade do laminado, por se encontrarem sobre a parede interior do forno, não foram sujeitas à mesma carga térmica que as secções de meio vão. Nestas zonas de amarração é provável que o calor que lhes foi transmitido não tenha sido suficiente para evaporar toda a água de constituição da argamassa de vermiculite e perlite, permitindo que as temperaturas fossem inferiores às verificadas nas vigas protegidas com silicato de cálcio. Assim, como as extremidades do reforço apresentavam temperaturas inferiores, a sua resistência a tensões de corte foi pouco penalizada, possibilitando que se atingissem grandes temperaturas e deformações na secção de meio vão, sem que, com isso, ocorresse o colapso do reforço. Esta conclusão foi retirada pela observação dos valores da temperatura e de acréscimo de deslocamento das vigas protegidas com argamassa de vermiculite e perlite, presentes na anterior tabela. Desta forma, apesar de numa primeira análise alguns destes parâmetros sugerirem uma situação contrária, foi possível concluir que a protecção de vermiculite e perlite possibilita uma protecção do reforço mais eficaz.

Finalmente, os resultados obtidos na viga CFRP mostraram que protegendo apenas as zonas de extremidade do laminado foi obtido um tempo de resistência do reforço consideravelmente inferior aos registados nas vigas em que se aplicaram sistemas de protecção em toda a extensão do reforço (vigas VP25, VP40, SC25 e SC40), o que contraria os resultados de Blonrock *et al.* [4.21]. Estes investigadores tinham concluído que protegendo apenas a zona de amarração dos laminados os tempos de resistência ao fogo eram semelhantes aos verificados em vigas protegidas em toda a extensão do reforço.

4.5.3.7. Regulamentação e campo de aplicação

Este ponto tem como objectivo mostrar que os sistemas de protecção ao fogo utilizados possibilitaram que as vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminado de fibras de carbono respeitassem a regulamentação portuguesa de segurança contra incêndios em edifícios, em vigor a partir de 1 de Janeiro de 2009 [4.22], em particular para edifícios de habitação. Este é um exercício teórico, dado que a pequena escala das vigas estudadas, impossibilitaria, em princípio, a sua utilização directa em edifícios correntes. A regulamentação exige que sejam cumpridos um conjunto de critérios, no entanto, apenas serão considerados aqueles que foram passíveis de observação durante os ensaios de resistência ao fogo.

O Decreto-Lei nº 220/2008 classifica o desempenho dos diversos elementos de um edifício de acordo com os seguintes critérios:

- Resistência (R) – capacidade de manter a resistência estrutural necessária durante o tempo especificado de exposição ao fogo;
- Estanquidade (E) – capacidade de manter a sua integridade de forma a impedir a passagem de fumos ou gases combustíveis durante o tempo especificado de exposição ao fogo.
- Isolamento (I) – capacidade de limitar o aumento de temperatura média em toda a face não exposta ao incêndio em 140°C e o aumento da temperatura em qualquer ponto em 180°C, durante o tempo especificado de exposição ao fogo.

Os elementos constituintes de um edifício são classificados de acordo com o tempo, expresso em minutos, durante o qual os critérios supracitados são respeitados. Para elementos com funções de suporte de carga e de compartimentação resistente ao fogo (critérios REI) em pavimentos e coberturas, onde as vigas ensaiadas se poderiam integrar, são utilizadas as seguintes classificações: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 e 240.

A mesma regulamentação define a altura máxima do edifício de habitação onde o elemento pode ser utilizado, de acordo com a sua resistência ao fogo. Elementos estruturais que respeitem o critério R 30 (mantêm a resistência estrutural durante 30 minutos de exposição ao fogo) podem ser aplicados em edifícios até 9 metros de altura e um piso abaixo daquele onde se situa o acesso principal para as equipas de bombeiros (piso de referência); elementos estruturais que respeitem o critério R 60 podem ser utilizados em edifício até 28 metros e 3 pisos abaixo do piso de referência; elementos estruturais que respeitem R 90 podem ser utilizados em edifícios até 50 metros de altura e 5 pisos abaixo do piso de referência; e, por fim, elementos que respeitem R 120 podem ser utilizados em edifícios de habitação com altura superior a 50 metros e mais de 5 pisos abaixo do plano de referência.

A figura 4.74 compara os tempos de protecção do reforço obtidos nas 4 vigas protegidas com o tempo em que ocorreu o descolamento na viga sem protecção. Na mesma figura estão assinalados os limites mínimos de resistência ao fogo (critério R) exigidos para cada classe de alturas de edifícios habitacionais. Refira-se que, de um modo conservativo, se está a considerar que o instante em que as vigas perdem a capacidade de manter a sua resistência estrutural (valor que define a classificação R) corresponde ao momento da rotura do reforço. Tal como se observou nos ensaios às vigas reforçadas, após o descolamento do laminado a capacidade de suporte da carga aplicada manteve-se por um período considerável. No entanto, o ensaio à viga protegida com argamassa de vermiculite e perlite mostrou que a rotura do reforço está associada a um aumento brusco das solicitações da secção de betão armado, podendo levar ao colapso da viga, razão pela qual se optou por considerar o instante da rotura do reforço como o valor que define a classificação R.

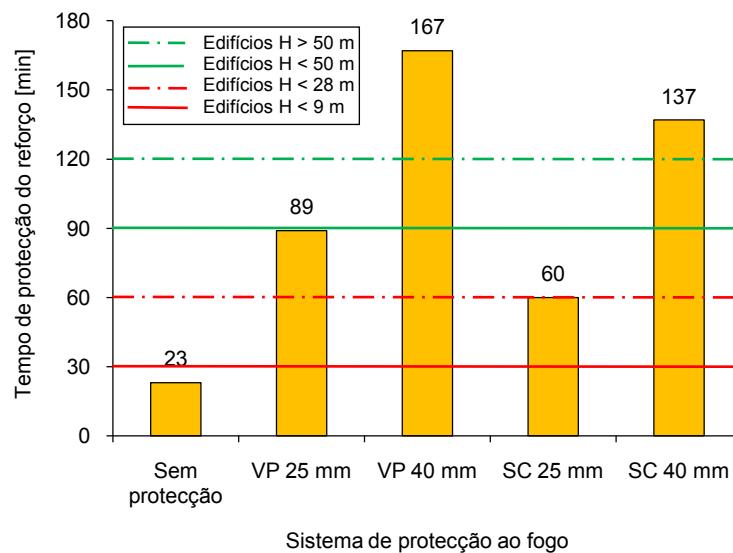


Figura 4.74. Tempo de protecção do reforço e campo de aplicação das vigas testadas.

Por observação da figura anterior conclui-se que a viga reforçada sem qualquer tipo de protecção ao fogo não cumpre os requisitos mínimos para edifícios habitacionais até 3 pisos. Ao aplicar as protecções de 25 mm de espessura, conseguiu-se assegurar as condições de segurança contra incêndio requeridas em edifícios até 9 pisos, o que corresponde à maioria dos complexos habitacionais. Os sistemas de protecção de 40 mm de espessura permitiram ultrapassar as condições mínimas para edifícios com mais de 16 pisos.

Relativamente aos requisitos de isolamento, estanquidade e isolamento, em todas as vigas onde foi aplicado um sistema de protecção ao fogo foi possível garantir o mesmo tempo de protecção que se verificou para o critério de resistência. Em suma, as vigas protegidas com protecções de 25 mm (vistas VP25 e SC25) são classificadas como REI60, enquanto as vigas com protecção de espessura de 40 mm atingiram a classificação REI120.

4.5.4. Conclusões

No dimensionamento das vigas reforçadas optou-se por utilizar um comprimento de laminado coincidente com a dimensão exterior do forno. Por esta razão, a zona de amarração ficou coincidente com as paredes interiores do forno. Consequentemente, a solicitação térmica foi bastante inferior à que se registou na zona central das vigas, onde se conseguiu uma proximidade notável com a acção definida na norma ISO 834 [4.15]. Na viga reforçada e sem qualquer sistema de protecção ao fogo foram registados valores de temperatura na interface betão-resina bastante superiores à temperatura de transição vítreia da resina numa face inicial do ensaio. No entanto, a rotura do sistema de reforço ocorreu ao fim de 23 minutos de exposição, quando na zona central da viga se mediram temperaturas superiores ao valor da temperatura de decomposição da resina e do laminado de CFRP. Uma observação pós-fogo desta viga permitiu confirmar o comportamento do reforço que a análise dos valores das temperaturas fez transparecer. Na zona central da viga, sujeita ao incêndio padrão, a ligação entre o laminado e o betão da viga destruiu-se ao fim de poucos minutos, o mesmo não tendo ocorrido na extremidade do laminado, onde o isolamento conferido pelas paredes do forno permitiu que as propriedades da ligação betão-CFRP permanecessem praticamente inalteradas. A partir deste instante, o laminado passou a funcionar como um “tirante”, com as suas extremidades fixas através da aderência ao betão. Com o aumento das temperaturas na viga, as suas propriedades de rigidez e resistência foram diminuindo. Previsivelmente, registaram-se incrementos no deslocamento a meio vão, que resultaram num aumento da deformação do laminado e, em consequência, num acréscimo da força de tracção no laminado e das tensões de corte na amarração. A rotura do reforço ocorreu quando essas tensões igualaram a tensão resistente do betão ao corte.

Nas vigas em que se aplicaram sistemas de protecção ao fogo, assistiu-se a um comportamento idêntico ao da Viga CFRP, diferindo apenas nos valores de temperatura atingidos, que, no instante da rotura do reforço, foram intermédios entre as temperaturas de transição vítreia e de decomposição da resina de colagem e do CFRP. Para as vigas protegidas com argamassa à base de vermiculite e perlite de 25 e 40 mm de espessura conseguiram-se tempos de protecção do reforço de 89 e 167 minutos, respectivamente. Quando se protegeram as vigas com placas de silicato de cálcio com iguais espessuras, os tempos de protecção medidos foram de 60 e 137 minutos. Por simples observação destes resultados concluiu-se que a argamassa de vermiculite e perlite constitui o material de protecção mais eficaz. Devido a falhas no sistema de isolamento lateral em alguns dos ensaios, que obrigaram à sua interrupção, e a no ensaio à Viga VP40 se ter atingido o instante máximo para o qual o incêndio padrão estava programado, não foi possível uma análise comparativa entre tempos de protecção das vigas após a rotura do reforço.

Os valores dos tempos de protecção do reforço observados têm a particularidade de terem sido obtidos para uma situação em que a zona de amarração dos laminados estava fortemente isolada. De facto, numa extensão de alguns centímetros da sua extremidade, não foram atingidas temperaturas superiores a 30°C. Documentos como o Bulletin 14 da fib [4.17] ou o ACI 440.2R-08 [4.16] referem que no cálculo estrutural para um cenário de incêndio se poderá considerar a resistência do sistema de reforço até ao instante em que o valor da menor temperatura de transição vítreia dos materiais que o constituem for atingido. No entanto, esta afirmação pressupõe que as condições de exposição e protecção do reforço são iguais ao longo da sua extensão, o que não sucedeu no presente estudo. No entanto, mostrou-se que este limite de temperatura pode ser

bastante superior à temperatura de transição vítreia, caso a extremidade do reforço esteja correctamente isolada.

Em suma, a realização dos ensaios de resistência ao fogo permitiu perceber qual a influência que este tipo de acção tem sobre as vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono. Além disso, através dos materiais de protecção testados, foi possível concluir que, apesar da susceptibilidade do sistema de reforço a temperaturas elevadas, existem formas exequíveis de atrasar o momento da sua rotura, permitindo que sejam respeitadas as exigências presentes na regulamentação nacional actualmente em vigor. Neste campo, obtiveram-se as classificações de REI60 e REI120 para as vigas com sistemas de protecção de 25 e 40 mm de espessura, respectivamente. Os sistemas de protecção ao fogo estudados são relativamente fáceis de aplicar, pelo que o benefício no comportamento das vigas ao fogo que a sua utilização proporciona suplanta claramente o ligeiro acréscimo de mão de obra necessária para a sua aplicação.

4.6. Bibliografia

- [4.1] NP EN 12390-3, "Ensaios de betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio", IPQ, Lisboa, 2009.
- [4.2] NP EN 1992-1-1, "Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios", IPQ, Lisboa, 2010.
- [4.3] NP EN 12390-6, "Ensaios ao betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes", IPQ, Lisboa, 2003.
- [4.4] S. Cabral Fonseca, "Durabilidade de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras usados na reabilitação de estruturas de betão", Tese de Doutoramento em Engenharia Química, Universidade do Minho, 2008.
- [4.5] ISO 527, "Plastics - Determination of tensile properties. Part 1: General principles", International Standards Organization, Genève, 1993.
- [4.6] ISO 527, "Plastics - Determination of tensile properties Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics", International Standards Organization, Genève, 1993.
- [4.7] Site da empresa TRIA: <http://www.tria.pt/ppci/index.php?sc=produtos>, visitad em 20/04/2010.
- [4.8] TRIA, Sistemas de protecção passiva para estruturas metálicas, Catálogo de produtos, 2001. (citado em [4.9])
- [4.9] J.R. Correia, "GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [4.10] ISO 6721, "Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 1: General principles", International Standards Organization, Genève, 1994.
- [4.11] ISO 6721 "Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 5: Flexural vibration-non resonance method", International Standards Organization, Genève, 1996.
- [4.12] ASTM E1640, "Standard test method for assignment of the glass transition temperature by Dynamic Mechanical Analysis", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999.
- [4.13] ISO 11357, "Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles", International Standards Organization, Genève, 1997.
- [4.14] A. Gomes, J. Vinagre, "Betão Armado e Pré-Esforçado I. Volume III – Tabelas de Cálculo", AEIST, IST, Lisboa, 1997.
- [4.15] ISO 834, "Fire resistance tests. Elements of building construction", International Standards Organization, Genève, 1975.
- [4.16] ACI Committe 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI 440.2R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 73 p., 2008.
- [4.17] Fib bulletin 14, "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures", Fédération Internationale du béton (fib), Task Group 9.3 FRP, Lausanne, 2001.

[4.18] S&P Clever Reinforcement Company, "Design Guide Line for S&P FRP Systems", Brunnen, Switzerland, 58 p., 2006.

[4.19] L. C. Bank, "Composites for Construction – Structural Design with FRP Materials", Wiley, New Jersey, 551 p., 2006.

[4.20] P.J. Burke, L.A. Bisby, M.F. Green. Structural Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs at Elevated Temperature, disponível em <http://www.hughesbros.com/aslan200/NSM%20systems%20with%20elevated%20temp-BISBY.pdf>.

[4.21] H. Blontröck, L. Taerwe, P. Vandeveldé. "Fire tests on concrete beams strengthened with fibre composite laminates.", Proceedings of the third Ph.D. symposium, Vienna, 2000.

[4.22] Decreto-Lei nº 220/2008; Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, 12 Novembro 2008.

5. Simulação numérica da resposta térmica de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP e protecções ao fogo

O comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP a temperaturas elevadas tem sido estudado por diversos investigadores em todo o mundo com recurso a ensaios experimentais de resistência ao fogo. No entanto, esses ensaios envolvem bastantes meios e são dispendiosos, pelo que nos últimos anos foram desenvolvidos modelos numéricos que pretendem simular o comportamento destas estruturas em situação de incêndio.

Nesse sentido, no âmbito da presente dissertação, foi desenvolvido um modelo numérico termoquímico que pretende simular a resposta térmica de secções de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP e respectivos sistemas de protecção ao fogo, o qual é apresentado neste capítulo.

Numa primeira fase, apresenta-se sumariamente um modelo elaborado por investigadores da *American University of Sharjah* e os respectivos resultados. Seguidamente, procede-se à explicação sobre a modelação efectuada na presente dissertação das propriedades termofísicas dos materiais constituintes das vigas, à qual se segue a descrição do modelo numérico. Finalmente são apresentados os resultados, comparando-os com os obtidos na campanha experimental, descrita no ponto 4.5.

5.1. Exemplo de um estudo numérico sobre vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas CFRP a temperaturas elevadas

Neste ponto do documento são apresentados os resultados obtidos num modelo numérico desenvolvido por Hawileh *et al.* [5.1], utilizando o programa comercial ANSYS (software utilizado no presente trabalho).

Aqueles autores desenvolveram um modelo de elementos finitos tridimensional de uma das vigas de betão armado reforçada à flexão com CFRP (viga 1 da tabela 3.3 da páginas 65) ensaiada por Williams *et al.* [5.2]. Recorrendo ao software comercial ANSYS [5.3] foi efectuada uma análise termoquímica e posterior análise termo-mecânica não linear que permitiram avaliar a evolução da temperatura e da deformada da viga quando sujeita ao incêndio padrão na sua face inferior e ao carregamento gravítico aplicado na face superior. Foi considerada a variação das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais constituintes com a temperatura, incluindo os laminados de CFRP e o isolamento térmico. Dada a simetria da secção da viga, do carregamento e das condições de fronteira, apenas foi modelado um quarto da viga, tal como se observa na figura 5.1, reduzindo o número de elementos e, consequentemente, o tempo de cálculo. Na análise térmica em regime transiente foram utilizados elementos do tipo *LINK33* para modelar as armaduras e elementos do tipo *SOLID70* para a restante estrutura. Este elementos específicos para análise térmica foram posteriormente convertidos noutros que possibilitaram uma análise mecânica.

Nesse modelo a resina de colagem não foi modelada explicitamente. Em vez disso, considerou-se que, tal como as armaduras, os laminados de CFRP se apresentavam directamente ligados ao betão. No entanto, e para que no modelo se pudesse simular o descolamento do laminado durante a exposição ao incêndio, considerou-se que apenas existia ligação betão-CFRP para temperaturas do laminado inferiores a 250 C (de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Kumahara *et al.* [5.4] e Wang e Evans [5.5]) e para tensões de corte nessa interface inferiores a 4.5 MPa (de acordo com as conclusões obtidas por Varastehpour e Hamelin [5.6]).

Relativamente às propriedades térmicas e mecânicas do betão e das armaduras em aço, alvo de estudos bastante aprofundados ao longo das últimas décadas, foram utilizados valores indicados na literatura. Para os laminados de CFRP e argamassa de isolamento recorreu-se a valores sugeridos por outros investigadores [5.7-5.11]. Nas figuras 5.2 a 5.4 apresentam-se, respectivamente, os valores do módulo de elasticidade, calor específico e condutividade térmica em função da temperatura utilizados no modelo para os diversos materiais. Refira-se que essas grandezas se encontram normalizadas relativamente aos respectivos valores à temperatura ambiente. Os restantes parâmetros necessários ao cálculo da resposta das vigas sujeitas ao incêndio padrão e ao carregamento regulamentar encontram-se definidos com maior detalhe no trabalho de Hawileh *et al.* [5.1].

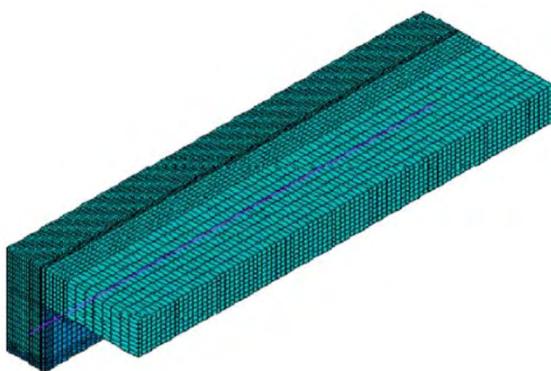


Figura 5.1. Malha de elementos finitos utilizada no modelo [5.1].

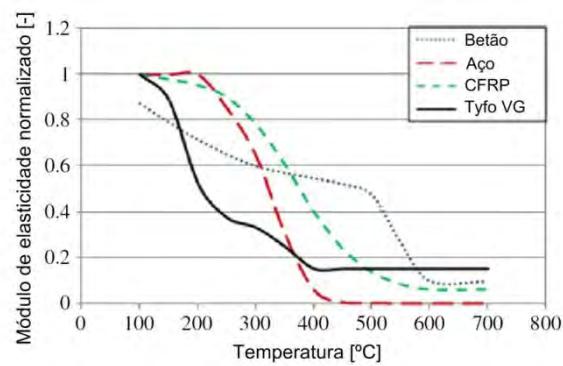


Figura 5.2. Módulo de elasticidade normalizado dos vários materiais em função da temperatura [5.1].

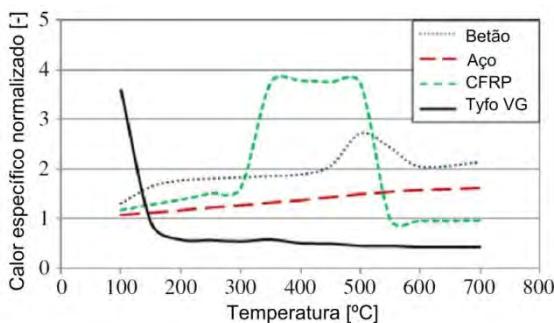


Figura 5.3. Calor específico normalizado dos vários materiais em função da temperatura [5.1].

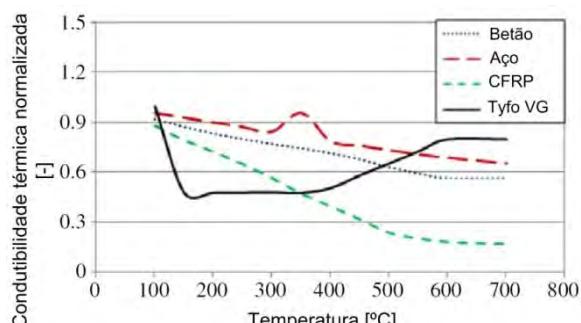


Figura 5.4. Condutibilidade térmica normalizada dos vários materiais em função da temperatura [5.1].

Para a obtenção dos resultados pretendidos foram necessários dois passos, correspondendo cada um às seguintes análises distintas: térmica e estrutural. Num primeiro passo a viga foi sujeita ao incêndio definido na norma ASTM E119 [5.12] na sua face inferior, estando a sua face superior sujeita à temperatura ambiente. Refira-se que estes autores não consideraram as trocas de calor por convecção e radiação, uma vez que impuseram como condição de fronteira a temperatura do incêndio padrão nos nós dos elementos da face inferior da viga. Com este procedimento foi possível determinar a evolução da temperatura em cada um dos nós da malha de elementos finitos. No segundo passo, para além da aplicação da carga regulamentar, foram introduzidas as temperaturas nodais obtidas em cada instante no passo anterior, permitindo calcular a deformação da viga ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Na figura 5.5 ilustra-se a comparação entre os valores de temperatura previstos pelo modelo e os valores medidos na campanha experimental de Williams *et al.* [5.2] nas interfaces CFRP-isolamento e CFRP-betão da viga 1. Apesar de a partir dos 50 minutos

de exposição os resultados do modelo na interface CFRP-isolamento serem ligeiramente inferiores aos valores experimentais, existe um bom ajuste entre os resultados. Na figura 5.6 estão presentes os valores previstos e medidos para a flecha a meio vão da viga. Observa-se que estes valores são praticamente coincidentes até ao instante em que na campanha experimental se verificou uma falha no sistema de carregamento, explicando a redução do deslocamento aos 33 minutos. Esta falha poderá, em parte, explicar o facto de nos ensaios não se ter atingido a rotura durante o tempo de exposição ao incêndio. No modelo elaborado pelos referidos autores não foi considerada essa diminuição momentânea no carregamento. Consequentemente, esse modelo previu que o colapso do sistema de reforço ocorreria aos 133 minutos (superior à exigência de duas horas da regulamentação norte-americana para edifícios), instante em que a sua temperatura seria 220°C.

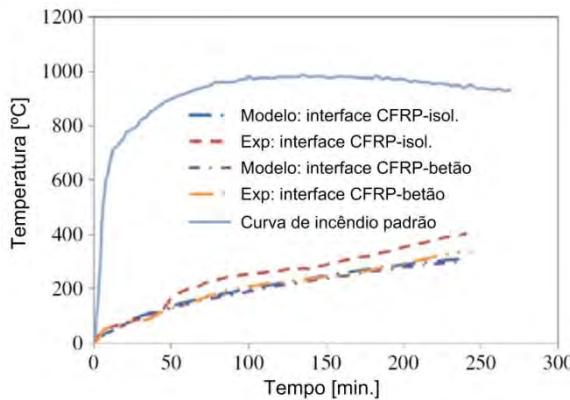


Figura 5.5. Comparação entre os valores de temperatura em função do tempo medidos no ensaios e obtidos no modelo [5.1].

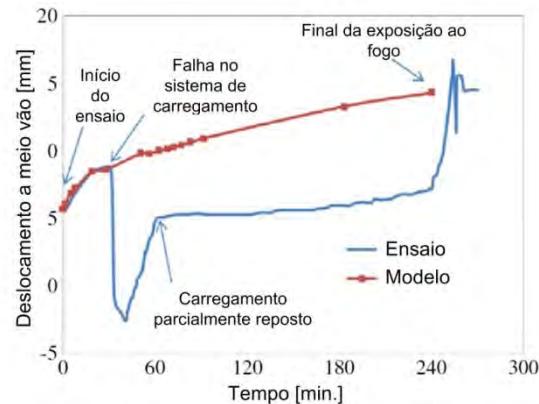


Figura 5.6. Comparação entre os valores do deslocamento a meio vão em função do tempo medidos no ensaios e obtidos no modelo [5.1].

5.2. Modelação das propriedades termofísicas dos materiais

A correcta modelação das propriedades termofísicas dos materiais que constituem as vigas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP é essencial na elaboração de um modelo numérico que pretenda simular a resposta térmica desses elementos estruturais quando sujeitos ao fogo. Nesse sentido, apresenta-se neste ponto a variação dos valores das seguintes propriedades com a temperatura: (i) massa volúmica; (ii) calor específico; (iii) condutibilidade térmica; e (iv) emissividade. Com excepção da massa volúmica do CFRP em função da temperatura, que foi determinada com base nos resultados de DSC/TGA apresentados no capítulo 4, não foram realizados ensaios específicos para determinar a evolução das propriedades termofísicas dos materiais, pelo que se recorreu aos valores indicados na bibliografia. Refira-se que dos materiais que constituem as vigas (betão, aço, adesivo de colagem, laminado de CFRP e materiais de protecção) optou-se por desprezar a presença das armaduras em aço, considerando que toda a área da secção de betão armado era constituída unicamente por betão. Tal como referido nos capítulos anteriores, os materiais mais susceptíveis ao aumento de temperatura são os que constituem o sistema de reforço. Por esta razão, o principal objectivo do modelo elaborado é simular correctamente a evolução das temperaturas ao nível do reforço, pelo que a presença das armaduras, que representam menos de 1% da área total da secção, não teria uma influência significativa nessas temperaturas. Além desta simplificação, considerou-se que as propriedades termofísicas do adesivo de colagem são iguais às dos laminados de CFRP. De facto, este adesivo é elaborado à base de resina epóxida, que é o mesmo material que constitui a matriz dos laminados. No entanto, a presença de materiais de enchimento no adesivo (nomeadamente de silicato de cálcio carbonatado) e das fibras de carbono nos laminados podem fazer com que as propriedades termofísicas destes dois materiais sejam ligeiramente diferentes. Contudo, devido à reduzida espessura da camada de adesivo, a evolução

das temperaturas neste material não deveria ser muito diferente caso as suas propriedades fossem modeladas com maior rigor. Refira-se que nas vigas protegidas com placas de silicato de cálcio, a existência do sistema de reforço impediu que essas placas ficassem em contacto com a totalidade da face inferior das vigas. Assim, de cada uma dos lados do reforço, existia um espaço sem qualquer preenchimento. Por esta razão, optou-se por atribuir a este volume as propriedades do ar atmosférico. Este aspecto voltará a ser referido no ponto 5.3.

No programa de cálculo automático utilizado para simular o comportamento ao fogo das vigas de betão armado reforçadas com CFRP, as propriedades dos vários materiais são definidas através de um conjunto de valores associados a determinadas temperaturas, entre as quais é considerada uma variação linear. Nas secções seguintes são apresentadas as variações contínuas dessas propriedades com a temperatura, bem como os respectivos valores considerados no modelo numérico elaborado.

5.2.1. Betão

Tal como referido no capítulo 3, o aumento da temperatura causado por um incêndio origina a ocorrência de diversas reacções no betão que lhe alteram as propriedades térmicas e físicas. Na modelação das propriedades termofísicas do betão com a temperatura recorreu-se às relações preconizadas na parte 1-2 do Eurocódigo 2 [5.13], as quais se apresentam nos pontos seguintes.

5.2.1.1. Massa volúmica

A parte 1-2 do Eurocódigo 2 [5.13] refere que a variação da massa volúmica do betão com a temperatura é influenciada pela perda de água, sendo definida através das seguintes expressões,

$$\rho(T) = \rho(20^\circ\text{C}) \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 115^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ\text{C})[1 - 0.02(T - 115)/85] \quad \text{para } 115^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ\text{C})[0.98 - 0.03(T - 200)/200] \quad \text{para } 200^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ\text{C})[0.95 - 0.07(T - 400)/800] \quad \text{para } 400^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

em que,

- T – temperatura do betão ($^\circ\text{C}$);
- $\rho(T)$ – massa volúmica em função da temperatura do betão (kg/m^3).

No modelo elaborado considerou-se o valor usual na massa volúmica do betão simples a 20°C [$\rho(20^\circ\text{C})$] igual a $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$. Assim, as expressões anteriores podem representar-se na forma gráfica ilustrada na figura 5.7.

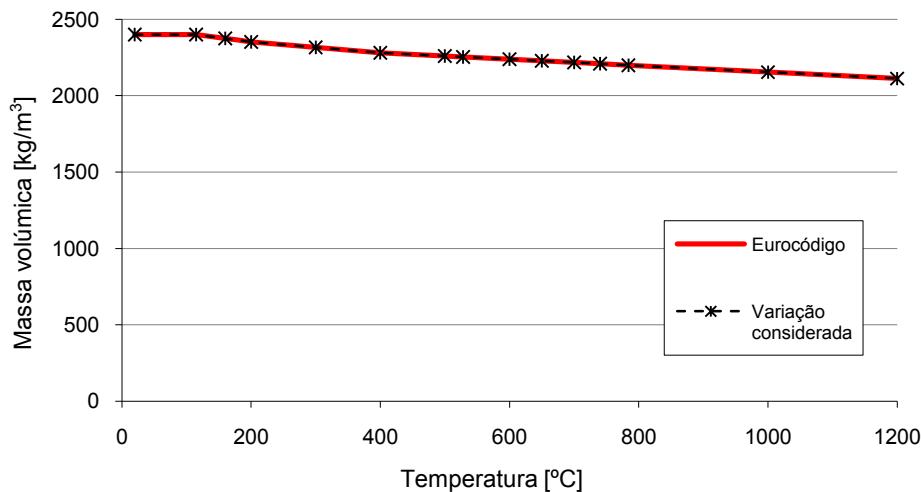


Figura 5.7. Variação da massa volúmica do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2 [5.13].

5.2.1.2. Calor específico

O valor do calor específico indica a quantidade de energia (em Joules) que é necessário fornecer, por cada quilograma de material, para que a sua temperatura aumente 1°C. Naturalmente, este parâmetro depende da composição do betão, da sua porosidade e da humidade. Contudo, o Eurocódigo preconiza que quando se utilizam agregados de natureza calcária ou siliciosa, o valor do calor específico do betão seco (teor em água de 0%) em função da temperatura [$c_p(T)$] pode ser determinado a partir das seguintes expressões simplificadas,

$$c_p(T) = 900 \text{ (J/kg°C)} \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

$$c_p(T) = 900 + (T - 100) \text{ (J/kg°C)} \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

$$c_p(T) = 1000 + (T - 200)/2 \text{ (J/kg°C)} \quad \text{para } 200^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \quad (5.7)$$

$$c_p(T) = 1100 \text{ (J/kg°C)} \quad \text{para } 400^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

No entanto, quando o teor em água é superior a 0%, o que se verifica na maioria dos casos, a função descrita pelas expressões 5.5 a 5.8 pode ser modelada por um valor constante, $c_{p,peak}$, situado entre 100°C e 115°C e decrescente linearmente entre 115°C e 200°C, que toma os seguintes valores:

- $c_{p,peak} = 1470 \text{ J/kg°C}$ para um teor em água de 1.5% do peso de betão;
- $c_{p,peak} = 2020 \text{ J/kg°C}$ para um teor em água de 3.0% do peso de betão.

Na modelação efectuada foi admitido o valor intermédio do teor em água de 1.5%, pelo que a evolução do valor do calor específico do betão com a temperatura é descrita pelo gráfico presente na figura 5.8. No entanto, na proposta do Eurocódigo o valor desta grandeza aos 100°C passa instantaneamente de 900 J/kg°C para 1400 J/kg°C. Para evitar problemas numéricos associados a esta “descontinuidade”, considerou-se um aumento linear entre 900 J/kg°C a 100°C e 1400 J/kg°C a 115°C, tal como se observa na figura 5.8. Este aumento no valor do calor específico deve-se ao facto da evaporação da água livre do betão ocorrer através de reacções endotérmicas, que absorvem parte da energia transmitida pelo incêndio, fazendo com que a energia total que é necessário fornecer para que a temperatura do material aumente 1°C seja mais elevada.

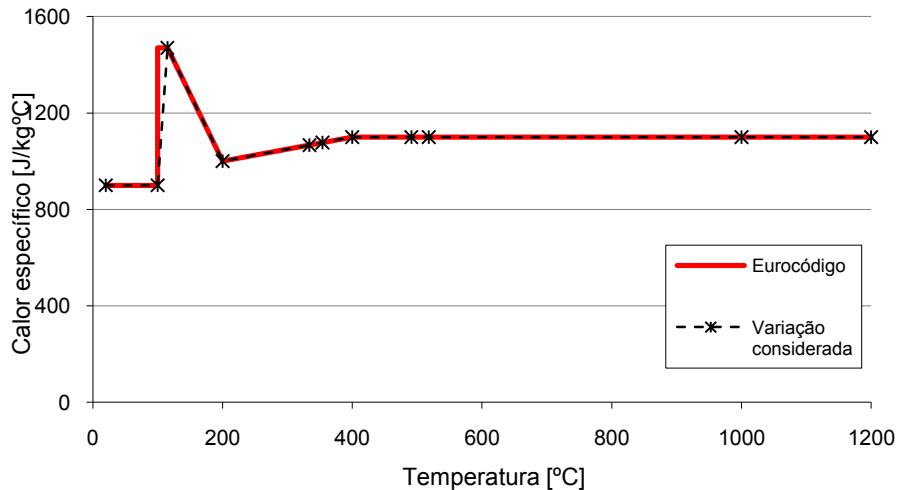


Figura 5.8. Variação do calor específico do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2 [5.13].

5.2.1.3. Condutibilidade térmica

À semelhança do valor do calor específico, a condutibilidade térmica é uma propriedade que depende das características do betão. No entanto, a proposta do Eurocódigo para a evolução desta grandeza com a temperatura é ligeiramente diferente da apresentada no ponto anterior. Assim, o documento normativo europeu indica que o valor da condutibilidade térmica do betão de massa volúmica normal para uma dada temperatura [$\lambda_c(T)$] está compreendido entre os valores fornecidos pelas expressões 5.9 e 5.10, que constituem, respectivamente, um limite superior e inferior.

$$\lambda_c^{\text{sup.}}(T) = 2 - 0.2451(T/100) + 0.0107(T/100)^2 \quad (\text{W/m}^\circ\text{C}) \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.9)$$

$$\lambda_c^{\text{inf.}}(T) = 1.36 - 0.136(T/100) + 0.0057(T/100)^2 \quad (\text{W/m}^\circ\text{C}) \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

No modelo numérico elaborado considerou-se a média dos valores fornecidos pelas expressões anteriores, cuja evolução com a temperatura se apresenta na figura 5.9. Nessa figura observa-se que o valor desta grandeza diminui com o aumento da temperatura, o que está relacionado com a evaporação da água livre e da água de hidratação do cimento, que quando presentes aumentam a condutibilidade térmica do betão.

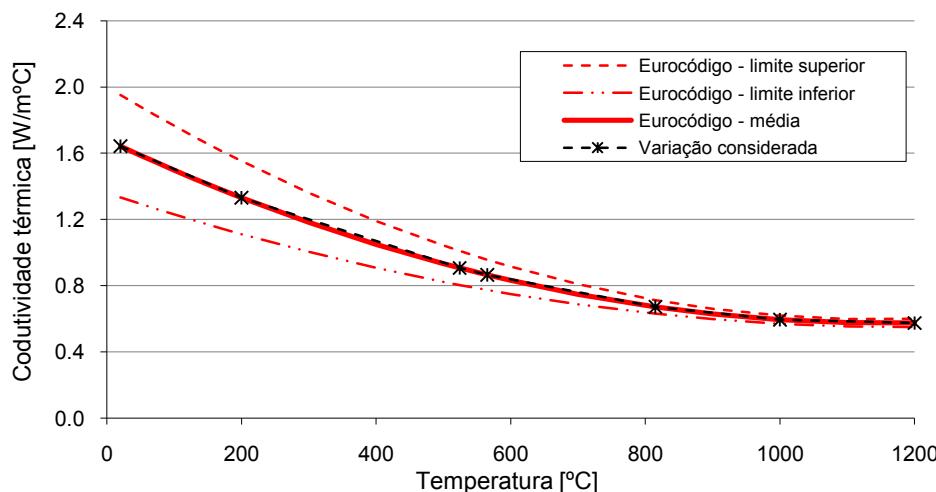


Figura 5.9. Variação da condutibilidade térmica do betão em função da temperatura de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 2 [5.13].

5.2.1.4. Emissividade

A emissividade é uma propriedade que está relacionada com a transmissão de calor por radiação, tal como referido no capítulo 3. De acordo com a sugestão presente no Eurocódigo, foi adoptado o valor de 0.7 constante com a temperatura.

5.2.2. CFRP/adesivo de colagem

Na modelação das principais propriedades termofísicas do CFRP recorreu-se às propostas de diversos investigadores. Apenas na evolução do valor da massa volúmica com a temperatura se utilizou os resultados dos ensaios de DSC/TGA, descritos no capítulo 4. Nos pontos seguintes, além das propriedades consideradas no modelo numérico, apresentam-se as propostas sugeridas na bibliografia, ambas sob a forma gráfica. Tal como referido anteriormente, considerou-se que as propriedades do adesivo de colagem coincidem com as do CFRP.

5.2.2.1. Massa volúmica

A variação da massa volúmica do CFRP com a temperatura foi determinada com base na curva da massa remanescente obtida nos ensaios de DSC/TGA (ver ponto 4.3.2.3), considerando que a diminuição da massa é igual à diminuição do volume. Na figura 5.10 apresenta-se a variação da referida grandeza com a temperatura, bem como a curva considerada no modelo numérico. Refira-se que para evitar eventuais problemas numéricos, em vez do valor nulo da massa volúmica para temperaturas superiores a 780°C, considerou-se um valor unitário, o que, comparativamente à ordem de grandeza da massa volúmica à temperatura ambiente, não deverá ter uma influência significativa na qualidade dos resultados. Na mesma figura está representada a proposta de Griffis *et. al* [5.11] que, comparativamente à variação obtida no ensaio de DSC/TGA, é bastante simplificada, pois despreza a decomposição das fibras de carbono e concentra o fenómeno da decomposição da matriz polimérica entre 500°C e 530°C. O valor da massa volúmica do CFRP à temperatura ambiente (1550 kg/m^3) foi determinado por Fonseca [5.14] em provetes de laminado semelhante ao utilizado no reforço das vigas ensaiadas (mas de um lote diferente).

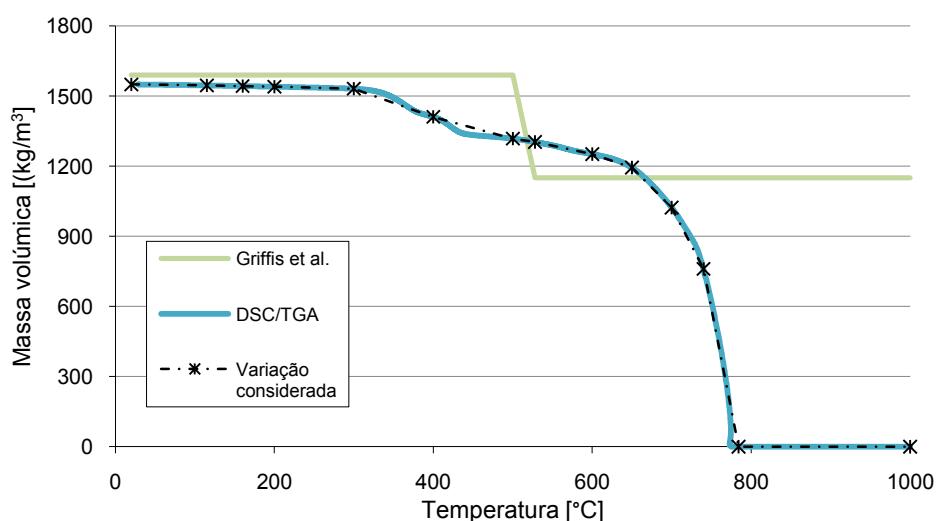


Figura 5.10. Variação da massa volúmica do CFRP em função da temperatura.

5.2.2.2. Calor específico

Na figura 5.11 ilustra-se a variação do valor do calor específico do CFRP em função da temperatura de acordo com as propostas de Griffis et al. [5.11] e Hawileh et al. [5.1]. Nessa figura observa-se que ambas as propostas apresentam um andamento semelhante, destacando-se um aumento considerável no valor do calor específico aos 350°C, após o qual permanece praticamente constante até cerca de 500°C, temperatura em que se regista uma diminuição significativa no valor da referida grandeza. O valor elevado do calor específico no intervalo de temperaturas indicado deve-se à ocorrência de reacções endotérmicas de decomposição da resina que constitui a matriz do CFRP. Tal como se observa na figura 5.11, no modelo numérico adoptou-se a curva proposta por Griffis et al [5.11], pois esta está definida para um intervalo de temperaturas maior do que a proposta de Hawileh et al. [5.1].

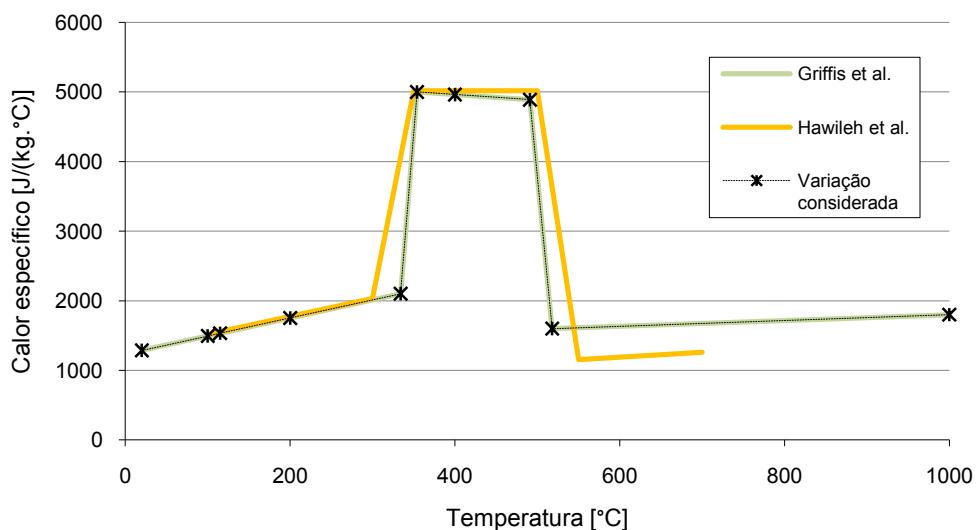


Figura 5.11. Variação do calor específico do CFRP em função da temperatura.

5.2.2.3. Condutibilidade térmica

À semelhança da variação do calor específico, foram analisadas as propostas de Griffis et al [5.11] e Hawileh et al. [5.1] para a evolução da condutibilidade térmica do CFRP em função da temperatura. A figura 5.12 ilustra os valores das propostas destes investigadores, bem como a variação considerada no modelo numérico. Tal como no caso do calor específico, optou-se pela curva de Griffis et al. [5.11] pois esta está definida num intervalo de temperaturas maior do que a curva de Hawileh et al. [5.1]. Na figura 5.12 observa-se que a condutibilidade térmica diminui consideravelmente até cerca de 600°C, temperatura a partir da qual o valor da referida grandeza permanece praticamente constante. O facto de essa diminuição ocorrer até 600°C poderá estar relacionado com a decomposição da resina, que ocorre até temperaturas próximas daquele valor. Para valores superiores de temperatura, a transmissão de calor por condução dá-se através das fibras de carbono, pois a matriz do CFRP já se decompôs totalmente.

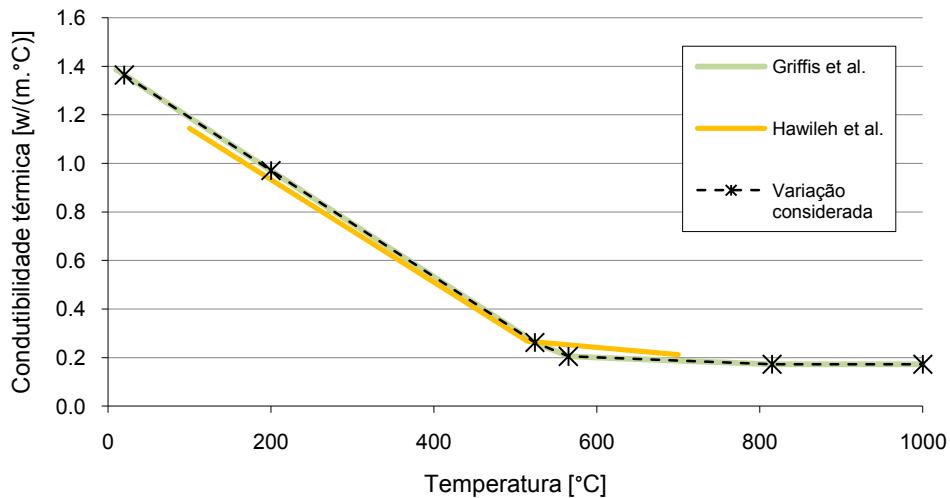


Figura 5.12. Variação da condutibilidade térmica do CFRP em função da temperatura.

5.2.2.4. Emissividade

Relativamente à emissividade, Miller e Weaver [5.15] indicam que esta grandeza apresenta o valor de 0.8 e que é constante com a temperatura. Milke e Vizzini [5.16], apesar de também referirem que a emissividade se mantém constante com a temperatura, sugerem o valor de 0.95. Nos documentos publicados pelo referidos autores, não é possível concluir qual dos CFRP's analisados se assemelha mais aos laminados utilizados no reforço das vigas ensaiadas. Por esta razão, no modelo numérico considerou-se que a emissividade é constante com a temperatura e vale 0.875, tendo sido obtida pela média dos valores indicados pelos autores referidos.

5.2.3. Argamassa de vermiculite e perlite

Bai *et al.* [5.17] modelaram a variação do calor específico e da condutibilidade térmica de uma argamassa de vermiculite e perlite semelhante à aplicada em duas das vigas ensaiadas (vistas VP25 e VP40), pelo que foram adoptadas as propostas destes autores. Relativamente à variação da massa volúmica com a temperatura, consideraram-se os resultados do ensaio de DSC/TGA realizado por Correia [5.18] a uma argamassa idêntica à utilizada para proteger as referidas vigas.

5.2.3.1. Massa volúmica

A variação da massa volúmica da argamassa à base de vermiculite e perlite com a temperatura foi determinada com base na curva da massa remanescente obtida nos ensaios de DSC/TGA realizados por Correia [5.18]. Na figura 5.13 apresenta-se a variação da referida grandeza com a temperatura, bem como a curva considerada no modelo numérico. Nessa figura observa-se que o valor da massa volúmica regista duas diminuições: a primeira, entre 110°C e 160°C, relaciona-se com a evaporação da água livre; e a segunda, entre 700°C e 800°C, corresponde à libertação da água de constituição dos agregados de vermiculite e perlite. Aos 1000°C o valor da massa volúmica representa cerca de 75% do valor registado à temperatura ambiente (500 kg/m^3) [5.18].

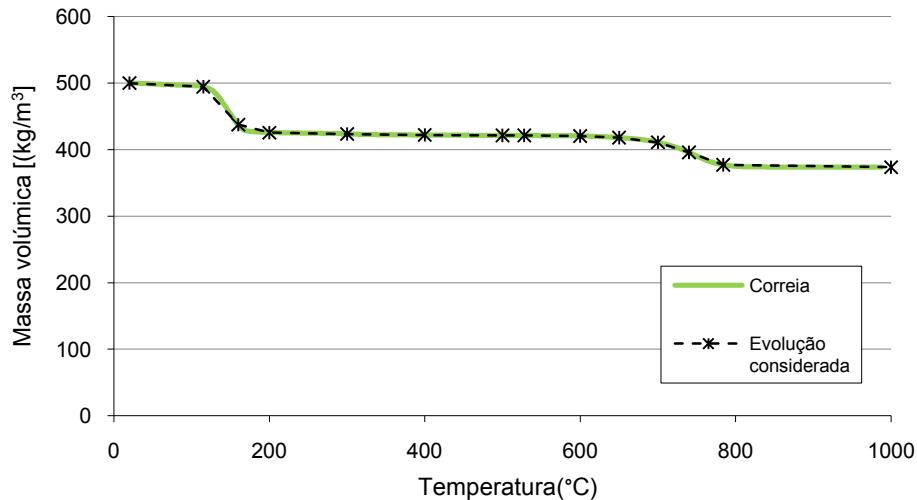


Figura 5.13. Variação da massa volúmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura.

5.2.3.2. Calor específico

Relativamente ao calor específico da argamassa de vermiculite e perlite, Bai *et al.* [5.17] propõem que o seu valor em função da temperatura (até 800°C) seja calculado através da expressão 5.11,

$$C_{p,vp}(T) = -1.38 \times 10^{-9} \cdot T^4 - 1.76 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 2.16 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 0.37 \cdot T + 703.89 \quad (5.11)$$

em que,

- $C_{p,vp}(T)$ – calor específico da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura ($J/kg \cdot ^\circ C$).

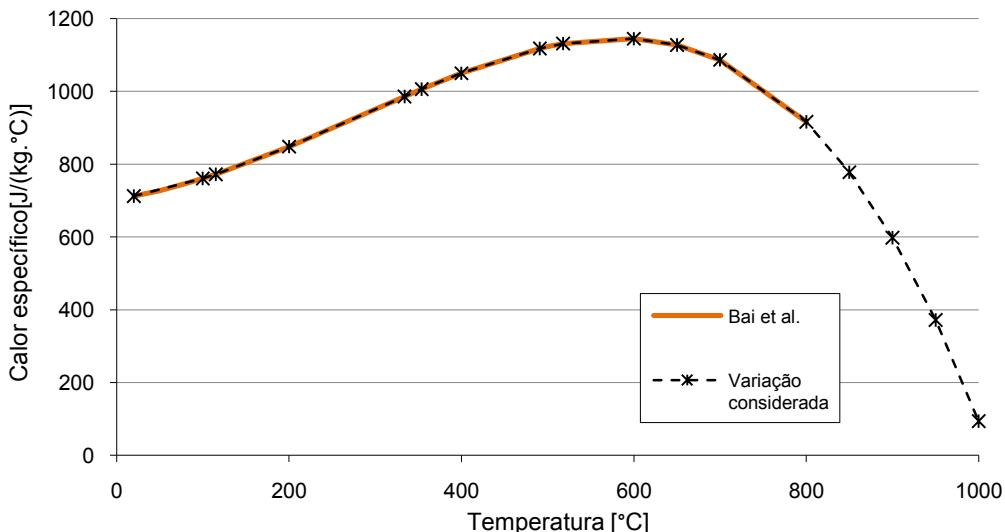


Figura 5.14. Variação do calor específico da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura.

Na figura 5.14 apresenta-se a curva que descreve o valor da referida grandeza em função da temperatura (através da expressão 5.11), bem como a variação considerada no modelo numérico. Note-se que Bai *et al.* referem que a expressão 5.11 apenas é válida até 800°C. No entanto, tal como descrito no capítulo 4, o forno atingiu temperaturas superiores a este valor durante os ensaios de

resistência ao fogo. Por esta razão, decidiu-se aplicar a expressão anterior para calcular o valor do calor específico da argamassa de vermiculite e perlite até 1000°C. Foi igualmente testada a influência na distribuição de temperaturas na secção das vigas de se considerar o calor específico constante a partir de 800°C, tendo-se concluído que as diferenças face à modelação em que se recorreu aos valores da expressão 5.11 são residuais.

Na figura 5.14 observa-se que o calor específico regista o valor máximo aproximadamente a 600°C, o que poderá estar relacionado com o facto de ser a partir daquela temperatura que ocorrem as reacções endotérmicas que conduzem à evaporação da água de constituição da vermiculite e da perlite.

5.2.3.3. Condutibilidade térmica

Bai *et al.* [5.17] propõem que o valor da condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura seja representado através da expressão 5.12,

$$k_{vp}(T) = [1 + 1.585 \times 10^{-3} \times (T - 20)] \times k_{vpi} \quad (5.12)$$

em que,

- $k_{vp}(T)$ – condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura (W/m°C);
- k_{vpi} – condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite a 20°C (W/m°C).

A condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite a 20°C é 0.0581 W/m°C [5.18]. Assim, a variação da referida grandeza com a temperatura, descrita pela expressão 5.12, e a variação considerada no modelo numérico estão ilustradas na figura 5.15.

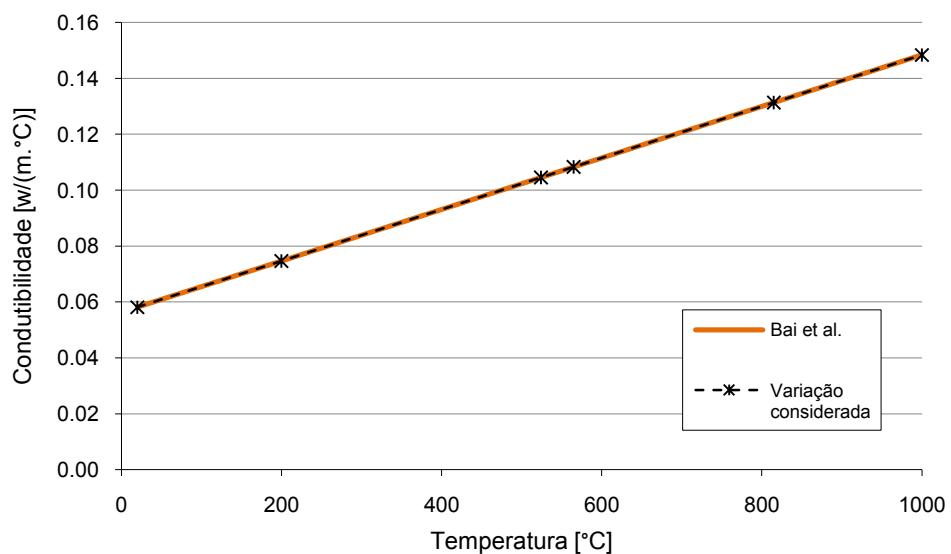


Figura 5.15. Variação da condutibilidade térmica da argamassa de vermiculite e perlite em função da temperatura.

5.2.3.4. Emissividade

No que à emissividade diz respeito, não existem estudos conclusivos sobre qual o valor adequado a considerar para esta propriedade. Por esta razão, considerou-se que este vale 0.7 e é constante com a temperatura, sendo, por isso, igual ao valor admitido para o betão.

5.2.4. Placas de Silicato de cálcio

Bai *et al.* [5.17] modelaram a variação do calor específico de painéis de silicato de cálcio semelhantes aos utilizados como material de protecção ao fogo nas vigas SC25 e SC40, cujos ensaios foram descritos no capítulo 4. Relativamente à variação da massa volúmica com a temperatura, consideraram-se os resultados do ensaio de DSC/TGA realizado por Correia [5.18]. Para a condutibilidade térmica foram adoptados os valores indicados nas especificações do respectivo fabricante [5.19] e, para a emissividade, seguiu-se a proposta de Mimoso [5.20].

5.2.4.1. Massa volúmica

A variação da massa volúmica dos painéis de silicato de cálcio com a temperatura foi determinada com base na curva da massa remanescente obtida nos ensaios de TGA realizado por Correia [5.18]. Na figura 5.16 apresenta-se a variação da referida grandeza com a temperatura, bem como a curva considerada no modelo numérico. Nessa figura observa-se que o valor da massa volúmica diminui quase linearmente com a temperatura até cerca de 700°C, temperatura a partir da qual permanece constante, apresentando um valor que representa 81% do registado à temperatura ambiente (870 kg/m^3). A diminuição contínua da massa volúmica até 700°C relaciona-se com a seguinte sequência de reacções que ocorrem no material: evaporação da água livre; desidratação do “gel de silicato de cálcio”; desidratação do hidróxido de cálcio; e descarbonização do carbonato de cálcio [5.18].

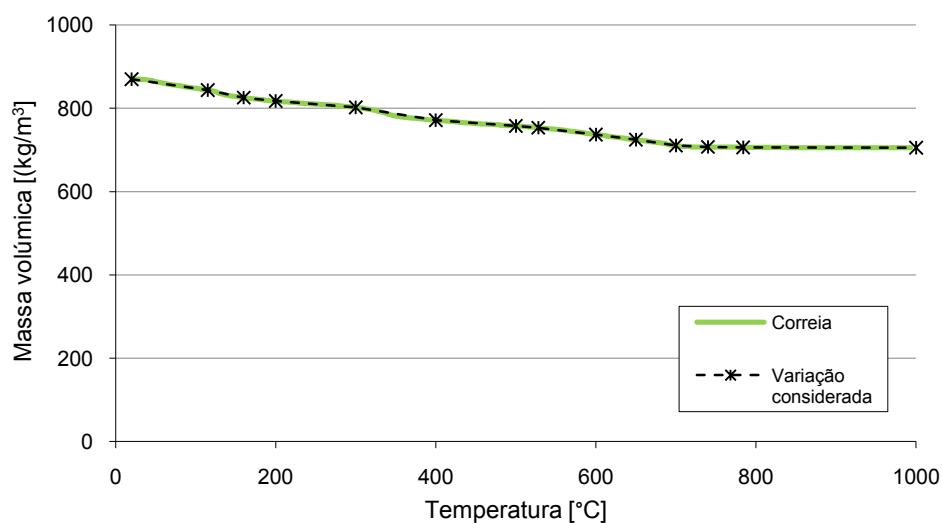


Figura 5.16. Variação da massa volúmica dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.

5.2.4.2. Calor específico

Bai *et al.* [5.17] propõem que a variação do calor específico dos painéis de silicato de cálcio com a temperatura seja representada através da expressão 5.13,

$$C_{p,SC}(T) = 439 + 82.9 \times \ln(T) \quad (5.13)$$

em que,

- $C_{p,SC}(T)$ – calor específico dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura ($J/kg^{\circ}C$).

Na figura 5.17 apresenta-se a curva que descreve o valor da referida grandeza em função da temperatura de acordo com a proposta de Bai *et al.* [5.17], bem como a variação considerada no modelo numérico. Nessa figura representa-se ainda a curva sugerida por Looyeh *et al.* [5.21]. Observa-se que em ambas as propostas o valor do calor específico aumenta com a temperatura, o que se deve ao carácter endotérmico da sequência de reacções referida no ponto anterior. Contudo, optou-se pela proposta de Bai *et al.* pois no trabalho destes autores foi modelada a resposta térmica de perfis pultrudidos de GFRP protegidos com placas de silicato de cálcio ensaiados por Correia [5.18], tendo-se obtido uma boa aproximação aos resultados experimentais.

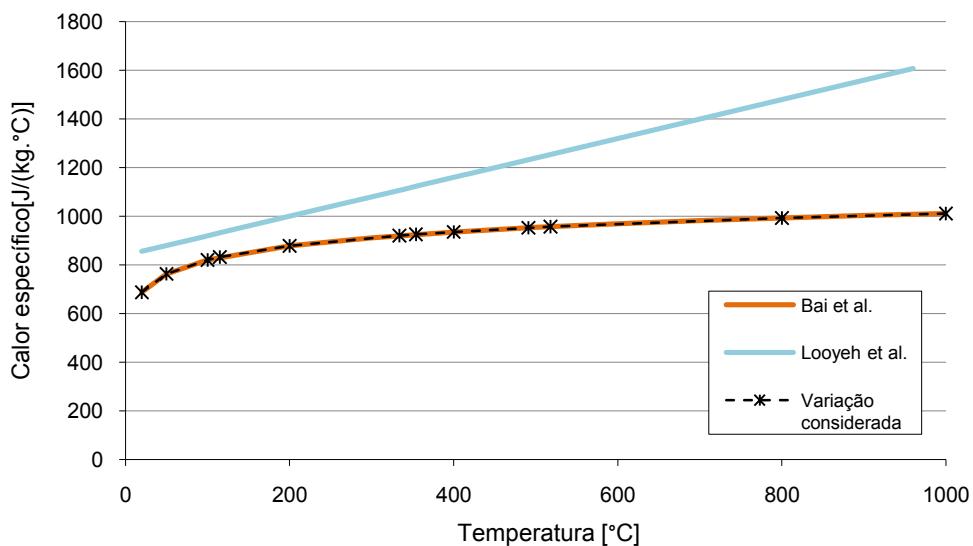


Figura 5.17. Variação do calor específico dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.

5.2.4.3. Condutibilidade térmica

A variação do valor da condutibilidade térmica dos painéis de silicato de cálcio com a temperatura utilizada na modelação efectuada por Bai *et al.* [5.17] apresenta-se na figura 5.18, bem como a proposta de Looyeh *et al.* [5.21] para a variação dessa grandeza. Bai *et al.* consideraram que a condutibilidade térmica deste material ($0.164 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ de acordo com o fabricante [5.19]) é independente do valor da temperatura a que este se encontra, enquanto que Looyeh *et al.* sugerem um aumento linear com a temperatura. Tal como no caso da variação do calor específico, seguiu-se a proposta de Bai *et al.*, devido à elevada correlação entre os resultados dos modelos elaborados por estes autores e os resultados experimentais obtidos por Correia [5.18], que utilizou painéis de silicato de cálcio fornecidos pelo mesmo fabricante como material de protecção ao fogo de perfil pultrudidos de GFRP.

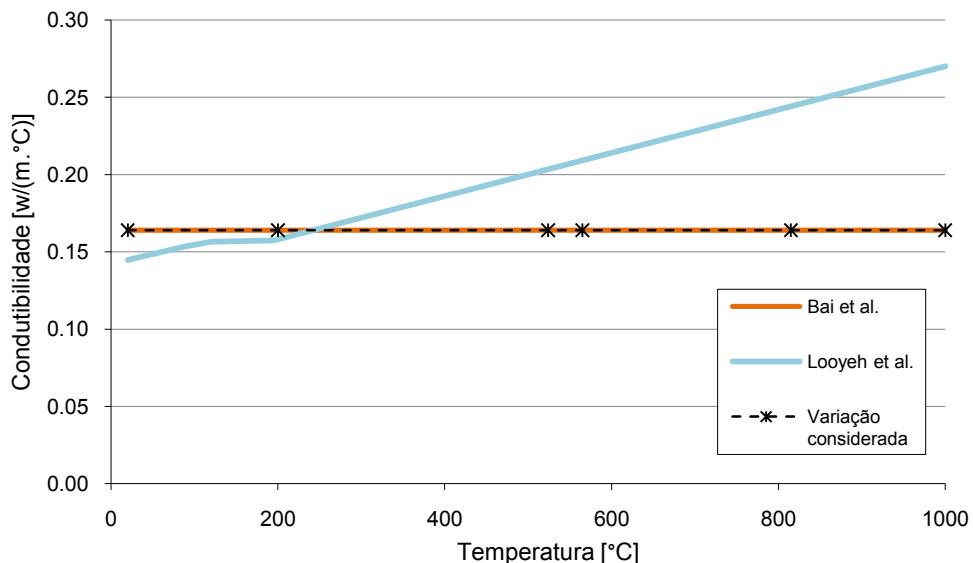


Figura 5.18. Variação da condutibilidade térmica dos painéis de silicato de cálcio em função da temperatura.

5.2.4.4. Emissividade

No que diz respeito à emissividade, adoptaram-se os valores propostos por Mimoso [5.20], segundo o qual aquele parâmetro vale 0.75 a 20°C e 0.95 a 1000°C.

5.2.5. Ar atmosférico

Como referido anteriormente, nas vigas protegidas com placas de silicato de cálcio existe um pequeno espaço sem qualquer preenchimento de material de cada um dos lados do sistema de reforço. Nesta zona as trocas de calor ocorrem, sobretudo, por convecção e radiação entre a face superior das placas de silicato de cálcio e a face inferior da viga. No entanto, com o objectivo de simplificar o modelo numérico, considerou-se que as trocas de calor nesta zona ocorrem apenas por condução. Devido à reduzida espessura daquele espaço (3.2 mm) esta opção de modelação simplificada não deverá ter uma influência significativa na distribuição de temperaturas ao longo da secção. Desta forma, foi necessário modelar a variação da massa volúmica, do calor específico e da condutibilidade térmica com a temperatura do ar atmosférico. Os valores dessas propriedades, apresentados nos pontos seguintes, foram retirados no manual produzido por Mills [5.22].

5.2.5.1. Massa volúmica

A variação da massa volúmica do ar atmosférico com a temperatura sugerida na bibliografia e a variação considerada no modelo numérico são representados na figura 5.19.

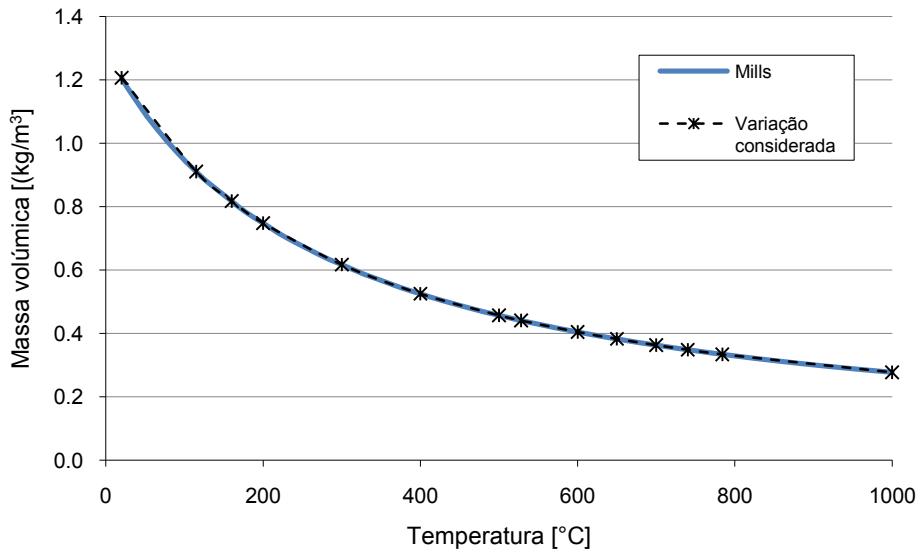


Figura 5.19. Variação da massa volúmica do ar atmosférico em função da temperatura.

5.2.5.2. Calor específico

A variação do calor específico com a temperatura sugerida na bibliografia e a variação considerada no modelo numérico são ilustradas na figura 5.20.

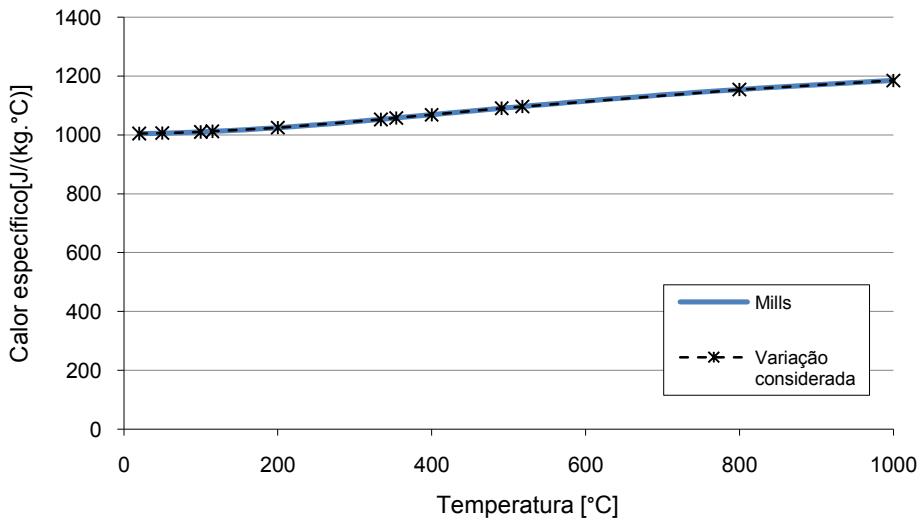


Figura 5.20. Variação do calor específico do ar atmosférico em função da temperatura.

5.2.5.3. Condutibilidade térmica

A variação da condutibilidade térmica do ar atmosférico com a temperatura sugerida na bibliografia e a variação considerada no modelo numérico são apresentadas na figura 5.21.

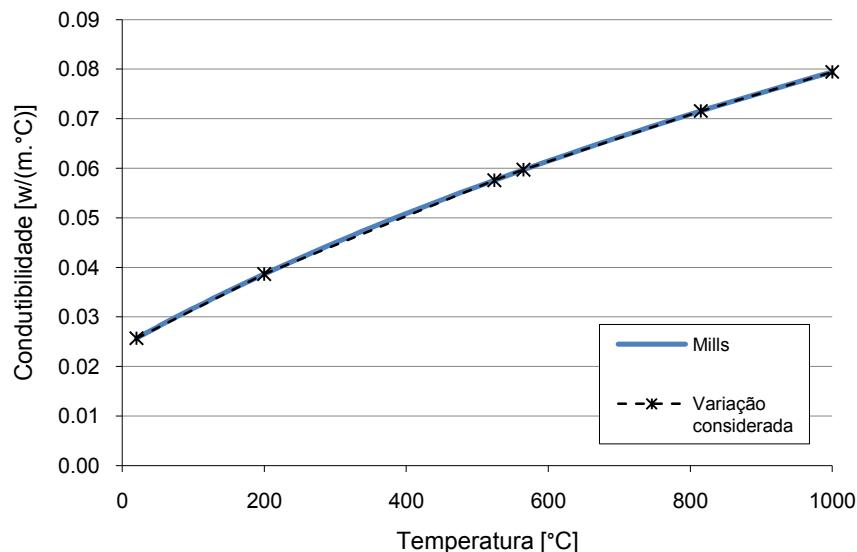


Figura 5.21. Variação da condutibilidade térmica do ar atmosférico em função da temperatura.

5.3. Descrição do modelo base

De forma a simular a variação das temperaturas em secções de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (com ou sem sistemas de protecção ao fogo) sujeitas à acção do fogo, foi elaborado um modelo bidimensional de elementos finitos no software comercial ANSYS. Assim, foram modeladas todas as secções das 6 vigas ensaiadas ao fogo, cujas características se encontram na tabela 4.17 (página 105). Os resultados deste modelo serão posteriormente comparados com os registados durante a campanha experimental, apresentados no ponto 4.5.3. Optou-se por um modelo bidimensional pois nos ensaios experimentais apenas foram instalados termopares na secção de meio vão das vigas (com excepção da viga SC40, em que se adicionaram dois termopares na zona de extremidade do laminado) sendo, por isso, suficiente a elaboração de um modelo deste tipo para comparação com os resultados experimentais. Além disso, face a uma alternativa em 3 dimensões, foi possível diminuir drasticamente o número de elementos finitos do modelo, tornando o processo de cálculo menos moroso. Relativamente às propriedades dos materiais constituintes com a temperatura, foram utilizados os valores apresentados nos pontos anteriores.

Nos pontos seguintes procede-se à descrição do modelo base elaborado. Os ficheiros de dados deste modelo referentes a cada viga estão presentes no Anexo V. Refira-se que após um breve estudo paramétrico optou-se por estudar duas variantes deste modelo base, pois cada uma delas apresentou um melhor ajuste a parte dos resultados experimentais.

5.3.1. Tipo de elementos e geometria do modelo

Na modelação dos materiais constituintes das secções das vigas, utilizaram-se elementos finitos bidimensionais denominados *PLANE55* (2-D Thermal Solid), com capacidade de condução térmica. Este tipo de elementos pode ser constituído por três ou quatro nós, com um grau de liberdade (temperatura) associado a cada nó (figura 5.22) [5.23].

Foi ainda utilizado um elemento superficial, com a denominação *SURF151* (2-D Thermal Surface Effect), nas faces superior e inferior da secção. A este tipo de elementos podem ser aplicados “carregamentos” ou acções de efeito superficial, sendo possível a sua sobreposição a um elemento

bidimensional. O elemento utilizado é constituído por 2 nós, ao qual está associado um nó extra (ver figura 5.23) localizado na proximidade de cada uma das faces superior e inferior das secções das vigas. Estes nós permitem a realização de trocas de calor por convecção e radiação com o elemento *SURF151* ao qual estão associados, e que, por sua vez, transmite essa energia por condução aos restantes elementos do modelo (neste caso elementos do tipo *PLANE55*).

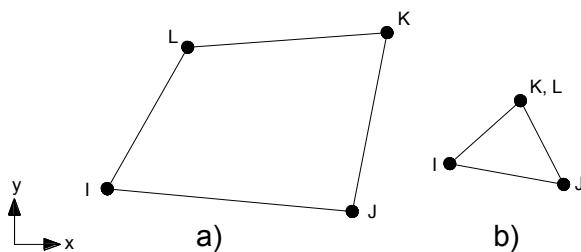


Figura 5.22. Representação esquemática do elemento *PLANE55* de a) quatro nós e b) três nós.

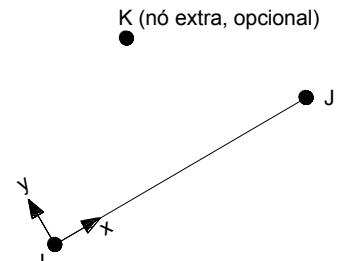


Figura 5.23. Representação esquemática do elemento *SURF151* de três nós.

Relativamente à geometria do modelo, adoptaram-se as dimensões reais da secção de meio vão das vigas de betão armado, ou seja, 100 mm x 120 mm. Para a espessura do adesivo de colagem do laminado foi admitida a espessura recomendada pelo fabricante (2 mm), enquanto que para o próprio laminado foram consideradas as suas dimensões reais (secção de 1.2 mm x 50 mm). Os sistemas de protecção ao fogo foram modelados de acordo com as dimensões indicadas no capítulo 4, isto é, espessuras de 25 mm ou 40 mm, e largura idêntica à da secção da viga de betão (100 mm).

A malha de elementos finitos foi elaborada de forma a que existissem nós dos elementos coincidentes com a posição dos termopares colocados na secção de meio vão das vigas ensaiadas ao fogo (ver figura 4.33 a da página 107). Foi utilizada uma funcionalidade do programa de cálculo que permite a geração automática de malhas, sendo apenas necessário definir a área em que é gerada essa malha e a máxima dimensão dos elementos. Esta funcionalidade do programa permite igualmente que se definam alguns nós específicos, os quais vão ser incluídos na malha gerada. Assim, para os vários materiais, foram adoptadas as seguintes dimensões máximas dos elementos finitos:

- betão (todas as vigas) – 4 mm entre a face inferior da secção e 1/3 da altura da secção de betão; 10 mm no terço central da altura da secção; e 15 mm no terço superior da altura da secção;
- sistema de reforço (vistas CFRP, VP25, VP40, SC25 e SC40) – 2.5 mm;
- camada de ar atmosférico adjacente ao reforço (vistas SC25 e SC40) – 2.5 mm;
- sistemas de protecção ao fogo (vistas VP25, VP40, SC25 e SC40) – 2.5 mm.

Na figura 5.24 é apresentada a discretização da secção da viga SC25 após a geração automática da malha de elementos finitos. Nessa figura, observa-se que no betão a malha é mais grosseira na zona próxima da face superior da secção. Esta opção, permitiu diminuir o número total de elementos e, consequentemente, o tempo de cálculo. Apesar de terem sido utilizados alguns elementos de transição triangulares, a qualidade dos resultados não foi consideravelmente afectada. Além disso, esta opção afectou residualmente os resultados apenas na zona superior da secção, onde a exactidão dos resultados não tem tanta importância como na zona do reforço. Com o objectivo de compatibilizar as malhas e evitar o recurso a elementos de transição triangulares, admitiu-se que a máxima dimensão dos elementos na zona do reforço e na camada de ar adjacente a este era igual à dos sistemas de protecção ao fogo (2.5 mm).

As discretizações das restantes vigas com sistemas de protecção ao fogo são semelhantes à apresentada na figura 5.24, diferindo apenas na espessura e/ou no tipo de protecção. Refira-se que nas vigas protegidas com argamassa à base de vermiculite e perlite não existe qualquer camada de ar adjacente ao reforço, sendo esse espaço preenchido na totalidade com argamassa. Nas vigas *RC* e *CFRP* não existe qualquer material de protecção susceptível de ser modelado, sendo que na primeira também não existe sistema de reforço.

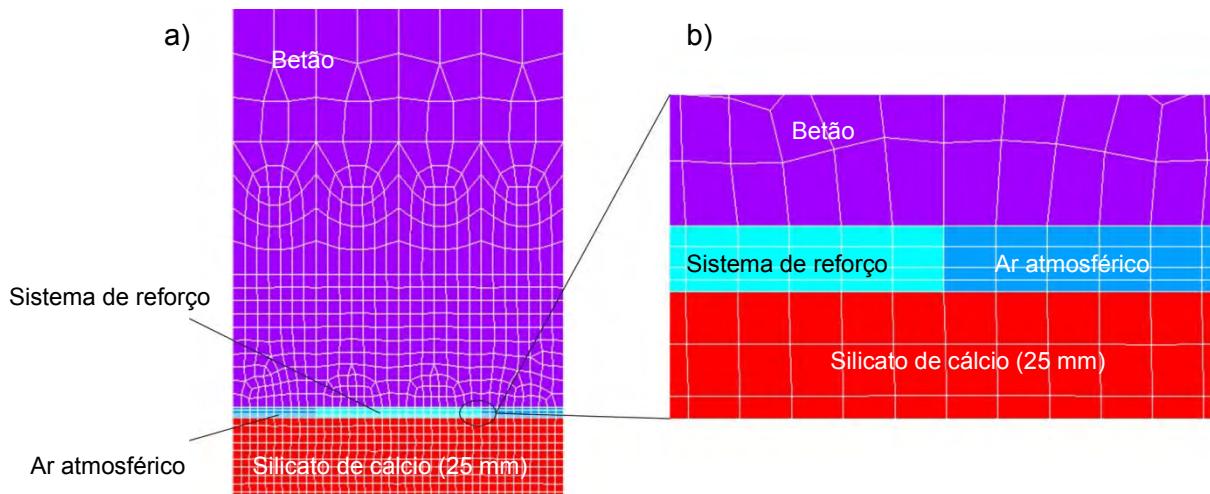


Figura 5.24. a) discretização do modelo da viga SC25 e b) respectivo pormenor na zona do reforço e camada de ar atmosférico.

5.3.2. Condições de fronteira

Como referido no capítulo 4, nos ensaios experimentais as aberturas adjacentes às faces laterais das vigas foram isoladas através da sobreposição de duas placas de lã mineral. A presença destas placas reduz consideravelmente as trocas de calor na direcção horizontal, pelo que as faces laterais das vigas (incluindo as faces laterais do sistema de protecção ao fogo) foram aproximadas como fronteiras adiabáticas. Desta forma, as trocas de calor ocorrem apenas nas faces inferior e superior das vigas. Para tal, recorreu-se ao elemento *SURF151* com a finalidade de simular as trocas de calor com o forno e com o ar ambiente. Na face inferior a superfície *SURF151* foi associada a um nó extra, colocado próximo desta (a distância à superfície não influencia os resultados), e onde se impõe a temperatura do incêndio padrão definido na norma ISO 834, com o qual ocorrem as trocas de calor por convecção e radiação. Foi ainda criado outro “par” *SURF151*-nó extra na face superior da secção, onde se impôs a temperatura ambiente constante de 20°C.

Tal como referido anteriormente, as trocas de calor por convecção são um fenómeno bastante complexo, em grande parte devido à dificuldade de determinação do coeficiente de convecção (h_c). A parte 1-2 do Eurocódigo 1 [5.24] sugere, de uma forma simplificada, a consideração deste coeficiente constante com a temperatura, apresentando o valor de 25 W/m²°C. No entanto, no modelo base elaborado considerou-se os valores utilizados por Tracy [5.25] na modelação de um ensaio de resistência ao fogo de uma laje de GFRP. Assim, para a face quente (inferior) admitiu-se que os valores de h_c seguem uma relação linear com a temperatura, tomando os valores de $h_c = 5$ W/m²°C para 20°C e $h_c = 50$ W/m²°C para 1000°C. Relativamente à face fria das vigas, em contacto com o ar atmosférico à temperatura aproximada de 20°C, foi adoptado o valor de $h_c = 10$ W/m²°C, constante com a temperatura. A influência dos valores destes factores na distribuição da temperatura ao longo da secção de meio vão das vigas foi alvo de um estudo paramétrico, o qual se apresenta no

ponto 5.4. Na figura 5.25 estão resumidas as condições de fronteira consideradas no modelo base apresentado.

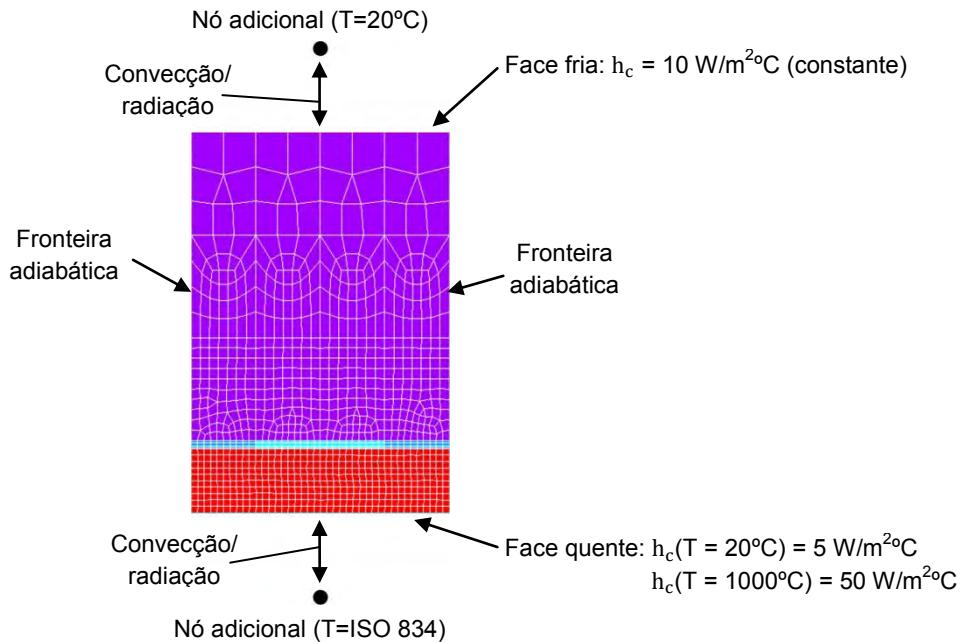


Figura 5.25. Condições de fronteira admitidas no modelo base.

5.3.3. Tempo total de simulação e intervalo de tempo de cálculo

As simulações foram realizadas para um tempo total coincidente com a duração dos ensaios de resistência ao fogo descritos no capítulo 4. Na tabela 5.1 apresenta-se o tempo total de simulação para cada tipo de viga. Relativamente aos intervalos de tempo entre os quais o programa calcula a distribuição de temperaturas, optou-se por defini-los com uma duração de 10 segundos, pois intervalos de valor inferior não mostraram uma melhoria significativa nos resultados, mas aumentaram drasticamente o tempo de cálculo, razão pela qual se adoptou este intervalo em todas as simulações.

Tabela 5.1. Tempo total de simulação de cada tipo de viga.

Denominação da viga	Tempo total de simulação [s]
Viga RC	4140
Viga CFRP	3600
Viga VP25	5340
Viga VP40	12600
Viga SC25	5160
Viga SC40	10920

5.4. Estudos paramétricos

Neste ponto do documento apresentam-se as principais conclusões sobre os estudos paramétricos efectuados na viga de betão armado não reforçada e sem qualquer sistema de protecção ao fogo (*viga RC*). A análise de sensibilidade foi realizada no modelo desta viga pois, tal como referido

anteriormente, foi modelada considerando que era constituída apenas por betão, cuja variação das propriedades termofísicas com a temperatura foram profundamente estudadas nas últimas décadas, existindo, por isso, maior certeza nos seus valores.

5.4.1. Coeficiente de convecção da face quente

Para averiguar a influência deste coeficiente no valor das temperaturas na viga ao longo do tempo de exposição ao fogo, fizeram-se simulações com $h_c = 5 \text{ W/m}^2\text{C}$, $h_c = 25 \text{ W/m}^2\text{C}$ e $h_c = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$, constantes com a temperatura. Os resultados obtidos apresentaram diferenças significativas face aos registados no modelo base. Refira-se que no caso do modelo com $h_c = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$ obteve-se uma melhor aproximação aos valores experimentais do que no modelo base. Na tabela 5.2 apresentam-se os erros médios em relação aos valores de temperatura experimentais obtidos em cada um dos modelos ao nível dos termopares T1 e T1'', T2 e T2''. Optou-se por calcular o erro médio em relação aos resultados experimentais apenas ao nível destes termopares pois são os que se encontram mais próximos da face inferior da viga, e, por isso, são os mais importantes para prever o comportamento do reforço.

Tabela 5.2. Influência do coeficiente de convecção da face quente.

Modelo	h_c face quente [$\text{W/m}^2\text{C}$]	Variação com a temperatura	Erro médio (%)	
			T1 e T1''	T2 e T2''
Base	5 ($T=20^\circ\text{C}$) e 50 ($T=1000^\circ\text{C}$)	Linear	35	34
2A	5	Constante	80	72
2B	25	Constante	40	36
2C	50	Constante	13	14

Pela observação da tabela anterior conclui-se que o modelo com coeficiente de convecção constante com a temperatura e de valor $h_c = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$ apresentou o melhor ajuste aos valores experimentais. Os diagramas temperatura-tempo obtidos em cada um dos modelos podem ser consultados no Anexo V. Nesses diagramas observa-se que, como esperado, quanto menor for o coeficiente de convecção da face quente, menores são as temperaturas atingidas na viga.

5.4.2. Coeficiente de convecção da face fria

Foi estudada a influência do valor do coeficiente de convecção da face fria através de simulações do modelo da viga *RC* considerando $h_c = 0.00001 \text{ W/m}^2\text{C}$, $h_c = 4 \text{ W/m}^2\text{C}$ e $h_c = 200 \text{ W/m}^2\text{C}$, constantes com a temperatura. Na tabela 5.3 observa-se que a variação do coeficiente de convecção da face fria não teve qualquer influência no erro médio ao nível dos termopares analisados. De facto, consultando os diagramas temperatura-tempo obtidos nas simulações com os valores de h_c indicados, conclui-se que a influência deste factor é praticamente nula, principalmente na evolução das temperaturas ao nível dos termopares mais próximos da face quente. Assim, é possível afirmar que as trocas de calor por convecção na face fria têm uma influência residual na distribuição de temperaturas na secção da viga *RC*. Estas alterações no valor coeficiente de convecção da face fria não introduzem mudanças visíveis nos diagramas temperatura-tempo relativamente ao modelo base, razão pela qual se optou não os representar no presente documento.

Tabela 5.3. Influência do coeficiente de convecção da face fria.

Modelo	h_c face fria [W/m ² °C]	Variação com a temperatura	Erro médio (%)	
			T1 e T1'	T2 e T2'
Base	10	Constante	35	34
3A	0.00001	Constante	35	34
3B	4	Constante	35	34
3C	200	Constante	35	34

5.4.3. Trocas de calor por convecção e radiação na face fria

No ponto anterior conclui-se que as trocas de calor por convecção na face fria têm pouca influência na distribuição de temperaturas na secção da viga *RC*. Por esta razão, foi decidido estudar o efeito da não consideração das trocas de convecção e radiação nessa face. A tabela 5.4 mostra que não houve qualquer alteração nos valores médios dos erros. Pela observação do diagrama temperatura-tempo presente no Anexo V conclui-se que esta opção apenas teve uma influência residual nos valores das temperaturas ao nível dos termopares mais próximos da face fria (T5 e T6), onde se obteve um ligeiro aumento dos valores das temperaturas. Nos nós coincidentes com a posição dos restantes termopares as alterações foram praticamente nulas.

Tabela 5.4. Influência das trocas de calor por convecção e radiação na face fria.

Modelo	Trocadas de calor por convecção e radiação na face fria	Erro médio (%)	
		T1 e T1'	T2 e T2'
Base	Consideradas	35	34
4	Não consideradas	35	34

5.4.4. Imposição directa das temperaturas do incêndio padrão nos nós da face quente

A imposição directa das temperaturas do incêndio padrão nos nós da discretização da face quente tem sido a opção de modelação considerada nos estudos numéricos desenvolvidos sobre o comportamento de estruturas compósitas ao fogo, nomeadamente nos trabalhos de Hawileh *et al.* [5.1] e Bai *et al.* [5.17]. Esta metodologia despreza as trocas de calor por radiação e convecção na face quente, impondo aos nós dessa face a evolução da temperatura com o tempo de acordo com o incêndio padrão que, por sua vez, transmitem o calor por condução aos restantes elementos da discretização. Esta opção foi estudada em conjunto com a não consideração das trocas de calor por radiação e convecção na face fria que, tal como se concluiu no ponto anterior, não tem uma influência significativa na distribuição de temperaturas. De facto, o programa de cálculo automático trata as trocas de calor de convecção e radiação de uma forma pouco clara, referindo apenas que estas ocorrem entre uma superfície SURF151 e um nó extra ao qual está associada. Com estas opções de modelação essa metodologia foi abandonada, considerando-se que todas as trocas de calor ocorrem por condução. Apesar de constituir uma versão simplificada do fenómeno real, a utilização deste tipo de modelos pelos referidos investigadores permitiram a obtenção de resultados que revelaram um bom ajuste aos valores experimentais.

Na tabela 5.5 apresentam-se os valores médios dos erros obtidos nesta variante do modelo base. A observação dessa tabela não revela um melhor ajuste aos valores experimentais do que o registado no modelo base. No entanto, observando os diagramas temperatura-tempo presentes no Anexo V, conclui-se que com esta opção de modelação as temperaturas obtidos neste modelo são, na maioria

dos instantes, superiores às registadas no decorrer do ensaio (sobretudo ao nível dos termopares mais próximos da face quente), contrariamente à situação verificada nas variantes do modelo base descritas até este ponto.

Tabela 5.5. Influência das trocas de calor por convecção e radiação na face quente.

Modelo	Trocadas de calor por convecção e radiação nas faces quente e fria	Erro médio (%)	
		T1 e T1'	T2 e T2'
Base	Consideradas	35	34
5	Não consideradas	32	43

5.4.5. Emissividade

Foi igualmente estudada a influência do valor da emissividade (ϵ) do betão na distribuição de temperaturas. Para tal, foram realizadas simulações em que o valor admitido no modelo base ($\epsilon = 0.7$) foi alterado para $\epsilon = 0.8$ numa primeira fase, e $\epsilon = 0.9$ numa segunda fase. As diferenças nos valores de temperatura entre estas 3 opções foram praticamente desprezáveis, diferindo dos resultados obtidos no modelo base no máximo em 0.5°C . Assim, optou-se por não representar os respectivos diagramas temperatura-tempo, pois a ordem de grandeza das diferenças nos resultados face ao modelo base impede que sejam perceptíveis nos referidos diagramas.

5.4.6. Conclusões

Os estudos paramétricos desenvolvidos com recurso ao modelo da viga RC permitiram concluir que o valor da emissividade do betão e as trocas de calor por convecção e radiação na face fria têm uma influência desprezável na distribuição de temperaturas na secção obtidas com o modelo base. Por outro lado, na face quente esses modos de transferência de calor têm uma contribuição assinalável para a distribuição de temperaturas, tal como se concluiu nos pontos 5.4.1 e 5.4.4. Consequentemente, decidiu-se analisar os resultados da aplicação dos seguintes modelos às secções características das várias vigas:

- **Modelo base:** geometria e características definidas no ponto 5.3;
- **Modelo ISO:** imposição directa da temperatura do incêndio padrão (de acordo com a norma ISO 834 [5.26]) nos nós da face quente e não consideração das trocas de calor por convecção e radiação na face fria (idêntico ao modelo 5 descrito no ponto 5.4.4);
- **Modelo 50:** utilização do coeficiente de convecção da face quente $h_c = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$, constante com a temperatura, e não consideração das trocas de calor por convecção e radiação na face fria.

Refira-se que as restantes características dos modelos ISO e 50 são semelhantes às do modelo base.

Os resultados da aplicação dos modelos anteriores às secções características das várias vigas são apresentados nos pontos seguintes.

5.5. Apresentação e discussão dos resultados

Neste ponto do documento são apresentados os resultados obtidos após a simulação numérica da evolução das temperaturas nas secções características das várias vigas quando sujeitas ao incêndio padrão. Para cada secção-tipo foram analisados os resultados obtidos com recurso aos três modelos utilizados (**modelo base**, **modelo ISO** e **modelo 50**), comparando-os com os valores registados nos ensaios experimentais e calculando os respectivos erros médios.

De forma a facilitar a interpretação dos diagramas temperatura-tempo, apresenta-se a figura 5.26 onde é indicada a nomenclatura utilizada para os vários termopares colocados na secção central das vigas.

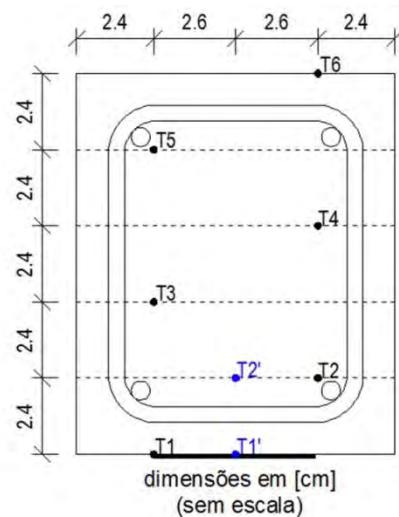


Figura 5.26. Localização dos termopares na secção de meio vão das vigas RC a SC40.

Na referida simulação numérica foram obtidos os valores de temperatura nos nós da discretização coincidentes com a posição dos termopares indicados na figura 5.26. No entanto, com o objectivo de simplificar a leitura e a apresentação dos resultados, optou-se por comparar a média dos valores associados a T1 e T1" (que se denominou por T1av. e M1av., respectivamente para valores experimentais e numéricos), e a T2 e T2" (que se denominou por T2av. e M2av., respectivamente para valores experimentais e numéricos). Relativamente aos restantes termopares, os valores experimentais e numéricos foram comparados directamente. A tabela 5.6 sintetiza a nomenclatura utilizada neste ponto do documento.

Tabela 5.6. Nomenclatura utilizada para os valores de temperatura obtidos por via experimental e numérica.

Valores experimentais		Valores numéricos	
Grandeza	Nomenclatura	Grandeza	Nomenclatura
Média entre temperaturas T1" e T1	T1av.	Média entre temperaturas T1" e T1	M1av.
Média entre temperaturas T2" e T2	T2av.	Média entre temperaturas T2" e T2	M2av.
Temperatura em T3	T3	Temperatura em T3	M3
Temperatura em T4	T4	Temperatura em T4	M4
Temperatura em T5	T5	Temperatura em T5	M5
Temperatura em T6	T6	Temperatura em T6	M6

Recorrendo à nomenclatura apresentada na tabela anterior, a percentagem de erro de cada valor numérico (δ_i) foi determinada através da expressão 5.14,

$$\delta_i = \frac{|T_i - M_i|}{M_i} \times 100 \quad (5.14)$$

em que,

- T_i – valor da temperatura no termopar i obtido experimentalmente;
- M_i – valor da temperatura no nó coincidente com a posição do termopar i (obtido numericamente).

Nos pontos seguintes são apenas apresentados os diagramas temperatura-tempo do modelo que em cada secção-tipo registou o melhor ajuste aos valores experimentais.

5.5.1. Viga RC

Para determinar qual dos três modelos da *viga RC* (modelo base, modelo ISO e modelo 50) apresenta o melhor ajuste aos resultados experimentais, foram determinados os erros médios associados a cada termopar e o valor médio do erro global. Na tabela 5.7 apresentam-se os resultados obtidos para cada um destes erros.

Tabela 5.7. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da *viga RC*.

Modelo	Erro médio por termopar [%]						Erro médio global [%]
	T1av.	T2av.	T3	T4	T5	T6	
Base	35	34	32	40	38	39	36
ISO	32	43	30	19	16	20	27
50	13	14	14	28	29	30	21

Por observação do valor médio do erro global presente na tabela 5.7, conclui-se que o modelo 50 da *viga RC* é o que regista a melhor aproximação aos valores experimentais, sobretudo ao nível dos termopares mais próximos da face quente (T1av., T2av. e T3). Contudo, verifica-se que dos 3 modelos testados, o modelo ISO é o que melhor se ajusta aos valores experimentais nos três termopares próximos da face fria da viga (T3, T4 e T5). No entanto, nesse modelo, ao nível dos restantes termopares (T1av., T2av. e T3), foram obtidos valores de temperatura significativamente superiores aos registados no ensaio (ver Anexo VII), o que contribuiu para um erro médio global superior ao do modelo 50. Na figura 5.27 apresenta-se o diagrama temperatura-tempo com os valores obtidos no ensaio e através do modelo 50 da *viga RC*. Os diagramas referentes aos 3 modelos da secção desta viga podem ser consultados no Anexo VII em formato A4.

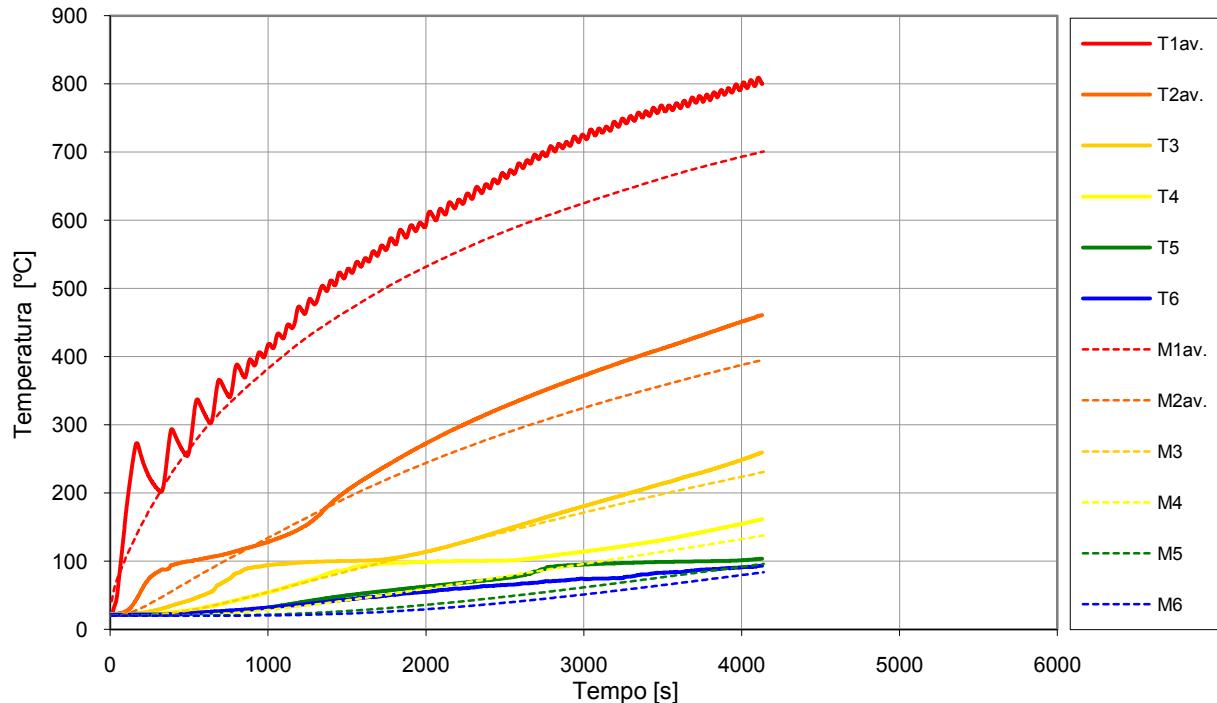


Figura 5.27. Diagrama temperatura-tempo da viga RC: valores experimentais e numéricos (modelo 50).

Na figura anterior observa-se que, de uma forma geral, os valores numéricos são ligeiramente inferiores aos experimentais. Ainda assim, este modelo (modelo 50) apresenta um bom ajuste aos resultados registados no ensaio da viga RC. Naturalmente, os valores resultantes da simulação numérica não incluem as oscilações que se observam em T1av., que correspondem à activação e desactivação dos queimadores do forno. Ainda na mesma figura, observa-se que à medida que a duração do ensaio/simulação vai aumentando, a diferença entre os valores numéricos e experimentais aumenta ligeiramente, sendo visível, sobretudo, nas curvas T1av., T2av., e T3. Esta diferença pode ser explicada pela não consideração (no modelo) do efeito da fendilhação do betão (as fendas constituem pontos de penetração do calor para o interior da secção) e pelo facto de com o decorrer do ensaio o sistema de isolamento lateral das vigas se ir degradando. De facto, a degradação deste sistema de isolamento possibilita a existência de trocas de calor ao nível das faces laterais das vigas, que no modelo se consideraram como fronteiras adiabáticas durante todo o tempo de simulação. Além destes factores, e apesar de as propriedades termofísicas do betão estarem bem definidas na parte 1-2 do Eurocódigo 2, existe a possibilidade de as propriedades do betão utilizado nas vigas ensaiadas serem ligeiramente diferentes das que foram admitidas no modelo numérico. Finalmente, pode afirmar-se que existe alguma incerteza em relação ao posicionamento dos termopares. De facto, os resultados do modelo numérico referem-se à posição teórica destes sensores (indicada na figura 5.26); no entanto, existe a possibilidade de durante as operações de betonagem o seu posicionamento ter sido ligeiramente alterado. Desta forma, é possível que se estejam a comparar valores experimentais e numéricos obtidos em posições ligeiramente diferentes. Em todo o caso, é de assinalar a boa concordância geral entre as temperaturas medidas e as calculadas.

5.5.2. Viga CFRP

Na viga CFRP verificou-se que o modelo 50 conduziu a resultados com um melhor ajuste aos valores experimentais do que os obtidos nos outros modelos. Na figura 5.28 apresenta-se o diagrama

temperatura-tempo onde se incluem os resultados experimentais e os do modelo 50 referente à secção-tipo da viga CFRP. A tabela 5.8 resume os erros médios por termopar e o erro médio global de cada modelo em relação aos resultados experimentais.

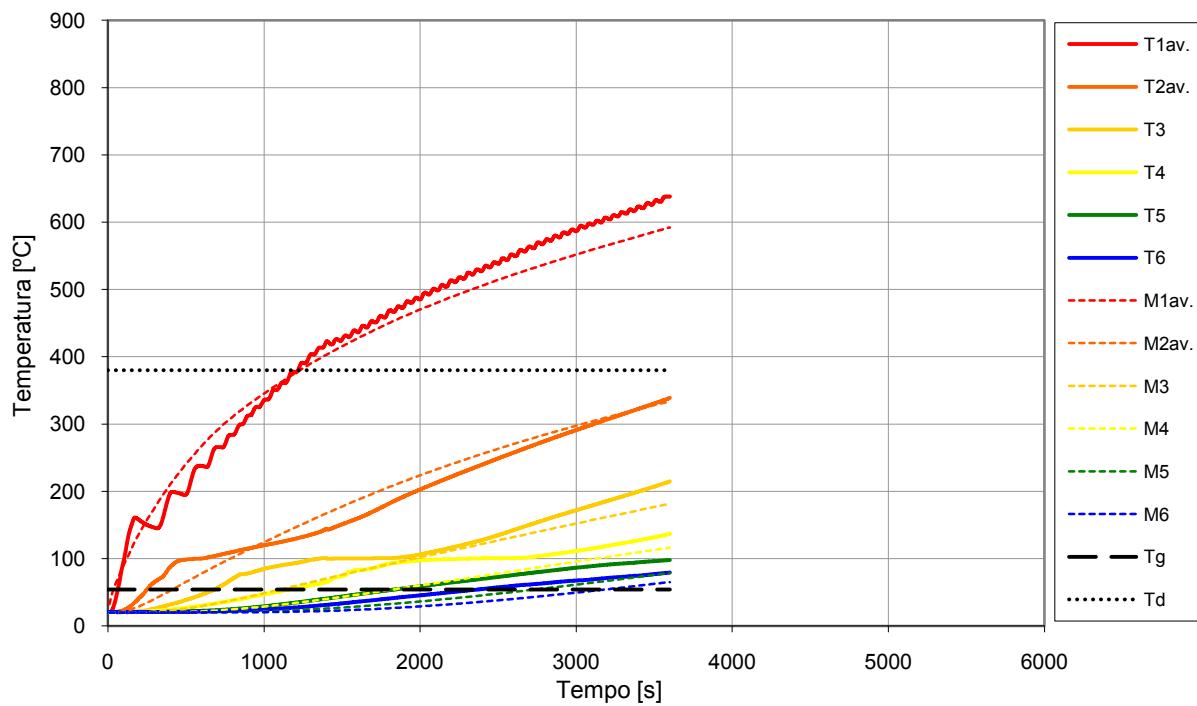


Figura 5.28 Diagrama temperatura-tempo da viga CFRP: valores experimentais e numéricos (modelo 50).

Tabela 5.8. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da viga CFRP.

Modelo	Erro médio por termopar [%]						Erro médio global [%]
	M1av.	M2av.	M3	M4	M5	M6	
Base	27	23	34	37	34	30	31
ISO	49	55	21	14	11	11	27
50	8	11	18	26	26	23	19

Na tabela 5.8 é possível observar que os valores dos erros médios globais são semelhantes aos verificados na viga RC (tabela 5.7). Tal como nessa viga, o modelo 50 apresenta um melhor ajuste aos resultados experimentais ao nível dos termopares mais próximos da face quente (T1av., T2av., e T3), enquanto que o modelo ISO é o que melhor se ajusta aos valores experimentais nos três termopares próximos da face fria da viga (T3, T4 e T5). À semelhança da situação verificada na viga RC, as temperaturas obtidas no modelo ISO nos termopares T1av., T2av. e T3 são consideravelmente superiores aos registados no ensaio (ver Anexo VIII), o que contribuiu para que o erro médio global seja superior ao do modelo 50.

Atendendo à figura 5.28, conclui-se que os resultados do modelo 50 se aproximam bastante dos valores experimentais. Refira-se a existência de uma diferença assinalável nos instantes iniciais do ensaio/simulação entre o andamento das curvas obtidas por via numérica e as experimentais referentes aos termopares T2av. e T3. As curvas experimentais aumentam a uma taxa superior às numéricas até cerca de 500 segundos, no caso de T2av, e 1000 segundos, no caso de T3. A partir destes instantes, os declives das curvas numéricas e experimentais são semelhantes. Estas diferenças podem estar relacionadas com o facto do teor em humidade do betão ensaiado ser diferente do considerado para a definição das propriedades termofísicas deste material. Essas

diferenças no andamento das curvas ocorreram até temperaturas de 100°C, valor em que a quantidade de água livre no betão tem uma influência considerável na evolução das temperaturas.

Relativamente ao tempo médio até se atingir a temperatura de transição vítreo do adesivo de colagem (54°C), os resultados numéricos indicam que são necessários apenas 40 segundos de exposição ao fogo, consideravelmente menos do que os 198 segundos (3.3 minutos) registados no ensaio. Esta diferença pode ser explicada pelo facto de a temperatura no forno nos segundos iniciais não conseguir acompanhar o valor da curva de incêndio padrão. A temperatura de decomposição decomposição do mesmo material (380°C) foi atingida após 1200 segundos (20 minutos) de exposição ao fogo, coincidindo com o valor previsto pelo modelo, o que revela, mais uma vez, um bom ajuste aos resultados experimentais.

Ao contrário da situação verificada na viga analisada anteriormente, na viga CFRP não é tão notório um incremento da diferença entre os valores experimentais e numéricos à medida que aumenta o tempo de ensaio/simulação. Esta situação pode estar relacionada com o facto de este ensaio ter tido uma duração inferior, e como tal, a degradação das placas de isolamento lateral ter sido menor.

Os diagramas temperatura-tempo dos três modelos estudados para esta viga podem ser consultados em formato A4 no Anexo VIII.

5.5.3. Viga VP25

Na tabela 5.9 apresentam-se os erros médios por termopar e o erro médio global dos vários modelos da secção-tipo da viga VP25. Nessa tabela é possível observar que o modelo ISO é o que apresenta o menor erro global. Por essa razão, na figura 5.29 apresenta-se o respectivo diagrama temperatura-tempo.

Tabela 5.9. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da viga VP25.

Modelo	Erro médio por termopar [%]						Erro médio global [%]
	M1av.	M2av.	M3	M4	M5	M6	
Base	14	22	26	22	24	27	23
ISO	13	14	20	18	21	24	19
50	13	20	24	21	23	26	21

Ao observar a tabela 5.9 conclui-se que os erros médios associados a cada um dos modelos são semelhantes. Os andamentos dos respectivos diagramas temperatura-tempo não apresentam diferenças tão significativas como as verificadas nas vigas RC e CFRP, tal como se observa no Anexo IX. Esta situação poderá estar relacionada com o facto de o aumento da temperatura registado na viga ser consideravelmente inferior ao das duas anteriores (devido à presença do sistema de protecção ao fogo), sendo mais limitadas as variações possíveis entre os resultados dos três modelos. Recorde-se que nas vigas RC e CFRP o modelo ISO apresentou um melhor ajuste aos valores experimentais dos termopares mais próximos da fase fria. Por outro lado, nos restantes termopares (mais próximos da face quente) as temperaturas previstas por esse modelo eram consideravelmente superiores às registadas no ensaio, pois a temperatura do incêndio padrão foi imposta directamente nos nós da face quente, afectando o valor do erro global. Na viga VP25 a presença do sistema de protecção contribuiu para atenuar esse efeito, razão pela qual as temperaturas previstas pelo modelo ISO nos termopares próximos da face quente (M1av, M2av e M3) apresentam um melhor ajuste aos valores experimentais, fazendo com que o erro global deste modelo seja inferior ao do modelo 50.

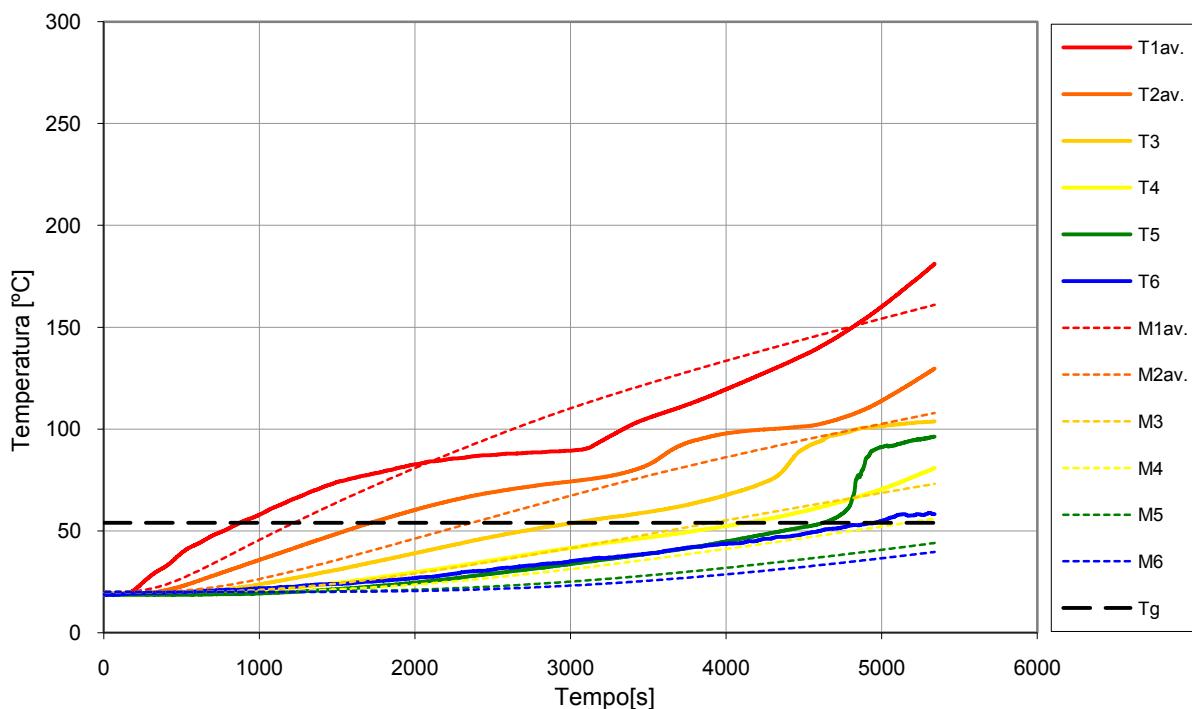


Figura 5.29. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga VP25.

No ensaio experimental verificou-se que a temperatura de transição vítreia do adesivo na secção de meio vão era atingida, em média, ao fim de 880 segundos (14.7 minutos), enquanto que no modelo são previstos 1230 segundos (20.5 minutos). Na figura 5.29 é visível que na primeira metade do ensaio/simulação os valores de temperatura das curvas T1av. e T2av. são superiores aos previstos pelo modelo (curvas M1av. e M2av.). Note-se que as curvas temperatura-tempo obtidas por via numérica apresentam um andamento mais regular do que as experimentais. Nestas últimas, a temperatura aumenta mais rapidamente na fase inicial do ensaio, à qual se segue um período com uma taxa de aumento inferior, o que se deve à ocorrência das reacções endotérmicas de evaporação/desidratação da argamassa e dos seus constituintes. Após este período (entre os 2000 e os 3000 segundos no caso de T1av.), as temperaturas voltam a registar o forte aumento devido à perda de eficácia do sistema de protecção e à deterioração das placas de isolamento lateral (as faces laterais das vigas deixam de constituir fronteiras adiabáticas). Este último acontecimento não foi considerado na modelação numérica, o que pode explicar, em parte, a diferença entre os valores numéricos e experimentais. No entanto, a ocorrência de reacções de desidratação e a posterior perda de eficácia do sistema de protecção foram consideradas implicitamente na modelação das propriedades termofísicas desse material, tal como descrito no ponto 5.2.3, o que pode significar que para a argamassa de vermiculite e perlite utilizada, essa modelação não é totalmente acertada. Apesar destas discrepâncias, conclui-se que o modelo apresenta um bom ajuste aos resultados experimentais.

5.5.4. Viga VP40

Pela observação da tabela 5.10 conclui-se que, tal como na viga VP25, o modelo em que a temperatura do incêndio padrão foi introduzida directamente nos nós da face quente (modelo ISO) apresentou um erro médio global inferior ao dos outros modelos, mantendo-se, por isso, válida a explicação deste fenómeno apresentada no ponto anterior.

Tabela 5.10. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da viga VP40.

Modelo	Erro médio por termopar [%]						Erro médio global [%]
	M1av.	M2av.	M3	M4	M5	M6	
Base	16	16	22	21	21	18	19
ISO	13	11	17	15	15	10	13
50	15	15	20	18	17	11	16

A evolução dos valores de temperatura prevista pelo modelo ISO e as respectivas temperaturas registadas durante o ensaio à viga VP40 encontram-se representadas na figura 5.30. Os resultados equivalentes obtidos nos modelos base e 50 podem ser consultados no Anexo X. Observando a figura 5.30 conclui-se que na primeira parte do ensaio/simulação (até cerca de 4000 segundos de duração) a relação entre as curvas numéricas e as experimentais é semelhante à verificada na viga VP25, ou seja, os valores obtidos por via numérica são inferiores aos medidos no ensaio. Consequentemente, o modelo elaborado prevê que a temperatura de transição vítreo do adesivo seja atingida ao fim de 2270 segundos (37.8 minutos), superior aos 1420 segundos (23.7 minutos) registados durante a campanha experimental. Na parte final do ensaio/simulação observa-se que a diferença entre os resultados numéricos e experimentais aumenta significativamente (sobretudo nos termopares mais próximos da face quente), situação que poderá dever-se, em parte, ao facto de a modelação das propriedades termofísicas da material de protecção não ser a mais adequada, e à consideração de uma fronteira adiabática nas faces laterais da viga durante todo o tempo de simulação.

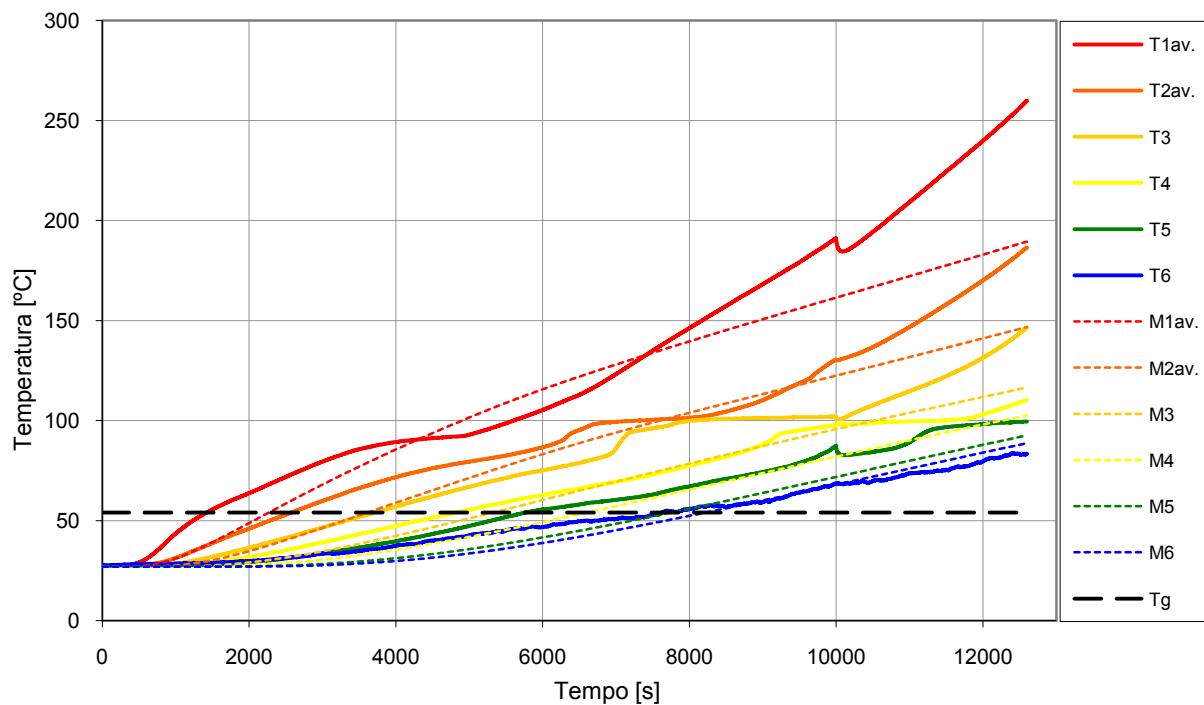


Figura 5.30. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga VP40.

5.5.5. Viga SC25

A tabela 5.11 sintetiza os erros médios por termopar e o erro médio global de cada modelo da secção-tipo da viga SC25. Nessa tabela observa-se que os valores médios do erro global são bastante semelhantes entre si, no entanto, o modelo ISO volta a apresentar uma ligeira vantagem.

Tabela 5.11. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da viga SC25.

Modelo	Erro médio por termopar [%]						Erro médio global [%]
	M1av.	M2av.	M3	M4	M5	M6	
Base	12	11	19	19	19	22	17
ISO	25	5	12	14	14	17	14
50	14	8	16	17	16	18	15

Atendendo aos valores médios do erro por cada termopar, presentes na tabela anterior, conclui-se que o modelo ISO é o que menos se aproxima dos valores experimentais referentes a T1av.; no entanto, ao nível dos restantes termopares, verifica-se a situação inversa, justificando o menor erro médio global associado a este modelo. Na figura 5.31 ilustram-se os diagramas temperatura-tempo obtidos através dos registos efectuados no ensaio à viga SC25 e da respectiva simulação no modelo ISO. Nessa figura, observa-se que a curva de M1av. se situa acima da curva associada a T1av. durante praticamente todo o tempo de ensaio/simulação. Esta situação, embora menos pronunciada, também se verifica nos diagramas obtidos nos modelos base e 50 (ver Anexo XI), o que poderá significar que os termopares colocados na interface betão-CFRP (T1 e T1") se encontram ligeiramente acima da posição pretendida, justificando o menor valor da temperatura observada no ensaio. Nas curvas referentes aos outros termopares, observa-se um bom ajuste entre valores numéricos e experimentais. Refiram-se os momentos finais do ensaio, em que a taxa de aumento das temperaturas registadas na campanha experimental é superior à prevista no modelo, podendo ser explicada, uma vez mais, pela degradação do sistema de isolamento lateral e pela não consideração no modelo do efeito da fendilhação do betão e do próprio sistema de protecção. Note-se que a curva experimental T1av. apresenta uma ligeira diminuição aproximadamente aos 3700 segundos, que está relacionada com uma perturbação nas leituras dos termopares no momento da rotura do sistema de reforço, situação que foi impossível de ser detectada no modelo elaborado.

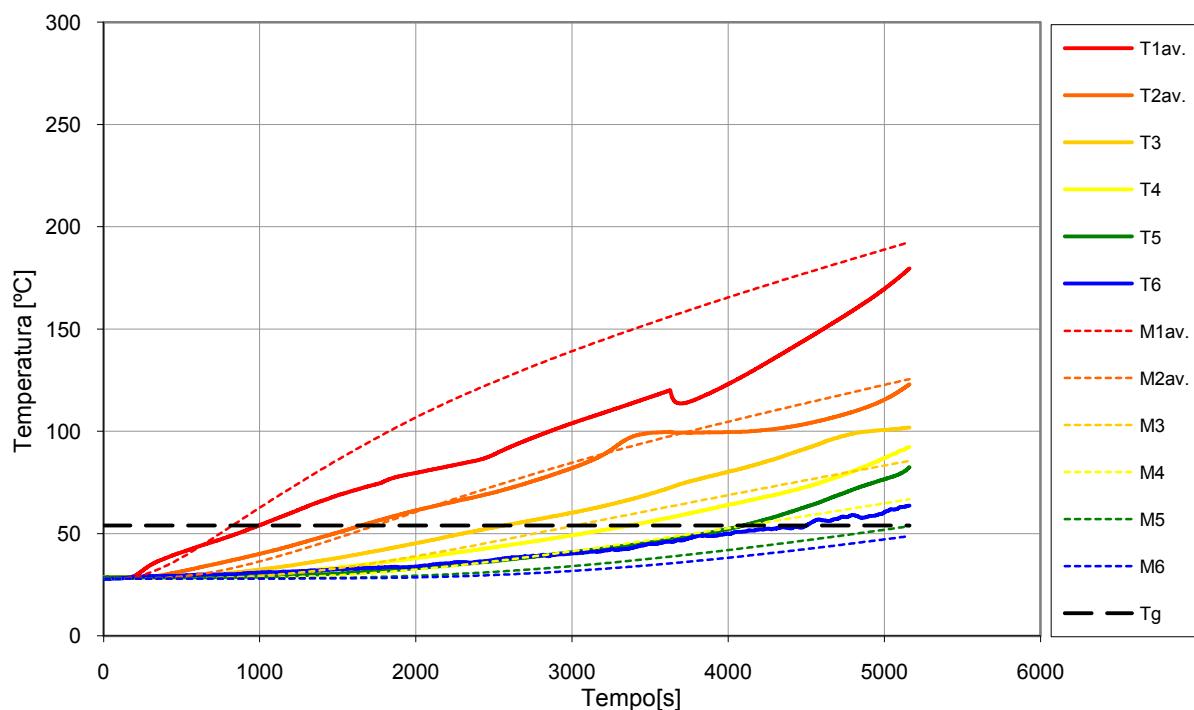


Figura 5.31. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga SC25.

Tal como se observa na figura 5.31, o modelo numérico ISO previu que a temperatura de transição vítreia do adesivo fosse atingida após um tempo de exposição ao incêndio padrão inferior ao que se verificou no programa experimental, isto é, 830 segundos (13.8 minutos) no modelo contra os 1000 segundos (16.7 minutos) obtidos experimentalmente. Tal como referido anteriormente, a possibilidade de os termopares colocados na interface betão-CFRP estarem ligeiramente acima da posição pretendida poderá explicar, em parte, esta diferença. No entanto, essa possibilidade não está de acordo com o facto de nos momentos iniciais do ensaio/simulação, a temperatura medida nos termopares nessa interface ser superior à prevista pelo modelo. Esta situação também se verifica nos restantes modelos (ver Anexo XI), pelo que se pode dever à menor quantidade de água livre no sistema de protecção (que tem influência no desempenho térmico, sobretudo para temperaturas até 100°C) do que aquela que foi considerada implicitamente na modelação das propriedades termofísicas deste material.

5.5.6. Viga SC40

Dos três modelos elaborados para simular a evolução das temperaturas na secção-tipo da viga SC40, dois deles, modelos ISO e 50, apresentaram um erro médio global de igual valor (12%). No entanto, tal como se observa na tabela 5.12, o modelo ISO apresenta um erro médio superior ao modelo 50 apenas nos termopares colocados na interface betão-CFRP (M1av.). Esta situação também foi verificada na viga SC25, pelo que as explicações anteriores são aplicáveis a este caso.

Tabela 5.12. Erro médio por termopar e erro médio global dos modelos da viga SC40.

Modelo	Erro médio por termopar [%]					Erro médio global [%]
	M1av.	M2av.	M3	M4	M6	
Base	9	9	16	19	17	14
ISO	18	7	9	13	12	12
50	10	7	14	16	13	12

Na figura 5.32 apresenta-se o diagrama temperatura-tempo obtido no ensaio de resistência ao fogo da viga SC40, bem como o seu correspondente determinado numericamente no modelo ISO. Refira-se que nesses diagramas não se encontra representada a evolução da temperatura com o tempo ao nível do termopar T5 (M5 no modelo numérico), pois durante a campanha experimental não foi possível efectuar quaisquer leituras neste sensor, possivelmente devido a danos causados nas operações de betonagem. O modelo ISO previu que a temperatura de transição vítreia do adesivo era atingida, em média, ao fim de 1920 segundos (32 minutos), inferior aos 2290 segundos (38.2 minutos) medidos no ensaio. Na figura 5.32 observa-se que o andamento relativo entre as curvas numéricas e experimentais é bastante semelhante ao verificado na viga SC25, razão pela qual as considerações apresentadas no ponto anterior se mantêm válidas.

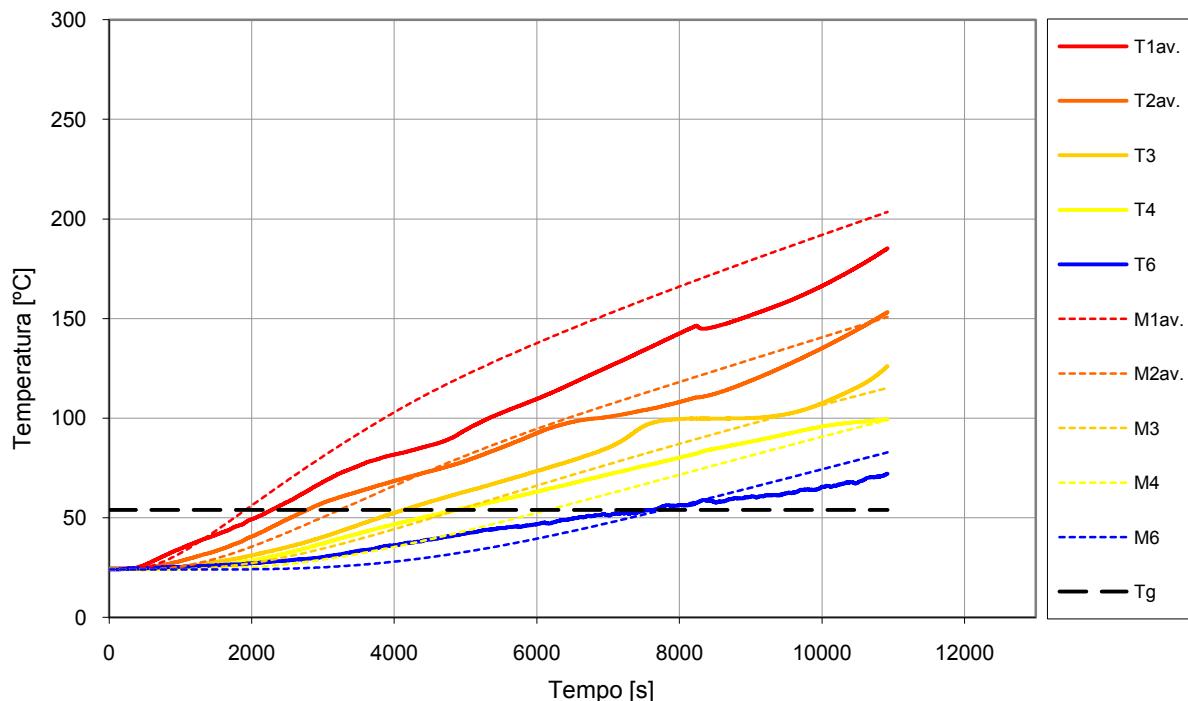


Figura 5.32. Diagramas temperatura-tempo experimental e numérico (modelo ISO) da viga SC40.

5.6. Conclusões

Nos estudos paramétricos efectuados no modelo bidimensional da viga *RC* foi possível observar que a não consideração das trocas de calor por convecção e radiação na face fria tem uma influência residual nos resultados, permitindo simplificar o modelo base apresentado no ponto 5.3. Além disso, concluiu-se que é possível melhorar o ajuste aos resultados experimentais considerando um coeficiente de convecção na face quente constante com a temperatura e igual a $50 \text{ W/m}^2\text{C}$. Nesse estudo paramétrico observou-se que o valor deste coeficiente tem uma influência significativa na distribuição de temperatura na secção das vigas. Assim, com base nestes resultados, decidiu-se estudar uma variante do modelo base, que se denominou modelo 50, onde se desprezaram as trocas de calor por convecção e radiação na face fria e se considerou $h_c = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$. Além desta variante ao modelo base, foi estudada outra (utilizada com sucesso em vários estudos internacionais), em que se desprezaram as trocas de calor por convecção e radiação nas faces quente e fria, impondo directamente a temperatura do incêndio padrão nos nós da discretização coincidentes com a face inferior das vigas. Esta variante ao modelo base foi denominada por modelo ISO.

Após os estudos paramétricos, foram analisados, para cada uma das vigas, os resultados obtidos no modelo base e nas duas variantes (modelo 50 e modelo ISO), comparando-os com os valores obtidos experimentalmente. Em todas das vigas, verificou-se que os resultados fornecidos pelas variantes apresentaram um melhor ajuste aos valores experimentais do que os obtidos no modelo base. Nas vigas sem sistema de protecção ao fogo (viga *RC* e viga *CFRP*), o modelo 50 mostrou ser o mais adequado, registando um erro médio global inferior ao do modelo ISO. Nestas duas vigas as temperaturas previstas pelo modelo ISO ao nível dos termopares mais próximos da face quente, são consideravelmente superiores aos valores registados no ensaio, situação que se deveu ao facto de se ter imposto directamente a temperatura do incêndio padrão nos nós da face quente. Nas vigas VP25, VP40, SC25 e SC40 a presença do sistema de protecção ao fogo contribuiu para que o efeito da imposição directa das temperaturas nos nós não fosse tão significativo ao nível dos termopares

colocados no interior da viga. Assim, nestas vigas, os resultados do modelo ISO apresentaram um melhor ajuste aos valores experimentais do que os do modelo 50. Refira-se ainda que nas vigas SC25 e SC40 a modelação simplificada do espaço de ar adjacente ao sistema de reforço não parece ter prejudicado a qualidade dos resultados, visto o erro médio global associado a estes modelos ser inferior ao registado nos modelos das vigas protegidas com argamassa de vermiculite e perlite (vistas VP25 e VP40), onde não existe esse espaço vazio.

De uma forma geral, conclui-se que os modelos elaborados fornecem uma boa aproximação da distribuição de temperaturas em secções de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP sujeitas ao incêndio padrão. Em vigas com sistemas de protecção ao fogo, os melhores resultados foram obtidos nos modelos em que se impôs directamente a temperatura do incêndio padrão nos nós da face quente da viga, desprezando totalmente as trocas de calor por convecção e radiação nessa face. Os erros médios globais associados aos modelos elaborados, variáveis entre 12% e 21%, mostram que a simulação numérica do comportamento ao fogo de elementos de betão armado reforçados com materiais compósitos constitui um complemento útil, ou mesmo uma alternativa, à realização de ensaios experimentais. Assim, com recurso aos modelos apresentados, é possível prever qual a evolução das temperaturas nas secções-tipo destes elementos, permitindo avaliar o desempenho de várias combinações de espessuras e materiais de protecção, constituindo uma ferramenta bastante útil no planeamento de campanhas experimentais e auxiliando na previsão de outros resultados.

5.7. Bibliografia

- [5.1] R. A. Hawileh, M. Naser, W. Zaidan, H. A. Rasheed, "Modeling of insulated CFRP-strengthened reinforced concrete T Beams", *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 12, pp. 3072-3079, Dezembro, 2009.
- [5.2] B. Williams, V. Kodur, M. F. Green, L. Bisby, "Fire Endurance of Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete T-Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 1, pp. 60-67, Janeiro 2008.
- [5.3] ANSYS, Finite element computer code, Version 11, Canonsburg, 2007.
- [5.4] S. Kumahara, Y. Masuda, Y. Tanano, "Tensile strength of continuous fiber bar under high temperature", *International symposium on fiber-reinforced plastic reinforcement for concrete structures*, SP-138, pp. 731-742, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1993.
- [5.5] N. Wang, J. T. Evans, "Collapse of continuous fiber composite beam at elevated temperatures", *Composites*, Vol. 26, No. 1, pp.56-61, 1995.
- [5.6] H. Varastehpour, P. Hamelin, "Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics", *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 197, pp. 160-166, 1997.
- [5.7] V. Kodur, M.F. Green, L. A. Bisby, "Modeling the behavior of FRP-Strengthened reinforced concrete columns", *Structures in Fire*, NRCC-47027, pp. 1-15, 2004.
- [5.8] L. A. Bisby, "Fire behavior of fiber-reinforced polymer reinforced or confined concrete", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Queen's University; 371 p., Kingston, Canada, 2003.
- [5.9] L. A. Bisby, M. F. Green, V. Kodur, "Modeling the behaviour of FRP-confined concrete columns exposed to fire", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 1, pp.15-24, 2005.
- [5.10] S. M. Cramer, O.M. Friday, R.H. Whiteb, G. Sriprutkiat, "Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures", *Proceedings of Fire and Materials 2003 Conference*, pp. 27-42, San Francisco, 2003.
- [5.11] C.A. Griffis, R. A. Masmura, C.I. Chang, "Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating" *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 427-442, 1981.
- [5.12] ASTM E119, "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials", ASTM International, 22 pp., West Conshohocken, 2002.
- [5.13] NP EN 1991-1-2, "Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções em estruturas expostas ao fogo", IPQ, Lisboa, 2010.
- [5.14] S. Cabral Fonseca, "Durabilidade de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras usados na reabilitação de estruturas de betão", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química, Universidade do Minho, 2008.
- [5.15] J. R. Miller, P. M. Weaver, "Temperature profiles in composite plates subject to time-dependent complex boundary conditions", *Composites Structures*, Vol. 59, No. 2, pp.267-278, 2003.
- [5.16] J. A. Milke, A. J. Vizzini, "Thermal response of fire-exposed composites", *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 145-151, 1991.

- [5.17] Y. bay, T. Keller, J. R. Correia, F. A. Branco, J. G. Ferreira, "Fire protection systems for building floors made of pultruded CFRP profiles - Part2: Modeling of thermomechanical responses", Composites: Part B, Vol. 41, No. 8, pp.630-636, 2010.
- [5.18] J. R. Correia, "GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [5.19] TRIA, "Protecção passiva de estruturas metálicas", Especificações Técnicas, 2001.
- [5.20] J.M. Mimoso, "Transmissão de calor: Bases teóricas para aplicação à Térmica de Edifícios", Informação Técnica de Edifícios, LNEC, Lisboa, 1987.
- [5.21] M. Looyeh, K. Rados, P. Bettess, "Thermochemical responses of sandwich panels to fire", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, No. 11, pp. 913-927, 2001.
- [5.22] A. F. Mills, "Basic Heat & Mass Transfer", Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [5.23] ANSYS® Academic Research, Release 11.0, Help System, Elements Reference, ANSYS, Inc.
- [5.24] NP EN 1991-1-2, "Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções em estruturas expostas ao fogo", IPQ, Lisboa, 2010.
- [5.25] C. Tracy, "Fire endurance of multicellular panels in an FRP building system", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [5.26] ISO 834, "Fire resistance tests. Elements of building construction", International Standards Organization, Genève, 1975.

6. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

6.1. Conclusões do trabalho realizado

Nas duas últimas décadas a utilização de materiais CFRP no reforço de estruturas de betão armado registou um aumento considerável, sobretudo devido às vantagens que apresentam em relação aos materiais tradicionais, em particular face ao aço. Estas vantagens, incluem a elevada resistência à tracção, a reduzida massa volémica, a elevada resistência à corrosão e à fadiga e a facilidade de transporte e de aplicação. Contudo, os sistemas de reforço que recorrem a estes materiais compósitos apresentam alguns inconvenientes que, até este momento, impedem que constituam uma alternativa incontestável face às técnicas tradicionais. De entre os inconvenientes referidos ao longo do documento, destaca-se a susceptibilidade destes materiais a temperaturas elevadas. De facto, este aspecto é um dos principais motivos pelo qual este tipo de sistemas não apresenta uma maior expressão no reforço de estruturas de edifícios, onde o incêndio constitui uma acção de projecto. Tal como referido, é reconhecido internacionalmente que este tema carece de uma investigação mais aprofundada, sendo necessário identificar quais as metodologias mais adequadas para melhorar o comportamento dos sistemas de reforço com CFRP ao fogo. Este foi o principal aspecto que motivou o desenvolvimento da presente dissertação.

O estudo bibliográfico realizado permitiu compreender a importância da adopção de medidas que melhorem o desempenho de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP ao fogo, nomeadamente a utilização de materiais de protecção. Nesse estudo, verificou-se que as propriedades físicas e mecânicas de todos os materiais que constituem esse tipo de estruturas são afectadas negativamente pelo aumento da temperatura. No entanto, os materiais dos sistemas de reforço (compósitos de CFRP e adesivo de colagem) destacam-se dos restantes (betão e aço) pela maior susceptibilidade a temperaturas elevadas. Quando a temperatura atinge a valor que caracteriza o fenómeno de transição vítreo destes materiais, que se situa, geralmente, entre 50°C e 140°C, verifica-se a passagem de um estado vítreo para um estado viscoso. A esta transformação está associada uma redução considerável nas propriedades mecânicas e uma consequente perda de resistência do sistema de reforço, o que pode colocar em risco a própria segurança da estrutura. Usualmente, a temperatura de transição vítreo da resina de colagem é inferior à do CFRP, sendo, por isso, aquele material o principal responsável pela perda de eficácia do reforço. Essa situação foi verificada nos ensaios de DMA realizados a provetes do adesivo e do laminado de CFRP utilizados no reforço das vigas estudadas, tendo-se obtido, respectivamente, temperaturas de transição vítreo de 54°C e 138°C. Foram ainda realizados ensaios DSC/TGA, que permitiram concluir que a temperatura de decomposição de ambos os materiais é aproximadamente 380°C. No estudo bibliográfico verificou-se que para temperaturas próximas da temperatura de decomposição as propriedades resistentes do adesivo e do CFRP são praticamente nulas (principalmente no adesivo).

Os objectivos principais da campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação foram o estudo do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP e a avaliação da eficácia da utilização de dois sistemas de protecção ao fogo. Nesse sentido, 5 vigas reforçadas à flexão foram expostas à acção do incêndio padrão definido na norma ISO 834 apenas na sua face inferior, enquanto lhes era aplicado um carregamento típico de condições de serviço. Foi tomada a opção de não expor directamente as zonas de extremidade do laminado à acção do incêndio (protegidas pelas paredes do forno numa extensão de cerca de 20 cm), por se ter verificado noutro estudo (embora accidentalmente) que aquele tipo de protecção conduz a um tempo de resistência ao fogo superior ao de uma situação em que toda a extensão do reforço estava exposta ao calor. Em 4 das 5 vigas referidas foram aplicados sistemas protecção ao fogo, constituídos por placas de silicato de cálcio ou argamassa à base de vermiculite e perlite, ambos em espessuras de 25 mm ou 40 mm. O ensaio de resistência ao fogo à viga sem sistema de protecção (viga CFRP) revelou, tal como era esperado, a susceptibilidade do sistema de reforço a temperaturas

elevadas, pois a sua rotura ocorreu fim de apenas 23 minutos de exposição. Nesse ensaio, na zona central da viga, foram registadas temperaturas superiores ao valor da temperatura de decomposição da resina e do laminado de CFRP. Concluiu-se que na zona central da viga a ligação entre o laminado e o betão foi destruída ao fim de poucos minutos, o mesmo não tendo ocorrido nas extremidades do laminado, onde o isolamento conferido pelas paredes do forno permitiu que as propriedades da ligação betão-CFRP permanecessem praticamente inalteradas. A partir daquele instante, o laminado passou a funcionar como um “tirante”, com as suas extremidades fixas através da aderência ao betão. Com o aumento das temperaturas na viga, as suas propriedades de rigidez e resistência foram diminuindo. Previsivelmente, registaram-se incrementos no deslocamento a meio vão, que resultaram num aumento da deformação do laminado e, em consequência, num acréscimo da força de tração no laminado e das tensões de corte na amarração. A rotura do reforço ocorreu quando essas tensões igualaram a tensão resistente do betão ao corte.

Nos ensaios às vigas reforçadas em que se aplicaram sistemas de protecção, o mecanismo de rotura do reforço foi idêntico ao verificado na viga CFRP. No entanto, a presença de materiais com características isolantes na face inferior das vigas impediu que a taxa de aumento das temperaturas fosse tão elevada como a registada na viga não protegida. Consequentemente, o tempo até à rotura do reforço foi consideravelmente superior. Além disso, as temperaturas máximas atingidas no reforço, embora superiores à temperatura de transição vítreia do adesivo de colagem, não ultrapassaram o valor que define o fenómeno da sua decomposição térmica. Relativamente aos sistemas de protecção, verificou-se que a argamassa à base de vermiculite e perlite apresenta uma eficácia superior à das placas de silicato de cálcio com a mesma espessura, uma vez que proporcionou um tempo de protecção do reforço mais elevado (89 minutos contra 60 minutos nos sistemas com 25 mm de espessura e 167 minutos contra 137 minutos nos sistemas com 40 mm de espessura).

A realização destes ensaios de resistência ao fogo mostrou que é possível tirar partido da resistência do sistema de reforço mesmo quando em grande parte da sua extensão se atingem temperaturas superiores à temperatura de transição vítreia do adesivo de colagem. De facto, os regulamentos relativos ao dimensionamento deste tipo reforços referem que apenas se deve considerar a contribuição do reforço para a resistência de um determinado elemento até ao instante em que se atinge a temperatura de transição vítreia. Os ensaios realizados permitiram concluir que essa temperatura representa um limite demasiado conservativo quando na zona de amarração se adoptam medidas de protecção adicionais. Além disso, mostrou-se que a adopção de sistemas de protecção ao fogo constituídos por placas de silicato de cálcio ou por argamassa à base de vermiculite e perlite permitiram que fossem respeitadas as exigências presentes na regulamentação nacional actualmente em vigor, tendo-se obtido as classificações REI60 e REI120 para as vigas com sistemas de protecção de 25 e 40 mm de espessura, respectivamente.

A análise realizada no presente trabalho foi complementada com o estudo numérico termoquímico, onde se simulou a evolução das temperaturas nas secções-tipo das vigas ensaiadas quando expostas ao incêndio padrão da norma ISO 834. Apesar de a maioria das variações das propriedades termofísicas dos materiais terem sido obtidas através de dados bibliográficos, observou-se uma concordância assinalável entre os resultados numéricos e os experimentais, tal como mostram os erros médios globais associados aos modelos elaborados, variáveis entre 12% e 21%. Verificou-se que nas vigas com sistemas de protecção ao fogo o melhor ajuste aos resultados experimentais foi obtido nos modelos em que se impôs directamente a temperatura do incêndio padrão nos nós da face quente da viga, enquanto que nas restantes vigas se obteve melhor concordância quando foram explicitamente consideradas as trocas de calor por convecção e radiação nessa face.

Os modelos numéricos termoquímicos elaborados, apesar de simularem apenas a evolução bidimensional das temperaturas, constituem uma ferramenta bastante útil quando se pretende avaliar o desempenho de várias combinações de espessuras e materiais de protecção, com vista ao desenvolvimento de novos sistemas de protecção ao fogo para vigas de betão armado reforçadas com CFRP.

Terminado o presente trabalho, pode concluir-se que, em geral, os seus objectivos foram alcançados. Tal como referido anteriormente, o incumprimento das exigências regulamentares relativas à resistência ao fogo, tem sido um dos principais motivos pelo qual os sistemas de reforço com CFRP não apresentam uma maior expressão. O trabalho apresentado mostra que, mediante a adopção de medidas de protecção adequadas, é possível que vigas de betão armado reforçadas com CFRP apresentem um tempo de resistência ao fogo compatível com a sua utilização em elementos estruturais de edifícios.

6.2. Perspectivas de desenvolvimentos futuros

No ponto anterior foram apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido. No entanto, foram levantados alguns aspectos que, se forem investigados com maior profundidade, poderão contribuir para uma melhor compreensão do comportamento ao fogo de elementos de betão armado reforçados com materiais CFRP e para o desenvolvimento de sistemas de protecção mais eficazes, tornado este tipo de sistemas ainda mais competitivos face aos métodos tradicionais de reforço de estruturas de betão. Neste ponto do documento apresentam-se alguns aspectos específicos que podem ser considerados em desenvolvimentos futuros, bem como um conjunto de matérias que neste momento carecem de estudos aprofundados.

- Estudos experimentais semelhantes aos apresentados neste documento, incluindo a instrumentação de todas as vigas com termopares nas zonas de amarração do reforço (como efectuado na viga SC40) e no interior do sistema de protecção ao fogo. Tal como se concluiu anteriormente, o comportamento ao fogo da zona de amarração tem uma grande influência no desempenho de todo o reforço, pelo que a instrumentação desta zona poderá ajudar a compreender o seu mecanismo de rotura quando exposta a temperaturas elevadas. A colocação de termopares no interior do sistema de protecção tem igualmente bastante interesse, pois permite avaliar a perda de eficácia do sistema ao longo do tempo de exposição ao incêndio;
- Estudos experimentais que permitam compreender o comportamento da ligação betão-CFRP quando exposta ao fogo, nomeadamente através da realização de ensaios de aderência a temperaturas elevadas;
- Estudo do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP com fixação mecânica das extremidades do reforço e utilização simultânea de sistemas de protecção ao fogo;
- Estudo do comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP colados com adesivo de base cimentícia. Este tipo de adesivo, apesar de apresentar um desempenho mecânico inferior ao do adesivo à base de resina epóxida, apresenta melhor comportamento a temperaturas elevadas;
- Estudos experimentais sobre o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos em rasgos no betão de recobrimento (técnica NSM). Esta técnica permite maior resistência a fenómenos de descolamento/arrancamento do CFRP, pela existência da dupla área de colagem do laminado e por este se encontrar confinado. Além disso, o facto do sistema de reforço estar inserido em rasgos no betão confere-lhe uma protecção adicional ao fogo;
- Desenvolvimento de novos sistemas de protecção ao fogo que permitam minimizar a espessura necessária para garantir a resistência ao fogo exigida, e que sejam,

simultaneamente, fáceis de aplicar sobre os elementos de betão armado reforçados com CFRP;

- Elaboração de modelos numéricos tridimensionais termoquímicos e termomecânicos que simulem o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com CFRP, colados exteriormente ou inseridos em rasgos, considerando a evolução do comportamento da ligação betão-CFRP com a temperatura, para secções arbitrárias e vários tipos de sistemas de protecção ao fogo, e que permitam prever o tempo de resistência ao fogo;
- Determinação experimental da variação das propriedades termoquímicas, termofísicas e termomecânicas dos materiais que constituem as vigas de betão armado reforçadas com CFRP. A variação destas propriedades com a temperatura será útil no desenvolvimento dos modelos numéricos referidos no item anterior;
- Realização de ensaios de reacção ao fogo em provetes de CFRP com e sem protecção ao fogo, tendo por objectivo determinar as propriedades de reacção ao fogo do material de CFRP, tais como, a taxa de libertação de calor, a massa remanescente, o calor efectivo de combustão, a área específica de extinção (produção de fumo) e a libertação de gases tóxicos.

A realização dos estudos supracitados contribuirá para um considerável avanço do conhecimento sobre o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com CFRP, permitindo estabelecer um conjunto de medidas que garantam o desempenho exigido pelos diversos regulamentos internacionais.

Anexos

Anexo I. Massa dos provetes de betão ensaiados aos 54, 74 e 116 dias

Tabela I.1. Massa dos provetes de betão ensaiados aos 54, 74 e 116 dias.

Provete	Massa dos cubos [g]			Massa dos cilindros [g]
	54 dias	74 dias	116 dias	
1	7767.3	7939.4	7793.8	12388.1
2	7729.6	7920.4	7815.9	12293.5
3	7882.8	7947.1	7912.6	12174.7
4	7909.8	7875.3	7955.5	12206.8
5	7919.2	7887.7	7921.7	-
6	-	-	7898.2	-
7	-	-	7867.9	-
8	-	-	7867.7	-
9	-	-	7888.2	-

Anexo II.1 Cálculos justificativos do dimensionamento da viga VA

Neste anexo apresentam-se os resultados das principais verificações de segurança efectuadas à viga VA, tendo por objectivo a confirmação do dimensionamento apresentado nas figuras 4.19 e 4.20. A informação contida no ponto 4.4.1.1, é aqui complementada com os respectivos cálculos justificativos.

A primeira verificação consistiu em calcular a armadura mínima de flexão ($A_{s,min}$), especificada no Eurocódigo 2, a fim de a comparar com a armadura adoptada. Esta verificação é dada pela expressão II.1,

$$A_{s,min} = 0.26 \times \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \times b \times d \quad (\text{II.1})$$

onde,

- b – largura da secção;
- d – altura útil da secção de betão armado.

O resultado obtido após aplicação da expressão II.1 está presente na tabela II.1, onde também se indicam os valores de todos os parâmetros utilizados no cálculo. Por observação da referida tabela conclui-se que a armadura de flexão adoptada é superior à mínima.

Tabela II.1. Armadura mínima de flexão e parâmetros utilizados no seu cálculo.

Parâmetro	Valor
f_{ctm} [MPa]	2.15
f_{yk} [MPa]	400
b [m]	0.10
d [m]	0.102
$A_{s,min}$ [cm ²]	0.14
$A_{s,adoptado}$ [cm ²]	0.57

Na tabela II.2 indicam-se os momentos flectores resistentes, considerando os valores de cálculo ($M_{rd,VA}$) e médios ($M_{rm,VA}$) das propriedades dos materiais, bem como todos os parâmetros necessários para a sua determinação, incluindo a percentagem mecânica de armadura (w) e o momento fletor reduzido (μ). É de referir que os cálculos foram efectuados com recurso a tabelas de betão armado [4.14], tendo em conta a contribuição da armadura de compressão.

Tabela II.2. Momento fletor resistente e parâmetros relevantes para o seu cálculo.

Cálculos com valores de dimensionamento das propriedades dos materiais		Cálculos com valores médios das propriedades dos materiais	
d [m]	0.102	d [m]	0.102
b [m]	0.10	b [m]	0.10
A_s tracção [cm ²]	0.57	A_s tracção [cm ²]	0.57
A_s compressão [cm ²]	0.57	A_s compressão [cm ²]	0.57
$f_{cd,cilindros}$ [MPa]	15.30	$f_{cm,cilindros}$ [MPa]	25.72
f_{yd} [MPa]	348	f_{um} [MPa]	582
w [-]	0.126	w [-]	0.125
μ [-]	0.12	μ [-]	0.12
$M_{rd,VA}$ [kN.m]	1.91	$M_{rm,VA}$ [kN.m]	3.21

Relativamente às verificações de segurança que envolvem o esforço transverso, adoptou-se igualmente a filosofia sugerida no Eurocódigo 2, em que área mínima de armadura resistente ao esforço transverso $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$ é dada pela expressão II.2,

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = 0.08 \times b \times \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (II.2)$$

Aplicando a expressão II.2 às dimensões da secção da viga e aos materiais utilizados obteve-se uma área de $0.96 \text{ cm}^2/\text{m}$, bastante inferior aos $6.54 \text{ cm}^2/\text{m}$ da armadura adoptada.

O esforço transverso resistente de dimensionamento é obtido através da expressão II.3,

$$V_{Rd,VA} = \min \begin{cases} \frac{A_{sw}}{s} \times 0.9 \times d \times \cotg \theta \times f_{yd} \\ b \times 0.9 \times d \times \sin \theta \times \cos \theta \times \left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right] \times f_{cd} \end{cases} \quad (II.3)$$

em que,

- θ – ângulo das bielas de compressão, que se considerou ser de 30° .

Na tabela II.3 apresenta-se o valor do esforço transverso resistente, considerando os valores de cálculo ($V_{rd,VA}$) e médios ($V_{rm,VA}$) das propriedades dos materiais, bem como todos os parâmetros necessários para a sua determinação.

Tabela II.3. Esforço transverso resistente e parâmetros relevantes para o seu cálculo.

Cálculos com valores de dimensionamento das propriedades dos materiais		Cálculos com valores médios das propriedades dos materiais	
d [m]	0.102	d [m]	0.102
b [m]	0.10	b [m]	0.10
$A_{sw}/s [\text{cm}^2/\text{m}]$	6.54	$A_{sw}/s [\text{cm}^2/\text{m}]$	6.54
$f_{ck,cilindros} [\text{MPa}]$	22.89	$f_{cm,cilindros} [\text{MPa}]$	25.72
$f_{cd,cilindros} [\text{MPa}]$	15.30	$f_{um} [\text{MPa}]$	582
$f_{yd} [\text{MPa}]$	348	$\theta [^\circ]$	30
$\theta [^\circ]$	30	$V_{rm,VA} [\text{kN}]$	55.0
$V_{rd,VA} [\text{kN}]$	33.1		

Recorrendo aos valores dos esforços resistentes apresentados nas tabelas II.2 e II.3 e aos diagramas de esforços apresentados na figura II.1, obtiveram-se os seguintes valores de cálculo ($P_{rd,VA}$) e médio ($P_{rm,VA}$) para a carga resistente:

- $P_{rd,VA} = 7.64 \text{ kN}$, sendo o modo de rotura por flexão, considerando os valores de dimensionamento das propriedades dos materiais;
- $P_{rm,VA} = 12.84 \text{ kN}$, igualmente com o modo de rotura por flexão, mas considerando os valores médios das propriedades dos materiais.

De referir que o procedimento de cálculo apenas é válido se não for contabilizado o peso próprio da viga. Como este representa, no máximo, cerca de 6% do valor de cálculo da carga de rotura, optou-se por desprezá-lo. Esta simplificação será assumida ao longo de todo o documento.

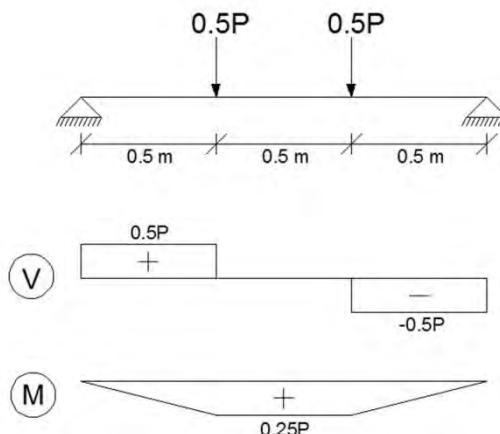


Figura II.1. Diagrama de esforço transverso (ao meio) e de momento fletor (em baixo) para o carregamento indicado.

Em ensaios de resistência mecânica de vigas de betão armado, a carga que provoca a fendilhação da peça (P_{cr}) é um dos valores notáveis. O momento de fendilhação (M_{cr}) é dado pelo produto do módulo de flexão elástico (W_{el}) pelo valor médio da resistência do betão à tracção ($f_{ctm,28dias}$). Para a situação em causa obteve-se $M_{cr,VA} = 0.52 \text{ kN/m}$ e $P_{cr,VA} = 2.06 \text{ kN}$.

No presente programa experimental, a carga a aplicar durante os ensaios de resistência ao fogo surge como um valor de carregamento bastante importante. Segundo a norma ISO 834 [4.14] essa carga deverá corresponder à da combinação quase permanente de ações, que se considerou ser o valor que provoca na viga uma flecha de $L/250$, em que L é o vão livre da viga em metros. Desta forma, foi necessário estimar qual o valor da carga que provoca esse deslocamento ($P_{\delta=L/250}$). Nos parágrafos seguintes procede-se à explicação do procedimento de cálculo adoptado.

Para estimar a carga que provoca a flecha de $L/250$ na viga VA recorreu-se ao método dos coeficientes globais. Dado que nos ensaios experimentais de resistência ao fogo o carregamento actuará, no máximo, durante 4 horas, optou-se por desprezar a parcela de deformação a longo prazo. Desta forma, a flecha instantânea a meio vão da viga (δ_o) é dada pela expressão II.4,

$$\delta_o = k_o \delta_{el} \left(\frac{h}{d} \right)^3 \quad (\text{II.4})$$

em que,

- k_o – coeficiente que entra em consideração com o efeito das armaduras e da fendilhação;
- δ_{el} – flecha elástica da viga a meio vão.

Para o carregamento indicado na figura II.1 e recorrendo ao princípio dos trabalhos virtuais estimou-se a flecha elástica a meio vão da viga (δ_{el}). Deste procedimento obteve-se a expressão II.5,

$$\delta_{el} = \frac{1}{EI} \times \frac{23}{648} \times (0.5P)L^3 \quad (\text{II.5})$$

em que,

- EI – rigidez de flexão elástica da viga;
- P – carga total aplicada (de acordo com a figura II.1);
- L – vão da viga.

Numa primeira fase, foi necessário verificar se, para um deslocamento de $L/250$ (0.006 m), a viga em estudo se encontrará fendilhada. Igualando a expressão II.5 ao deslocamento pretendido obteve-se uma carga (P) de 39.76 kN, superior à carga de fendilhação (2.02 kN). Desta forma, é necessário estimar o parâmetro k_o , pois em peças fendilhadas o seu valor é superior a 1. Este parâmetro foi estimado com recurso a um ábaco [4.14] em que os dados de entrada são a relação entre o momento de fendilhação e o momento actuante (M_D) e o produto entre os valores de α e ρ_s . Refira-se que α representa o quociente entre os módulos de elasticidade do aço das armaduras e do betão (que, para os materiais em questão, é aproximadamente 7), e que ρ_s representa a percentagem de armadura sendo obtida pela expressão II.6,

$$\rho_s = \frac{A_s}{b \times d} \quad (\text{II.6})$$

em que,

- A_s – área de armadura à tracção (ver figura 4.20).

O outro dado necessário à determinação do parâmetro k_o é o valor do quociente entre o momento de fendilhação e o momento actuante. No entanto, como se pretende determinar qual o valor da carga que provoca o deslocamento de $L/250$, não é conhecido ainda qual o momento actuante. Como o referido ábaco apresenta um andamento linear, optou-se por parametrizar um troço, obtendo-se a expressão II.7.

$$k_o = -\frac{4.16}{P} + 3 \quad (\text{II.7})$$

Igualando a expressão II.4 à deformação pretendida e substituindo os parâmetros δ_{el} e k_o pelas equações II.5 e II.7, respectivamente, obteve-se $P_{\delta=L/250,VA} = 9.5$ kN.

Na tabela II.4 resumem-se os valores dos esforços e das cargas, apresentados anteriormente.

Tabela II.4. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VA.

Parâmetro	Valor
$M_{rd,VA}$ [kN.m]	1.91
$M_{rm,VA}$ [kN.m]	3.21
$V_{rd,VA}$ [kN]	33.10
$V_{rm,VA}$ [kN]	55.03
$P_{rd,VA}$ [kN]	7.64
$P_{rm,VA}$ [kN]	12.84
$M_{cr,VA}$ [kN/m]	0.52
$P_{cr,VA}$ [kN]	2.06
$P_{\delta=L/250,VA}$ [kN]	9.50

Pela observação da tabela anterior destaca-se o facto de o valor de cálculo da carga última ($P_{rd,VA}$) ser inferior à estimativa da carga que provoca o deslocamento de $L/250$ ($P_{\delta=L/250,VA}$). Note-se que se considerou a carga para uma combinação de acções quase permanente equivalente a $P_{\delta=L/250,VA}$, situação que não é corrente no dimensionamento de estruturas de betão armado. Tomou-se esta opção por não existir à partida um conjunto de acções actuantes claramente definidas. No entanto, o que este resultado mostra é que, para a viga VA, não é correcto comparar o valor de $P_{\delta=L/250,VA}$ a uma carga de serviço. Assim caso a carga de serviço fosse correctamente definida, a flecha associada seria consideravelmente inferior a $L/250$. Este conjunto de resultados mostra que o estado limite último de flexão foi condicionante no dimensionamento.

Anexo II.2. Cálculos justificativos do dimensionamento da viga VB

Neste ponto apresenta-se um conjunto de cálculos que justificam o dimensionamento da secção dos laminados que irão reforçar à flexão a viga de betão armado. A pormenorização de armaduras, idêntica à da viga VA, é a indicada nas figuras II.2 e II.3.

No procedimento de cálculo foram seguidas, simultaneamente, recomendações sugeridas pelo ACI 440.2R-08 [4.16], pelo Bulletin 14 da fib [4.17], pelas especificações do fabricante dos laminados[4.18], pelo Eurocódigo 2 no que refere às verificações relacionadas com o esforço transverso e pelo manual produzido por Bank [4.19]. O critério de dimensionamento adoptado foi o da flecha máxima, tendo sido considerado o valor de L/250 para a “carga de serviço”, de acordo com o especificada no documento normativo ISO 834 [4.14]. No entanto, devido a limitações na oferta do fabricante, optou-se que impor uma dada secção de laminado e, com essa, estimar a carga que seria necessário aplicar para se obter a deformação pretendida. Posteriormente foi efectuado um conjunto de verificações, ao estado limite último e em serviço, que permitiram validar o dimensionamento efectuado.

O laminado adoptado, cujas propriedades mecânicas estão definidas no ponto 4.2.2, apresenta uma secção de 50 mm × 1.2 mm e tem a denominação comercial de S&P CFK Laminates CFK 150/2000-50/1.2. As propriedades da resina de colagem estão definidas em 4.2.3. O comprimento do laminado é de 1.35 m, coincidente com a largura do forno onde serão realizados os ensaios de resistência ao fogo. Refira-se que o critério de escolha do comprimento do laminado está relacionado com o comportamento das vigas ao fogo, aspecto esse que foi aprofundado no ponto 4.5. Nas figuras II.2 e II.3 apresentam-se, respectivamente, um corte longitudinal da viga VB e a pormenorização da secção de meio vão.

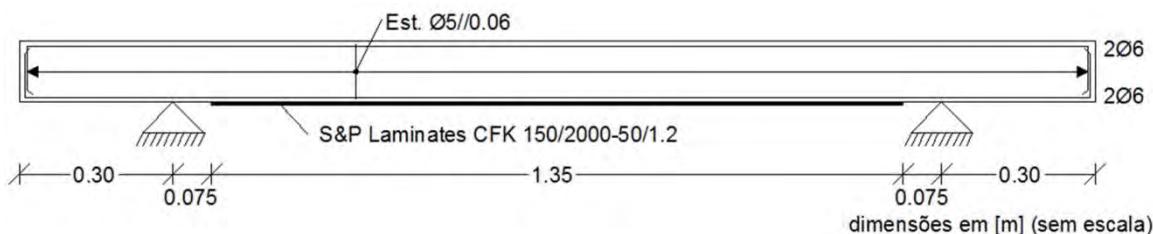


Figura II.2. Corte longitudinal da viga VB.

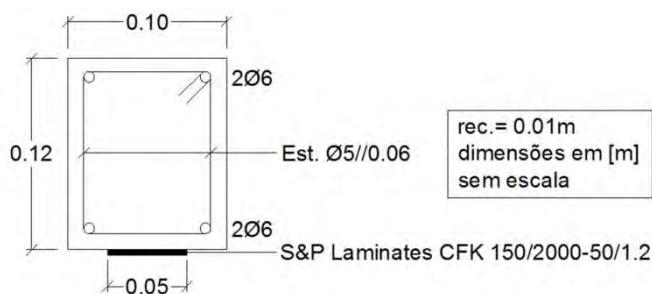


Figura II.3. Pormenorização da secção de meio vão da viga VB.

O valor da flecha a meio vão, quando sujeita ao carregamento indicado na figura II.1, é obtido a partir da expressão II.5. No entanto, como a viga VB se encontra reforçada à flexão com um laminado de carbono, o cálculo da rigidez de flexão da secção composta em estado fendilhado (EI_2) carece de

especial atenção. Neste aspecto foi seguida a sugestão presente no manual de Bank [4.19], em que este parâmetro pode ser calculado através das expressões II.8 a II.14,

$$(EI)_2 = \sum EI = E_c \frac{b(c_2)^3}{3} + E_s A_s (d - c_2)^2 + E_f A_f (h - c_2)^2 \quad (\text{II.8})$$

$$c_2 = k_2 d \quad (\text{II.9}) \qquad k_2 = \sqrt{\left(\rho_{s_s} + \rho_{f_f}\right)^2 + 2\left(\rho_{s_s} + \rho_{f_f} \frac{h_f}{d}\right) - \left(\rho_{s_s} + \rho_{f_f}\right)} \quad (\text{II.10})$$

$$\rho_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (\text{II.11}) \qquad \rho_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (\text{II.12}) \qquad \rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (\text{II.13}) \qquad \rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (\text{II.14})$$

em que:

- k_2 – factor que relaciona a altura útil da secção com a distância da face superior à linha neutra;
- ρ_f – percentagem de reforço;
- ρ_s – factor que relaciona o módulo de elasticidade do aço com o do betão;
- ρ_f – factor que relaciona o módulo de elasticidade do laminado com o do betão.

Na figura II.4 ilustra-se o significado físico dos parâmetros presentes nas expressões anteriores que até este ponto ainda não tinham sido definidos.

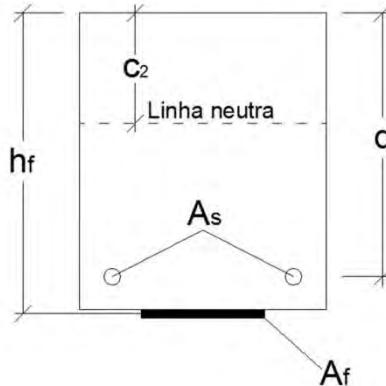


Figura II.4. Secção genérica de uma viga reforçada à flexão com CFRP e definição de diversos parâmetros.

Na tabela II.5 apresenta-se o valor obtido para a rigidez de flexão da secção composta em estado fendilhado, bem como o conjunto de resultados intermédios que possibilitaram o seu cálculo. Refira-se que apenas se contabilizou a área de armadura sujeita a tracção (indicada na figura II.4) perante o carregamento em questão. Foram utilizadas as propriedades do betão aos 28 dias.

Tabela II.5. Rigidez de flexão da secção composta e parâmetros relevantes para o seu cálculo.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
ρ_s [-]	7.12	ρ_f [%]	0.59
ρ_f [-]	5.87	k_2 [-]	0.33
ρ_s [%]	0.55	c_2 [m]	0.034
$(EI)_2$ [kN.m ²]			163.36

Igualando a expressão II.5 ao valor de 0.006 m ($L/250$), e recorrendo ao valor da rigidez de flexão indicada na tabela II.5, obteve-se $P_{\delta=L/250,VB} = 16.36 \text{ kN}$. Este procedimento de cálculo considera que a rigidez de flexão é constante ao longo de toda a viga, o que não se verifica na realidade. No entanto, assumiu-se como válida essa simplificação.

Relativamente ao comportamento em serviço da viga reforçada, o regulamento ACI 440.2R-08 [4.16] recomenda que a tensão na armadura ordinária deverá ser inferior a 85% da sua tensão de cedência, a tensão de compressão no betão inferior a 45% da sua tensão resistente e a tensão no CFRP inferior a 55% do valor de σ_{fu} . Em virtude do critério de dimensionamento do sistema de reforço ter sido o da flecha admissível, verificou-se, posteriormente, que tal opção não permitiu que as duas primeiras recomendações fossem respeitadas. Para a carga que provoca a flecha de $L/250$ estima-se que a tensão de tracção nas armaduras atinja 340.0 MPa, sendo a tensão de compressão no betão de 23.9 MPa e a de tracção no laminado de CFRP de 335.0 MPa. No entanto, refira-se que não é totalmente correcto afirmar que o valor de $P_{\delta=L/250,VB}$ corresponde a uma situação de serviço, dado que não foram definidas acções. Assim, para a situação em causa, considera-se que a não verificação de tal critério não adquire uma grande relevância.

A verificação da segurança ao estado limite último de flexão foi efectuada com recurso ao método do diagrama rectangular simplificado (MDRS) e às recomendações presentes no ACI 440.2R-08 [4.16]. Na figura II.5 apresentam-se os diagramas de extensões e tensões duma secção genérica sujeita a flexão simples, com a nomenclatura utilizada no procedimento de cálculo. Refira-se que se o reforço foi aplicado na ausência de cargas aplicadas na viga, pelo que não existe qualquer deformação inicial na secção.

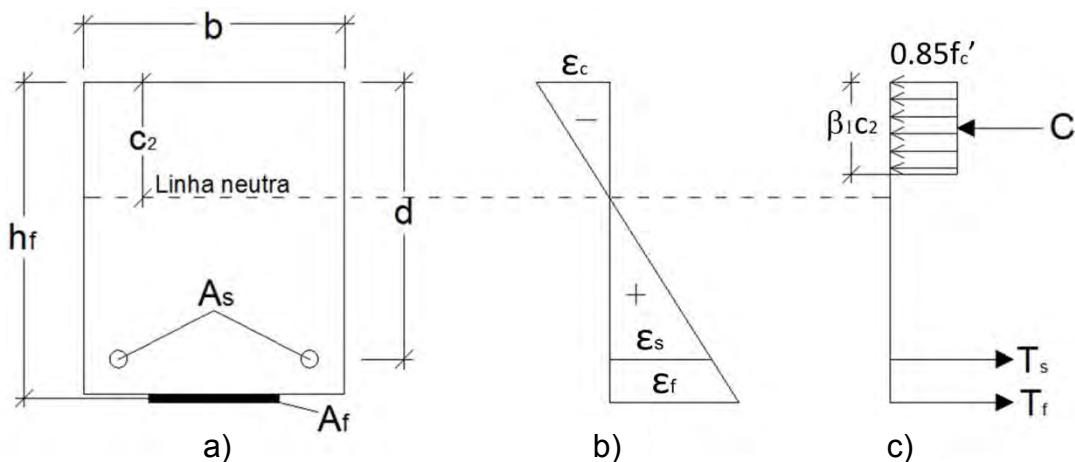


Figura II.5. Secção de meio vão da viga a), diagrama de extensões b) e de tensões c) em estado limite último.

Segundo o ACI 440.2R-08 [4.16], o valor do momento resistente de dimensionamento ($M_{rd,VB}$) pode ser obtido a partir da expressão II.15,

$$M_{rd,VB} = \emptyset \left[A_s f_{yk} \left(d - \frac{\beta_1 c_2}{2} \right) + f_A \sigma_{fd} \left(h_f - \frac{\beta_1 c_2}{2} \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

em que,

- \emptyset – factor de redução que depende da ductilidade da secção, dado pela expressão II.16;
- β_1 – coeficiente que toma o valor de 0.85 para betões com resistência à compressão até 35 MPa;
- f – factor de redução da capacidade mecânica do CFRP, tomado o valor recomendado de 0.85;

- σ_{fd} – tensão normal de cálculo do sistema de reforço, dada por $E_f \times \varepsilon_{fu}$ (valores apresentados na tabela 4.7).

$$\emptyset = \begin{cases} 0.9 & \text{para } \varepsilon_s > 5\% \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{syk} \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{syk})}{0.005 - \varepsilon_{syk}} & \text{para } 5\% > \varepsilon_s > \varepsilon_{syk} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Para aplicar a expressão II.15 é necessário, para um dado mecanismo de rotura, determinar previamente a posição da linha neutra através do equilíbrio entre a força resultante das tensões de compressão no betão (C) e a soma das forças resultantes das tensões de tracção na armadura ordinária (T_s) e no CFRP (T_f). De referir que para que o cálculo seja válido, é igualmente necessário confirmar a ocorrência do mecanismo de rotura considerado.

Assumindo um mecanismo de rotura por flexão com esmagamento do betão após a cedência das armaduras, as forças resultantes C , T_s e T_f são dadas pelas seguintes expressões:

$$C = 0.85f'_c \beta_1 c_2 b \quad (\text{II.17})$$

$$T_s = A_s f_{yk} \quad (\text{II.18})$$

$$T_f = A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{h_f - c_2}{c_2} \right) \quad (\text{II.19})$$

O parâmetro f'_c foi considerado igual à resistência característica do betão à compressão em cilindros ($f_{ck,cilindros}$) obtido aos 28 dias de idade. Desta forma, foi possível determinar a posição da linha neutra (c_2), cujo valor está apresentado na tabela II.6, tal como os resultados intermédios que possibilitaram a sua obtenção.

Tabela II.6. Posição da linha neutra e parâmetros relevantes para o seu cálculo.

Parâmetro	Valor
T_s [kN]	19.68
ε_f [%]	0.51
T_f [kN]	52.44
C [kN]	72.12
c_2 [m]	0.044

Conhecendo a posição da linha neutra foi possível averiguar a validade do modo de rotura admitido anteriormente. Para isso, calcularam-se as extensões no aço (ε_s) e no laminado (ε_f) com recurso às expressões II.20 e II.21, respectivamente.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d - c_2}{c_2} \right) \quad (\text{II.20})$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h_f - c_2}{c_2} \right) \quad (\text{II.21})$$

Por aplicação das expressões anteriores obteve-se $\varepsilon_s = 4.0\%$ e $\varepsilon_f = 5.3\%$ (o que corresponde a uma tensão no laminado de 842 MPa), pelo que se conclui que em estado limite último de flexão o aço se encontra em cedência e a rotura não ocorre pelo laminado. Desta forma, considera-se como válido o modo de rotura por esmagamento do betão após a cedência do aço. No entanto, como a extensão no aço é inferior o 0.5%, classifica-se a rotura como semi-dúctil [4.16].

Com recurso às expressões II.15 e II.16 obteve-se um momento resistente de dimensionamento $M_{rd,VB} = 5.11$ kN.m. A este momento corresponde uma carga de rotura de dimensionamento $P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4$ kN. Refira-se que $\emptyset = 0.81$.

Com o objectivo de estimar o valor médio do momento resistente da viga ($M_{rm,VB}$), foi seguido o mesmo procedimento de cálculo, considerando agora os valores médios das propriedades dos materiais (f_{ym} em vez de f_{yk} e $f_{cm,cilindros}$ em vez de $f_{ck,cilindros}$) e $\phi = 1$. Obteve-se um momento resistente médio $M_{rm,VB} = 8.07 \text{ kN.m}$, ao qual corresponde a carga de rotura média $P_{rm,VB}^{\text{flexão}} = 32.3 \text{ kN}$.

Em relação à viga VA, prevê-se que o sistema de reforço apresentado nas figuras II.2 e II.3 permita aumentar em 168% o momento resistente, considerando os valores de dimensionamento, e em 151% quanto se utilizam as propriedades médias dos materiais. O regulamento ACI 440.2R-08 [4.16] em vez de fixar uma percentagem máxima para o aumento da capacidade resistente, refere que a viga de betão armado não reforçada deverá resistir a determinadas percentagens das cargas permanente e variável. No presente documento, estes valores não estão definidos, visto o objectivo principal ser a avaliação do comportamento ao fogo de vigas sujeitas a uma carga que provoca a flecha de $L/250$. Ainda assim, é possível afirmar que a taxa de reforço conseguida com o sistema apresentado é bastante elevada.

As verificações de segurança ao estado limite último de esforço transverso são em tudo idênticas às apresentadas no Anexo II.1, em que, recorrendo à expressão II.3, se obtiveram os resultados presentes na tabela II.3.

Tal como efectuado para a viga VA, calculou-se o momento de fendilhação da viga VB ($M_{cr,VB}$) e a respectiva carga ($P_{cr,VB}$). Determinou-se o centro de rigidez da secção reforçada, seguindo-se o cálculo da sua inércia ($I_{\text{total}} = 1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^4$). Recorrendo ao valor da inércia, da tensão resistente do betão à tracção e à distância entre o centro de rigidez e a fibra inferior da secção, calculou-se o momento de fendilhação $M_{cr,VB} = 0.56 \text{ kN.m}$, a que corresponde uma força $P_{cr,VB} = 2.22 \text{ kN}$.

Foram efectuadas verificações que permitiram averiguar a ocorrência de mecanismos de rotura por delaminação/arrancamento. Como o ACI 440.2R-08 [4.16] não apresenta uma formulação explícita para estas verificações, optou-se por recorrer ao Bulletin 14 da fib [4.17].

Para que não ocorra o descolamento do laminado devido a elevadas tensões de corte na ligação CFRP-betão em zonas afastadas da extremidade, o documento da fib recomenda que as seguintes condições sejam respeitadas,

$$\begin{cases} \frac{V}{0.95db_f \left(1 + \frac{A_s E_s}{A_f E_f}\right)} \leq f_{cbd} & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \\ \frac{V}{0.95db_f} \leq f_{cbd} & \text{para } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

em que,

- V – esforço transverso na secção em causa;
- f_{cbd} – tensão de corte resistente do betão, dada pela expressão II.23,

$$f_{cbd} = 1.8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (\text{II.23})$$

em que,

- γ_c – coeficiente minorativo da resistência do betão, de valor 1.5.

A verificação das condições apresentadas na expressão II.22 é possível após ser determinada a secção da viga a partir da qual as armaduras se encontram em cedência, quando esta é sujeita à

carga de dimensionamento ($P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4 \text{ kN}$). A expressão II.24 permite calcular a força de tracção instalada nas armaduras (F_s), numa dada secção sujeita ao par de esforços V e M:

$$F_s = \left(\frac{V}{2} \cotg\theta + \frac{M}{z} \right) \frac{A_s E_s}{A_f E_f + A_s E_s} \quad (\text{II.24})$$

Na expressão anterior o parâmetro z representa o valor do braço entre as resultantes das forças de compressão e tracção, que se considerou igual a 90% da altura útil (d).

Numa secção da viga a uma distância X do apoio (com X menor que 0.5 m), quando esta é sujeita à carga $P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4 \text{ kN}$, o esforço transverso e o momento fletor são dados pelas expressões II.25 e II.26, respectivamente:

$$V = 0.5 \times 20.4 \text{ [kN]} \quad (\text{II.25})$$

$$M = X \times 0.5 \times 20.4 \text{ [kN.m]} \quad (\text{II.26})$$

Introduzindo as expressões II.25 e II.26 em II.24, e igualando-a à força que provoca a cedência das armaduras inferiores da viga, obteve-se a distância $X=0.299 \text{ m}$. Desta forma conclui-se que a uma distância superior a X do apoio, as armaduras encontram-se em cedência. Tal como se pode observar na figura II.2, o diagrama de esforço transverso apresenta um andamento constante entre os apoios e os pontos de aplicação das cargas, pelo que a situação mais desfavorável para a verificação da condição II.22 corresponde a $\epsilon_s \geq \epsilon_{sy}$. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela II.7.

Tabela II.7. Verificação das tensões de aderência betão-CFRP em zonas afastadas da extremidade do laminado (valores de dimensionamento).

Parâmetro	Valor
$V/0.95db_f \text{ [MPa]}$	2.11
$f_{cbd} \text{ [MPa]}$	2.39

Observando a tabela II.7 conclui-se que a condição indicada na expressão II.22 é respeitada, pelo que não se prevê a ocorrência de um modo de rotura por perda de aderência betão-CFRP numa zona afastada da extremidade do laminado. Igualando as tensões resistente e actuante obtém-se que este tipo de rotura ocorreria para uma carga $P_{rd,VB}^{\text{aderência}} = 23.14 \text{ kN}$, superior à estimativa da carga que provoca a rotura por flexão na secção de meio vão ($P_{rd,VB}^{\text{flexão}} = 20.4 \text{ kN}$)

Os resultados apresentados foram obtidos com recurso aos valores de dimensionamento das propriedades dos materiais. De forma a averiguar o que poderá ocorrer no ensaio à viga VB, aplicou-se o anterior procedimento de cálculo para as propriedades médias dos materiais. Na tabela II.8 ilustram-se os respectivos resultados.

Tabela II.8. Verificação das tensões de aderência betão-CFRP em zonas afastadas da extremidade do laminado (valores médios das propriedades dos materiais).

Parâmetro	Valor
$X \text{ [m]}$	0.196
$V \text{ [kN]}$	16.15
$V/0.95db_f \text{ [MPa]}$	3.33
$f_{cbd} \text{ [MPa]}$	3.87

Pela observação da tabela II.8 prevê-se, igualmente, que não ocorra a rotura por perda de aderência betão-CFRP numa zona afastada da extremidade do laminado/ancoragem. Este modo de rotura ocorreria para uma carga $P_{rm,VB}^{aderência} = 37.5 \text{ kN}$, superior à estimativa da carga que provoca a rotura por flexão na secção de meio vão ($P_{rm,VB}^{\text{flexão}} = 32.3 \text{ kN}$).

Por último, recorrendo novamente às recomendações presentes no Bulletin 14 da fib, foi efectuada uma verificação de segurança relativa à zona de extremidade do laminado, na qual se procedeu ao cálculo do comprimento de ancoragem necessário (l_b) para evitar o respectivo descolamento.

Na figura II.6 apresenta-se o diagrama de momentos flectores para o valor de dimensionamento da carga de rotura por flexão ($P_{rd,VB} = 20.4 \text{ kN}$). Nessa figura estão assinalados o valor do momento resistente da viga não reforçada ($M_{rd,VA} = 1.91 \text{ kN.m}$) e as secções notáveis para os cálculos que se seguem.

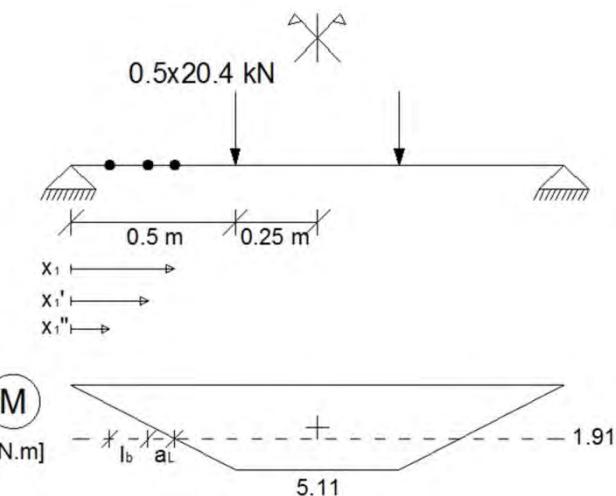


Figura II.6. Diagrama de momentos flectores para a carga de rotura por flexão; identificação das secções notáveis no modelo de cálculo adoptado.

Na figura II.6 a secção X_1 caracteriza-se por coincidir com o ponto onde o diagrama de momento fletor actuante iguala o momento fletor resistente da viga não reforçada (viga VA). As distâncias entre o apoio e as secções X_1' e X_1'' são obtidas a partir das expressões II.27 e II.28, respectivamente,

$$X'_1 = X_1 - a_L \quad (\text{II.27})$$

$$X''_1 = X_1' - l_b \quad (\text{II.28})$$

Em que a_L corresponde à translação do diagrama de momento fletor, que tem em conta as forças de tracção geradas pelo esforço transverso, e é definida pela expressão II.29,

$$a_L = \frac{z}{2} \cot\theta \quad (\text{II.29})$$

Na tabela II.9 apresentam-se as distâncias do apoio às secções X_1 e X_1' , bem com o valor do parâmetro a_L .

Tabela II.9. Definição das secções X_1 e X_1' de acordo com a figura II.6.

Parâmetro	Valor
X_1 [m]	0.187
a_L [m]	0.079
X_1' [m]	0.108

O comprimento de ancoragem necessário (l_b) depende, de entre outros parâmetros, da força de tracção instalada no laminado na secção X_1' ($F_{T,f,X_1'}$). Esta é determinada através da expressão II.30,

$$F_{T,f,X_1'} = \left(\frac{V_{x1'}}{2} \cot g\theta + \frac{M_{x1'}}{z} \right) \frac{A_f E_f}{A_f E_f + A_s E_s} \quad (\text{II.30})$$

em que:

- $V_{x1'}$ – esforço transverso na secção X_1' ;
- $M_{x1'}$ – momento fletor na secção X_1' .

O resultado da aplicação da expressão, bem como os principais parâmetros intervenientes estão apresentados na tabela II.10.

Tabela II.10. Força de tracção actuante no laminado na secção X_1' e principais parâmetros para o seu cálculo.

Parâmetro	Valor
$V_{x1'}$ [kN]	10.20
$M_{x1'}$ [kN.m]	1.10
$F_{T,f,X_1'}$ [kN]	9.72

A formulação presente no documento da *fib* indica que a força resistente máxima na zona de ancoragem ($T_{fa,máx}$) é mobilizada através da adopção do comprimento de amarração máximo ($l_{b,máx}$). Ambos os parâmetros podem ser determinado com recurso às expressões II.31 e II.32,

$$T_{fa,máx} = 0.64 \propto b_f k_b k_c \times \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (\text{II.31})$$

$$l_{b,máx} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} \quad (\text{II.32})$$

em que,

- \propto – factor de redução que tem em conta a influência das fendas de corte na resistência da ligação, tomando o valor de 0.9;
- k_b - factor que tem em conta a geometria da ligação, dado pela expressão II.33 e que varia entre 1.0 e 1.3;
- k_c – factor que tem em conta o estado de compacidade do betão, que se considerou unitário por se estar em condições de laboratório.

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (\text{II.33})$$

Em que,

- b_f e b – são as grandezas definidas anteriormente (em milímetros).
- $b_f/b \geq 0.33$.

No entanto, para um comprimento de ancoragem (l_b) inferior ao valor máximo ($l_{b,máx}$), a força resistente de aderência é dada pela seguinte expressão,

$$T_{fa} = T_{fa,máx} \frac{l_b}{l_{b,máx}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,máx}} \right) \quad (\text{II.34})$$

Igualando a expressão II.34 à força de tracção no laminado na secção X'_1 (F_{T,f,X'_1}) obteve-se o comprimento de ancoragem necessário (l_b). Na tabela II.11 apresenta-se o resultado obtido para l_b , assim como os parâmetros essenciais para a sua determinação.

Tabela II.11. Comprimento de amarração necessário e parâmetros relevantes para o seu cálculo.

Parâmetro	Valor
k_b [-]	1.22
$T_{fa,máx}$ [kN]	22.92
$l_{b,máx}$ [mm]	215
l_b [mm]	52

Com o comprimento de ancoragem necessário ($l_b=52$ mm) é possível calcular a secção de dispensa do laminado (X''_1) através da expressão II.28. Da aplicação desta expressão obteve-se $X''_1 = 56$ mm. Observando a figura II.2, conclui-se que o laminado foi dispensado a 75 mm do apoio. Tal como referido anteriormente, adoptou-se o comprimento de 1.35 m para o laminado apenas para que coincidisse com a dimensão do forno onde vão ser realizados os ensaios de resistência ao fogo. No entanto, em face dos resultados obtidos, conclui-se que tal opção poderá conduzir a um mecanismo de rotura de arrancamento na zona de extremidade do laminado.

Finalmente, na tabela II.12 resumem-se os principais valores dos esforços e das cargas, apresentados nas páginas anteriores.

Tabela II.12. Resumo dos valores notáveis de esforços e carregamento da viga VB.

Parâmetro	Valor
$M_{rd,VB}$ [kN.m]	5.11
$M_{rm,VB}$ [kN.m]	8.07
$V_{rd,VB}$ [kN]	33.10
$V_{rm,VB}$ [kN]	55.70
$P_{rd,VB}^{\text{flexão}}$ [kN]	20.40
$P_{rm,VB}^{\text{flexão}}$ [kN]	32.30
$P_{rd,VB}^{\text{aderência}}$ [kN]	23.14
$P_{rm,VB}^{\text{aderência}}$ [kN]	37.50
$M_{cr,VB}$ [kN/m]	0.56
$P_{cr,VB}$ [kN]	2.22
$P_{\delta=L/250,VB}$ [kN]	16.36

Anexo III. Gráficos extensão-força das vigas de referência

Gráfico 1: Viga VA

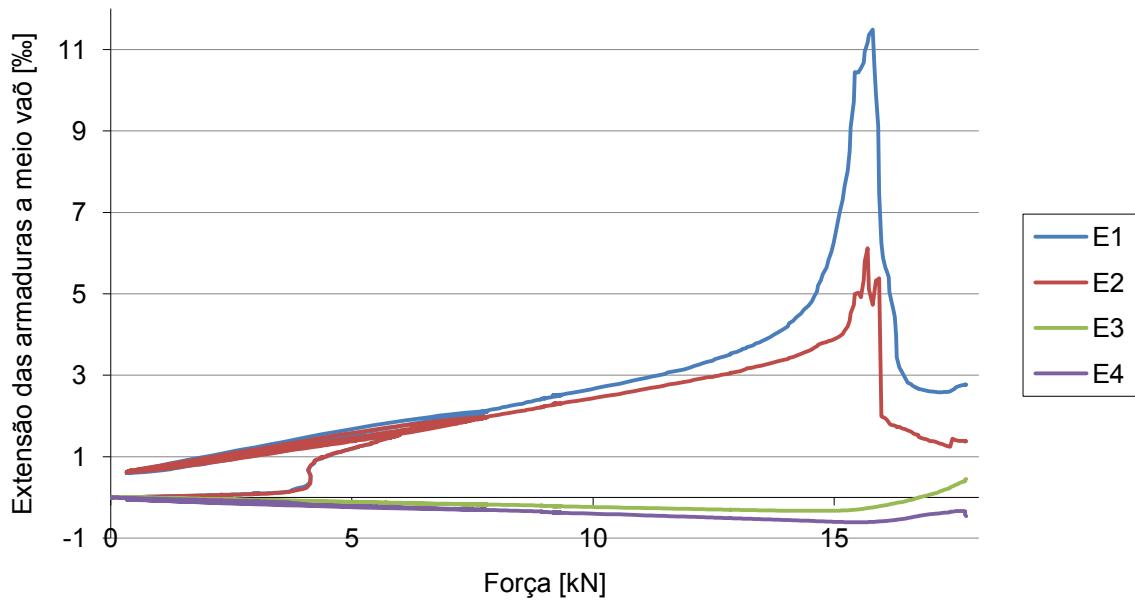
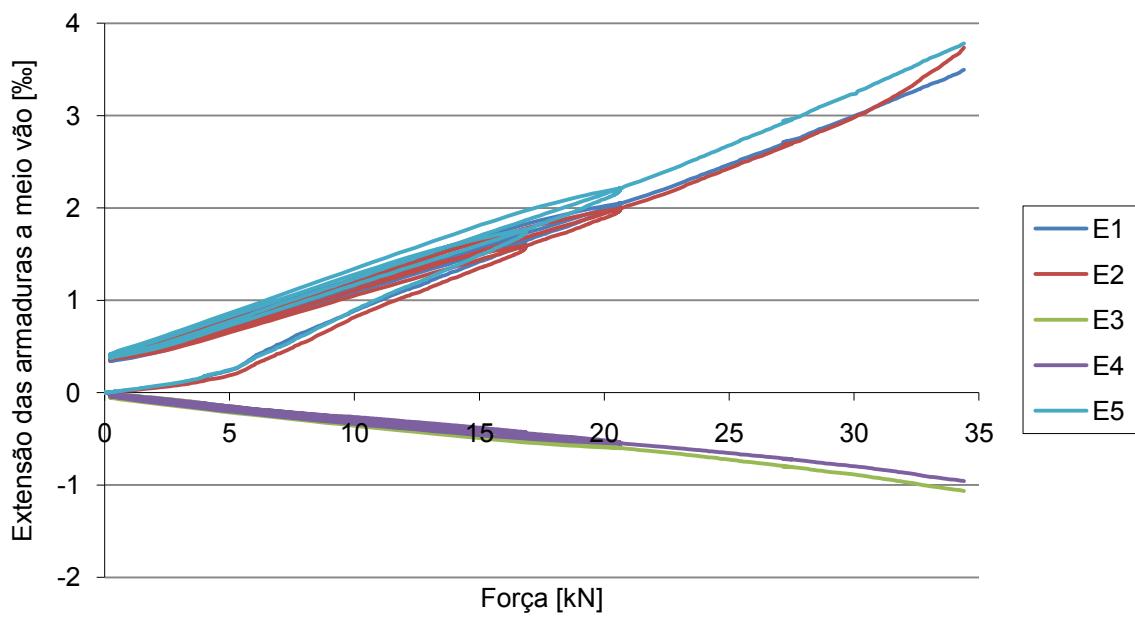
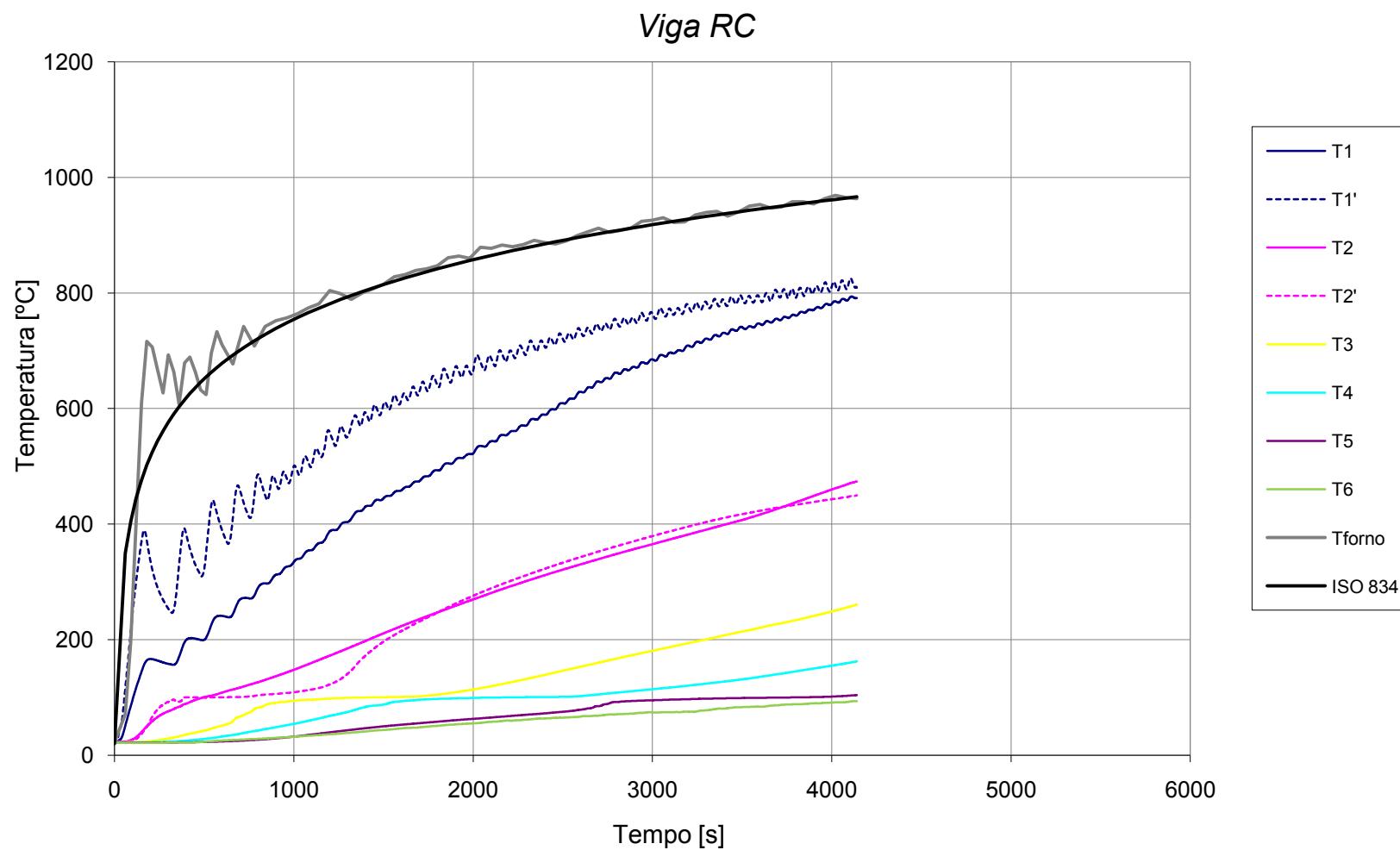


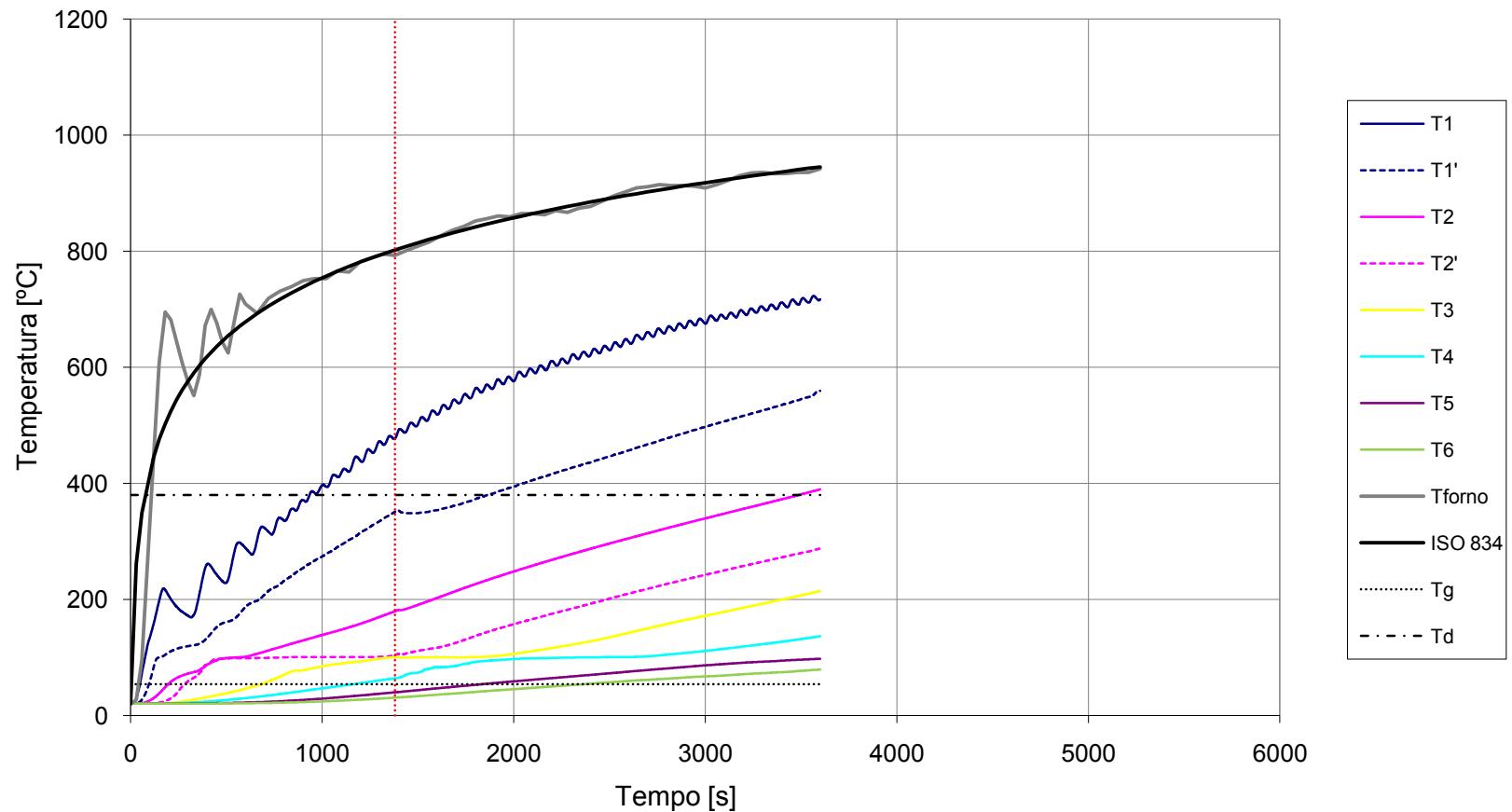
Gráfico 2: Viga VB

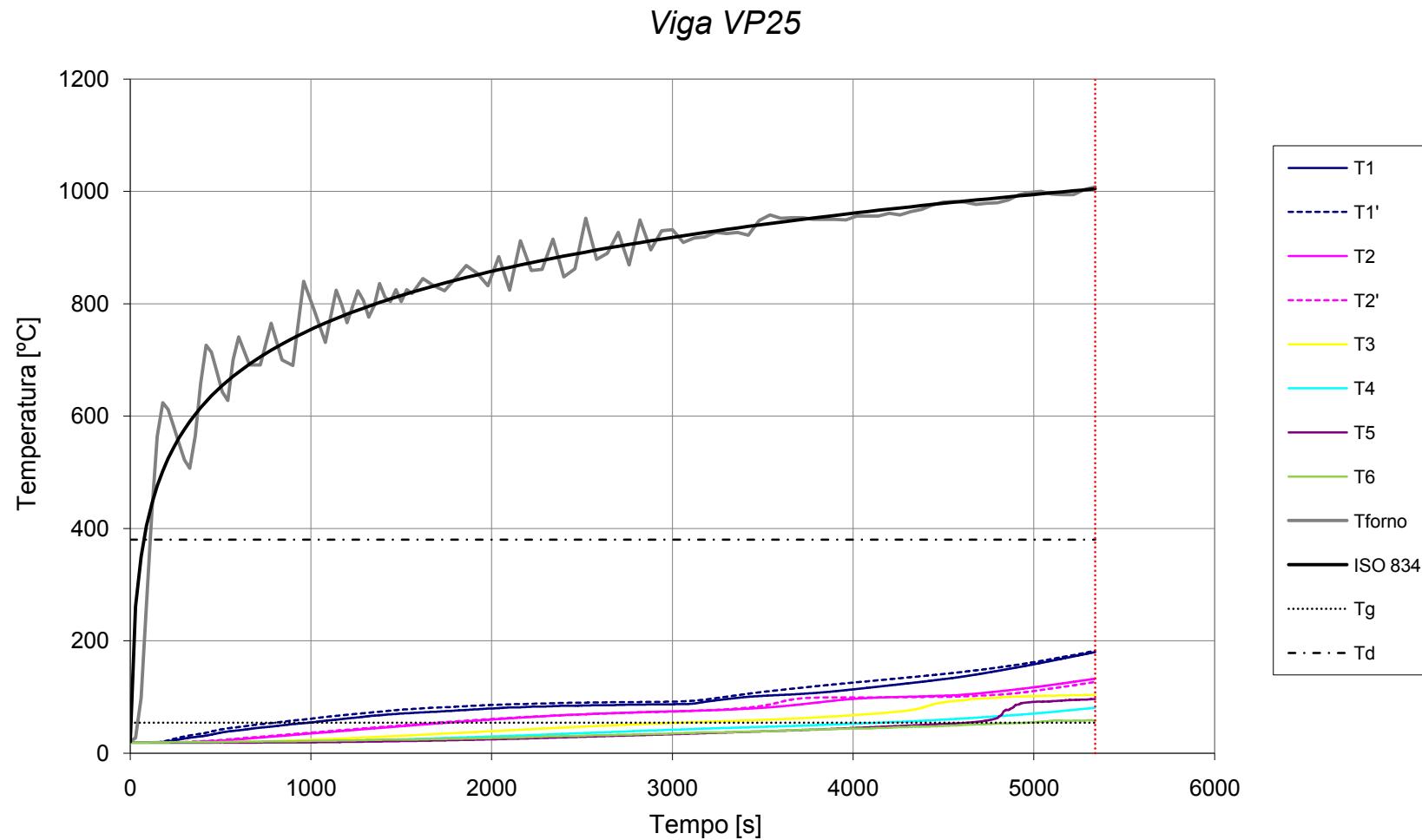


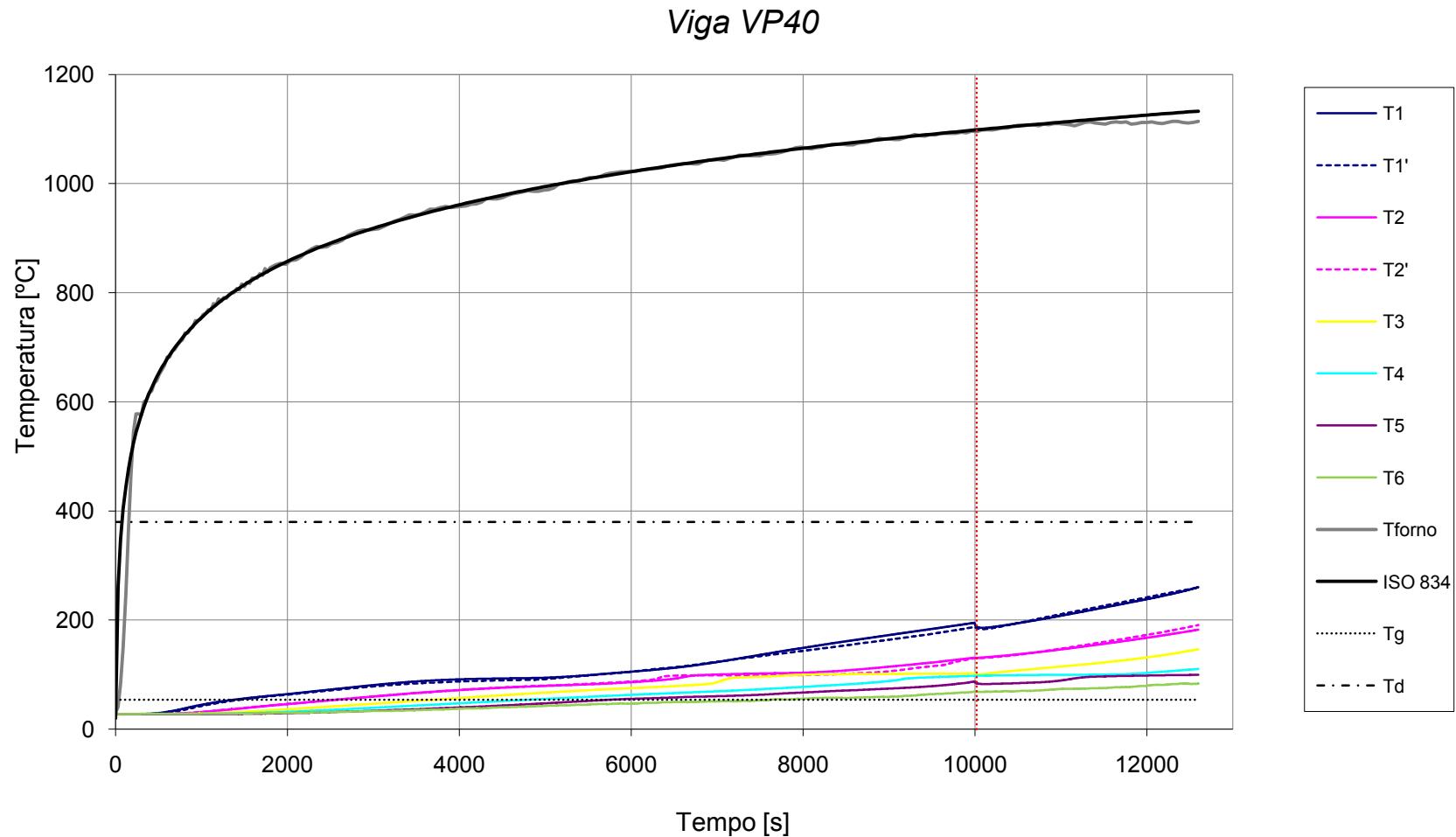
Anexo IV. Diagramas temperatura-tempo experimentais das vigas RC a SC40

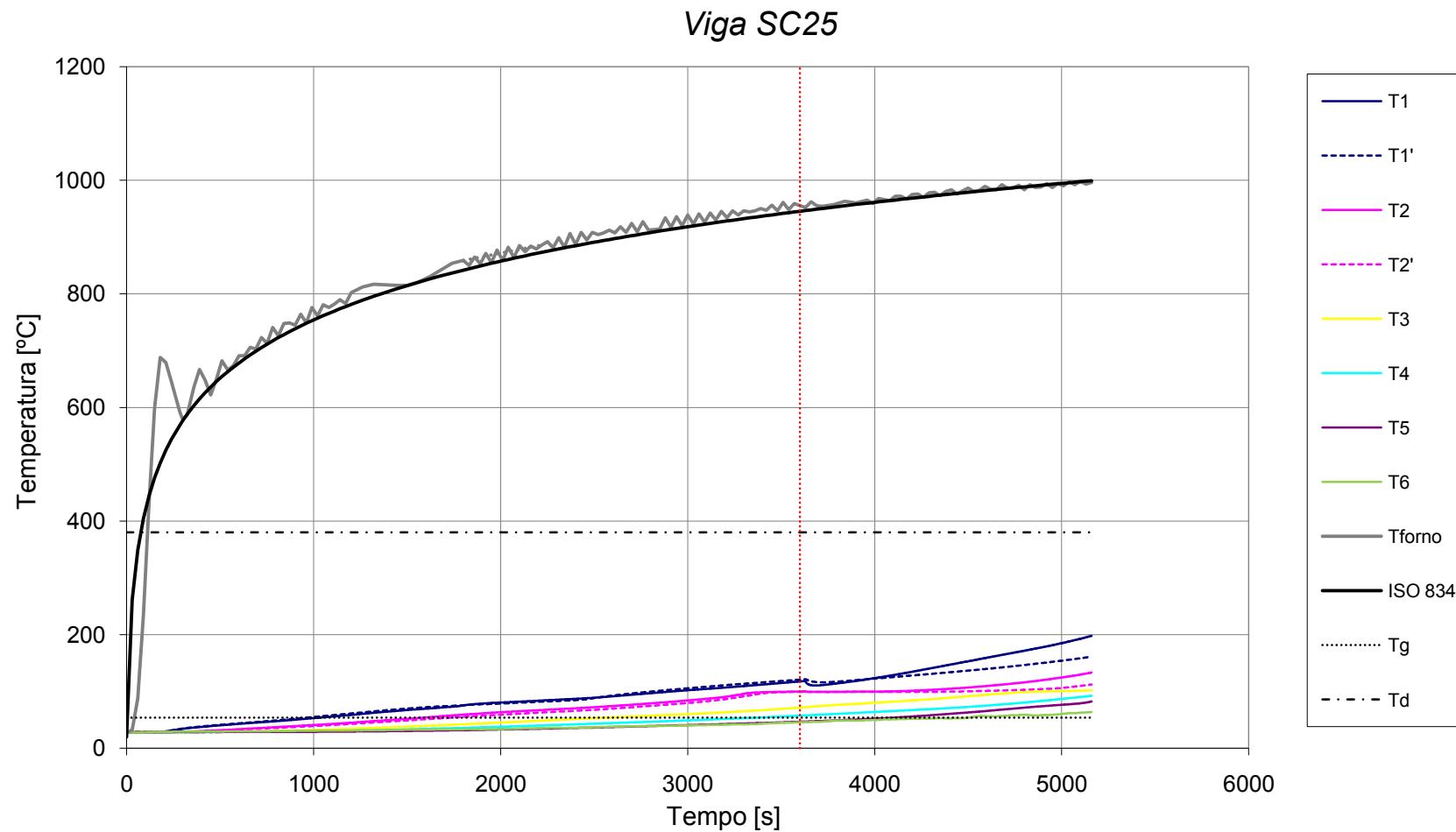


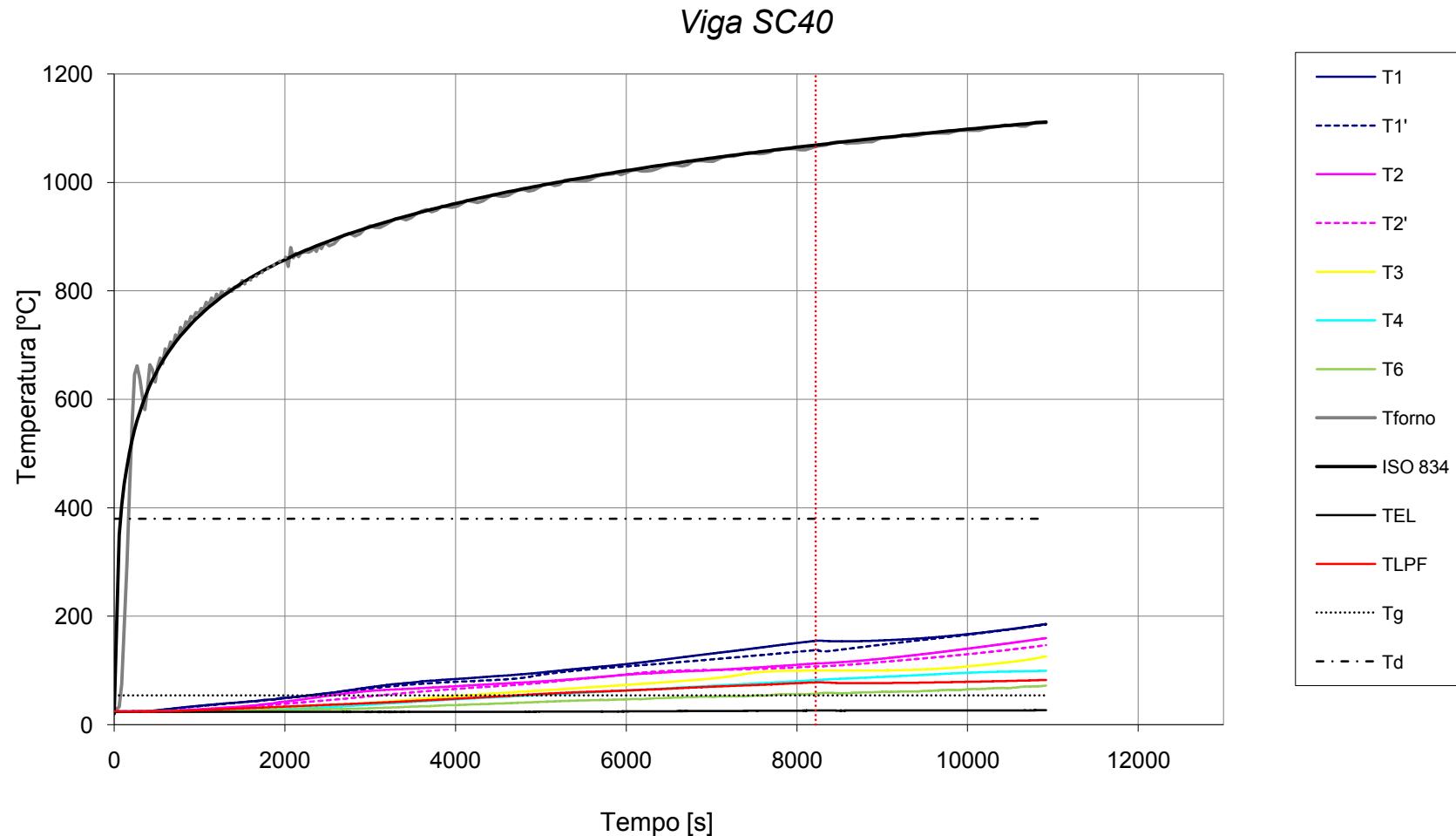
Viga CFRP











Anexo V. Ficheiros de dados do modelo base aplicado a cada tipo de viga.

Viga RC

/TITLE, Viga RC

VARIÁVEIS E CONSTANTES

/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274 ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
 *DIM,hfhot,TABLE,4,,TEMP ! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
 hfhot(1,0)=20,1000 ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2*°C)
 hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,TIME !Curva ISO 834
 bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
 bftbot(1,1)=349.502.603.678. 781. 842. 885. 945. 1006. 1049

```
bftcold = 20 ! Temperatura ambiente  
  
*SET,totaltime,4140 ! Tempo de exposição ao fogo  
*SET,timestep,10  
*SET,numstep,totaltime/timestep  
*SET,minsteps,1  
*SET,maxsteps,1000  
*SET,iters,10  
*SET,apprate,timestep
```

DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS

ET,1,PLANE55	! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1	! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1	! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0	! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2	! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1	! Opcão de radiação

GEOMETRIA

K,45,0.0250,0.0332,0.0000
 K,46,0.0300,0.0332,0.0000
 K,47,0.0350,0.0332,0.0000
 K,48,0.0400,0.0332,0.0000
 K,49,0.0450,0.0332,0.0000
 K,50,0.0500,0.0332,0.0000
 K,51,0.0550,0.0332,0.0000
 K,52,0.0600,0.0332,0.0000
 K,53,0.0650,0.0332,0.0000
 K,54,0.0700,0.0332,0.0000
 K,55,0.0750,0.0332,0.0000
 K,56,0.0000,0.0332,0.0000
 K,57,0.0000,0.0732,0.0000
 K,58,0.0000,0.1132,0.0000
 K,59,0.0000,0.1532,0.0000
 K,60,0.0250,0.0732,0.0000
 K,61,0.0250,0.1132,0.0000
 K,62,0.0250,0.1532,0.0000
 K,63,0.0500,0.0732,0.0000
 K,64,0.0500,0.1132,0.0000
 K,65,0.0500,0.1532,0.0000
 K,66,0.0750,0.0732,0.0000
 K,67,0.0750,0.1132,0.0000
 K,68,0.0750,0.1532,0.0000
 K,69,0.1000,0.0332,0.0000
 K,70,0.1000,0.0732,0.0000
 K,71,0.1000,0.1132,0.0000
 K,72,0.1000,0.1532,0.0000

A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47
A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52

ASEL,ALL
AGLUE,ALL

!-----MALHA-----

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,004 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0332,0.0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,004 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0732,0.1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,004 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.1132,0.1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

! 2-Betão

MPTEMP !IMPDATA,C --> calor específico (J/kg.°C)
MPTEMP, 1,20,100,115,200,334,354
MPTEMP, 7,400,491,518,1000
MPDATA,C,2,1,900,900,1470,1000,1067,1077
MPDATA,C,2,7,1100,1100,1100,1100

MPTEMP !IMPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/m°C)
MPTEMP, 1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595

MPTEMP !IMPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1,20,115,200,400,500,528
MPTEMP, 7,1000
MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2352,2280,2259,2253
MPDATA,DENS,2,7,2154

MPTEMP !IMPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP, 1,20,1000
MPDATA,EMIS,2, 1,0.7,0.7

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,20 !Temperatura inicial de todos os nós

TYPE,2
REAL,2
MAT,2

! --- Face fria ---

```
NSEL,S,LOC,Y,0.1532      !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S
N,100000,0.05,0.2032      !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
ESURF,100000               !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
                           !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico
```

```
ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,1,CONV,0,10
D,100000,TEMP,bftcold    !Convecção na face fria
                           !Temperatura no nó extra de radiação
```

! --- Face quente ---

```
TYPE,2
REAL,2
MAT,1
MAT,2
```

```
NSEL,S,LOC,Y,0.0332      !selecionar face inferior da viga de betão
ESLN,S
N,100001,0.05,-0.02      !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
ESURF,100001               !Nó extra para radiação
                           !Elemento SURF151, superfície com efeito térmico
```

```
ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot%
D,100001,TEMP,%bftbot%
ALLSEL,ALL                 !Convecção na face quente
                           !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
```

```
STEF,5.67e-8
FINISH                      !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
```

!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

```
/CONFIG, NRES, 1000000
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8
NEQIT,100
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL

SOLVE
FINISH
```

Viga CFRP

/TITLE, Viga CFRP

*****VARIÁVEIS E CONSTANTES*****

!-----VARIÁVEIS E CONSTANTES-----

```
/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274                ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
                           ! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
*DIM,hfhot,TABLE,4,,,TEMP
hfhot(1,0)=20,1000          ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2°C)
hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,,TIME   !Curva ISO 834
bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
bftbot(1,1)=349,502,603,678, 781, 842, 885, 945,1006,1049

bftcold = 20                ! Temperatura ambiente
```

```
*SET,totaltime,3600           ! Tempo de exposição ao fogo
*SET,timestep,10
*SET,numstep,totaltime/timestep
*SET,minsteps,1
*SET,maxsteps,1000
*SET,iters,10
*SET,apprate,timestep
```

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS-----

ET,1,PLANE55	! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1	! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1	! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0	! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2	! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1	! Opção de radiação

!-----GEOMETRIA-----

```
K,1,0.0250,0.0300,0.0000
K,2,0.0250,0.0306,0.0000
K,3,0.0300,0.0306,0.0000
K,4,0.0300,0.0300,0.0000
K,5,0.0350,0.0306,0.0000
K,6,0.0350,0.0300,0.0000
K,7,0.0400,0.0306,0.0000
K,8,0.0400,0.0300,0.0000
K,9,0.0450,0.0306,0.0000
K,10,0.0450,0.0300,0.0000
K,11,0.0500,0.0306,0.0000
K,12,0.0500,0.0300,0.0000
K,13,0.0550,0.0306,0.0000
K,14,0.0550,0.0300,0.0000
K,15,0.0600,0.0306,0.0000
K,16,0.0600,0.0300,0.0000
K,17,0.0650,0.0306,0.0000
K,18,0.0650,0.0300,0.0000
K,19,0.0700,0.0306,0.0000
K,20,0.0700,0.0300,0.0000
K,21,0.0750,0.0306,0.0000
K,22,0.0750,0.0300,0.0000
K,23,0.0250,0.0312,0.0000
K,24,0.0250,0.0322,0.0000
K,25,0.0300,0.0322,0.0000
K,26,0.0300,0.0312,0.0000
K,27,0.0350,0.0322,0.0000
K,28,0.0350,0.0312,0.0000
K,29,0.0400,0.0322,0.0000
K,30,0.0400,0.0312,0.0000
K,31,0.0450,0.0322,0.0000
K,32,0.0450,0.0312,0.0000
K,33,0.0500,0.0322,0.0000
K,34,0.0500,0.0312,0.0000
K,35,0.0550,0.0322,0.0000
K,36,0.0550,0.0312,0.0000
K,37,0.0600,0.0322,0.0000
K,38,0.0600,0.0312,0.0000
K,39,0.0650,0.0322,0.0000
K,40,0.0650,0.0312,0.0000
K,41,0.0700,0.0322,0.0000
K,42,0.0700,0.0312,0.0000
K,43,0.0750,0.0322,0.0000
K,44,0.0750,0.0312,0.0000
K,45,0.0250,0.0332,0.0000
K,46,0.0300,0.0332,0.0000
K,47,0.0350,0.0332,0.0000
K,48,0.0400,0.0332,0.0000
K,49,0.0450,0.0332,0.0000
K,50,0.0500,0.0332,0.0000
K,51,0.0550,0.0332,0.0000
K,52,0.0600,0.0332,0.0000
K,53,0.0650,0.0332,0.0000
K,54,0.0700,0.0332,0.0000
K,55,0.0750,0.0332,0.0000
K,56,0.0000,0.0332,0.0000
```

K,57,0.0000,0.0732,0.0000
K,58,0.0000,0.1132,0.0000
K,59,0.0000,0.1532,0.0000
K,60,0.0250,0.0732,0.0000
K,61,0.0250,0.1132,0.0000
K,62,0.0250,0.1532,0.0000
K,63,0.0500,0.0732,0.0000
K,64,0.0500,0.1132,0.0000
K,65,0.0500,0.1532,0.0000
K,66,0.0750,0.0732,0.0000
K,67,0.0750,0.1132,0.0000
K,68,0.0750,0.1532,0.0000
K,69,0.1000,0.0332,0.0000
K,70,0.1000,0.0732,0.0000
K,71,0.1000,0.1132,0.0000
K,72,0.1000,0.1532,0.0000

A,1,2,3,4 !A1
A,4,3,5,6 !A2
A,6,5,7,8 !A3
A,8,7,9,10 !A4
A,10,9,11,12 !A5
A,12,11,13,14 !A6
A,14,13,15,16 !A7
A,16,15,17,18 !A8
A,18,17,19,20 !A9
A,20,19,21,22 !A10
A,2,23,26,3 !A11
A,3,26,28,5 !A12
A,5,28,30,7 !A13
A,7,30,32,9 !A14
A,9,32,34,11 !A15
A,11,34,36,13 !A16
A,13,36,38,15 !A17
A,15,38,40,17 !A18
A,17,40,42,19 !A19
A,19,42,44,21 !A20
A,23,24,25,26 !A21
A,26,25,27,28 !A22
A,28,27,29,30 !A23
A,30,29,31,32 !A24
A,32,31,33,34 !A25
A,34,33,35,36 !A26
A,36,35,37,38 !A27
A,38,37,39,40 !A28
A,40,39,41,42 !A29
A,42,41,43,44 !A30
A,24,45,46,25 !A31
A,25,46,47,27 !A32
A,27,47,48,29 !A33
A,29,48,49,31 !A34
A,31,49,50,33 !A35
A,33,50,51,35 !A36
A,35,51,52,37 !A37
A,37,52,53,39 !A38
A,39,53,54,41 !A39
A,41,54,55,43 !A40
A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47
A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52

ASEL,ALL
AGLUE,ALL

!-----MALHA-----

MAT,1

! Material 1

```
TYPE,1           ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0        ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D     ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025    ! dimensão máxima dos elementos
AMESH,1,40

MAT,2           ! Material 2
TYPE,1           ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0        ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D     ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,004     ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0332,0.0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2           ! Material 2
TYPE,1           ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0        ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D     ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,01      ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0732,0.1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2           ! Material 2
TYPE,1           ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0        ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D     ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,015     ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.1132,0.1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

!1-CFRP ; 2-Betão

```
MPTEMP          !MPDATA,C--> calor específico (J/kg.ºC)
MPTEMP, 1,20,100,115,200,334,354
MPTEMP, 7,400,491,518,1000
MPDATA,C,1,1,1287,1494,1533,1753,2100,5000
MPDATA,C,1,7,4963,4890,1600,1800
MPDATA,C,2,1,900,900,1470,1000,1067,1077
MPDATA,C,2,7,1100,1100,1100,1100
```

```
MPTEMP          !MPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/mºC)
MPTEMP, 1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,1,1,1.136,0.971,0.262,0.205,0.173,0.173
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595
```

```
MPTEMP          !MPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1,20,115,120,200,300,400,
MPTEMP, 7,500,528,600,650,700,740,
MPTEMP, 13,784,1000
MPDATA,DENS,1,1,1550,1546,1543,1540,1532,1411
MPDATA,DENS,1,7,1318,1304,1252,1194,1023,761
MPDATA,DENS,1,13,1,1
MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2375,2352,2316,2280
MPDATA,DENS,2,7,2259,2253,2238,2228,2217,2209
MPDATA,DENS,2,13,2199,2154
```

```
MPTEMP          !MPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP, 1,20,1000
MPDATA,EMIS,1, 1,0.875,0.875
MPDATA,EMIS,2, 1,0.7,0.7
```

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,20 !Temperatura inicial de todos os nós

TYPE,2
REAL,2
MAT,2

! --- Face fria ---

```

NSEL,S,LOC,Y,0.1532          !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S                         !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100000,0.05,0.2032           !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
ESURF,100000                     !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,1,CONV,0,10
D,100000,TEMP,bftcold          !Convecção na face fria
                                !Temperatura no nó extra de radiação

! --- Face quente ---

TYPE,2
REAL,2
MAT,1
MAT,2

NSEL,S,LOC,X,0.025          !selecionar face esquerda do laminado
NSEL,A,LOC,X,0.075            !selecionar face direita do laminado
NSEL,A,LOC,Y,0.03              !selecionar face inferior do laminado
NSEL,A,LOC,Y,0.0332            !selecionar face inferior da viga de betão
ESLN,S                         !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100001,0.05,-0.02             !Nó extra para radiação
ESURF,100001                     !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot%      !Convecção na face quente

D,100001,TEMP,%bftbot%        !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
ALLSEL,ALL

STEF,5.67e-8                  !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
FINISH

!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

/CONFIG, NRES, 1000000
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8       ! Activar os efeitos térmicos
NEQIT,100                         ! Limites de convergência
                                    ! Número máximo de iterações
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL

SOLVE
FINISH

```

Viga VP25

```

/TITLE, Viga VP25

!-----VARIÁVEIS E CONSTANTES-----

/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274          ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
                    ! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
*DIM,hfhot,TABLE,4,,,TEMP    ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2°C)
hfhot(1,0)=20,1000
hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,,TIME   !Curva ISO 834
bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
bftbot(1,1)=349,502,603,678, 781, 842, 885, 945,1006,1049

bftcold = 20          ! Temperatura ambiente

*SET,totaltime,5340        ! Tempo de exposição ao fogo

```

```
*SET,timestep,10
*SET,numstep,totaltime/timestep
*SET,minsteps,1
*SET,maxsteps,1000
*SET,iters,10
*SET,apprate,timestep

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS-----

ET,1,PLANE55           ! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1     ! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1             ! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0             ! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2             ! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1             ! Opção de radiação
```

!-----GEOMETRIA-----

e=0.025 !e=espessura da protecção de VP (medida a partir da fibra inferior do betão)

```
K,1,0.0250,0.0300,0.0000
K,2,0.0250,0.0306,0.0000
K,3,0.0300,0.0306,0.0000
K,4,0.0300,0.0300,0.0000
K,5,0.0350,0.0306,0.0000
K,6,0.0350,0.0300,0.0000
K,7,0.0400,0.0306,0.0000
K,8,0.0400,0.0300,0.0000
K,9,0.0450,0.0306,0.0000
K,10,0.0450,0.0300,0.0000
K,11,0.0500,0.0306,0.0000
K,12,0.0500,0.0300,0.0000
K,13,0.0550,0.0306,0.0000
K,14,0.0550,0.0300,0.0000
K,15,0.0600,0.0306,0.0000
K,16,0.0600,0.0300,0.0000
K,17,0.0650,0.0306,0.0000
K,18,0.0650,0.0300,0.0000
K,19,0.0700,0.0306,0.0000
K,20,0.0700,0.0300,0.0000
K,21,0.0750,0.0306,0.0000
K,22,0.0750,0.0300,0.0000
K,23,0.0250,0.0312,0.0000
K,24,0.0250,0.0322,0.0000
K,25,0.0300,0.0322,0.0000
K,26,0.0300,0.0312,0.0000
K,27,0.0350,0.0322,0.0000
K,28,0.0350,0.0312,0.0000
K,29,0.0400,0.0322,0.0000
K,30,0.0400,0.0312,0.0000
K,31,0.0450,0.0322,0.0000
K,32,0.0450,0.0312,0.0000
K,33,0.0500,0.0322,0.0000
K,34,0.0500,0.0312,0.0000
K,35,0.0550,0.0322,0.0000
K,36,0.0550,0.0312,0.0000
K,37,0.0600,0.0322,0.0000
K,38,0.0600,0.0312,0.0000
K,39,0.0650,0.0322,0.0000
K,40,0.0650,0.0312,0.0000
K,41,0.0700,0.0322,0.0000
K,42,0.0700,0.0312,0.0000
K,43,0.0750,0.0322,0.0000
K,44,0.0750,0.0312,0.0000
K,45,0.0250,0.0332,0.0000
K,46,0.0300,0.0332,0.0000
K,47,0.0350,0.0332,0.0000
K,48,0.0400,0.0332,0.0000
K,49,0.0450,0.0332,0.0000
K,50,0.0500,0.0332,0.0000
K,51,0.0550,0.0332,0.0000
K,52,0.0600,0.0332,0.0000
K,53,0.0650,0.0332,0.0000
K,54,0.0700,0.0332,0.0000
K,55,0.0750,0.0332,0.0000
K,56,0.0000,0.0332,0.0000
```

K,57,0.0000,0.0732,0.0000
K,58,0.0000,0.1132,0.0000
K,59,0.0000,0.1532,0.0000
K,60,0.0250,0.0732,0.0000
K,61,0.0250,0.1132,0.0000
K,62,0.0250,0.1532,0.0000
K,63,0.0500,0.0732,0.0000
K,64,0.0500,0.1132,0.0000
K,65,0.0500,0.1532,0.0000
K,66,0.0750,0.0732,0.0000
K,67,0.0750,0.1132,0.0000
K,68,0.0750,0.1532,0.0000
K,69,0.1000,0.0332,0.0000
K,70,0.1000,0.0732,0.0000
K,71,0.1000,0.1132,0.0000
K,72,0.1000,0.1532,0.0000
K,73,0.0050,0.0332,0.0000
K,74,0.0100,0.0332,0.0000
K,75,0.0150,0.0332,0.0000
K,76,0.0200,0.0332,0.0000
K,77,0.0000,0.0322,0.0000
K,78,0.0050,0.0322,0.0000
K,79,0.0100,0.0322,0.0000
K,80,0.0150,0.0322,0.0000
K,81,0.0200,0.0322,0.0000
K,82,0.0000,0.0312,0.0000
K,83,0.0050,0.0312,0.0000
K,84,0.0100,0.0312,0.0000
K,85,0.0150,0.0312,0.0000
K,86,0.0200,0.0312,0.0000
K,87,0.0000,0.0306,0.0000
K,88,0.0050,0.0306,0.0000
K,89,0.0100,0.0306,0.0000
K,90,0.0150,0.0306,0.0000
K,91,0.0200,0.0306,0.0000
K,92,0.0000,0.0300,0.0000
K,93,0.0050,0.0300,0.0000
K,94,0.0100,0.0300,0.0000
K,95,0.0150,0.0300,0.0000
K,96,0.0200,0.0300,0.0000
K,97,0.0800,0.0332,0.0000
K,98,0.0850,0.0332,0.0000
K,99,0.0900,0.0332,0.0000
K,100,0.0950,0.0332,0.0000
K,101,0.0800,0.0322,0.0000
K,102,0.0850,0.0322,0.0000
K,103,0.0900,0.0322,0.0000
K,104,0.0950,0.0322,0.0000
K,105,0.1000,0.0322,0.0000
K,106,0.0800,0.0312,0.0000
K,107,0.0850,0.0312,0.0000
K,108,0.0900,0.0312,0.0000
K,109,0.0950,0.0312,0.0000
K,110,0.1000,0.0312,0.0000
K,111,0.0800,0.0306,0.0000
K,112,0.0850,0.0306,0.0000
K,113,0.0900,0.0306,0.0000
K,114,0.0950,0.0306,0.0000
K,115,0.1000,0.0306,0.0000
K,116,0.0800,0.0300,0.0000
K,117,0.0850,0.0300,0.0000
K,118,0.0900,0.0300,0.0000
K,119,0.0950,0.0300,0.0000
K,120,0.1000,0.0300,0.0000
K,121,0.0000,0.0332-e,0.0000
K,122,0.1000,0.0332-e,0.0000

A,1,2,3,4 !A1
A,4,3,5,6 !A2
A,6,5,7,8 !A3
A,8,7,9,10 !A4
A,10,9,11,12 !A5
A,12,11,13,14 !A6
A,14,13,15,16 !A7
A,16,15,17,18 !A8
A,18,17,19,20 !A9

A,20,19,21,22 !A10
A,2,23,26,3 !A11
A,3,26,28,5 !A12
A,5,28,30,7 !A13
A,7,30,32,9 !A14
A,9,32,34,11 !A15
A,11,34,36,13 !A16
A,13,36,38,15 !A17
A,15,38,40,17 !A18
A,17,40,42,19 !A19
A,19,42,44,21 !A20
A,23,24,25,26 !A21
A,26,25,27,28 !A22
A,28,27,29,30 !A23
A,30,29,31,32 !A24
A,32,31,33,34 !A25
A,34,33,35,36 !A26
A,36,35,37,38 !A27
A,38,37,39,40 !A28
A,40,39,41,42 !A29
A,42,41,43,44 !A30
A,24,45,46,25 !A31
A,25,46,47,27 !A32
A,27,47,48,29 !A33
A,29,48,49,31 !A34
A,31,49,50,33 !A35
A,33,50,51,35 !A36
A,35,51,52,37 !A37
A,37,52,53,39 !A38
A,39,53,54,41 !A39
A,41,54,55,43 !A40
A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47
A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52
A,92,87,88,93 !A53
A,93,88,89,94 !A54
A,94,89,90,95 !A55
A,95,90,91,96 !A56
A,96,91,2,1 !A57
A,87,82,83,88 !A58
A,88,83,84,89 !A59
A,89,84,85,90 !A60
A,90,85,86,91 !A61
A,91,86,23,2 !A62
A,82,77,78,83 !A63
A,83,78,79,84 !A64
A,84,79,80,85 !A65
A,85,80,81,86 !A66
A,86,81,24,23 !A67
A,77,56,73,78 !A68
A,78,73,74,79 !A69
A,79,74,75,80 !A70
A,80,75,76,81 !A71
A,81,76,45,24 !A72
A,22,21,111,116 !A73
A,116,111,112,117!A74
A,117,112,113,118!A75
A,118,113,114,119!A76
A,119,114,115,120!A77
A,21,44,106,111 !A78
A,111,106,107,112!A79
A,112,107,108,113!A80
A,113,108,109,114!A81
A,114,109,110,115!A82
A,44,43,101,106 !A83
A,106,101,102,107!A84
A,107,102,103,108!A85

```
A,108,103,104,109!A86
A,109,104,105,110!A87
A,43,55,97,101 !A88
A,101,97,98,102 !A89
A,102,98,99,103 !A90
A,103,99,100,104 !A91
A,104,100,69,105 !A92
A,121,92,120,122 !A93
```

```
ASEL,ALL
AGLUE,ALL
```

```
!-----MALHA-----
```

```
MAT,1          ! Material 1
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025  ! dimensão máxima dos elementos
AMESH,1,40    ! Mesh selected areas
```

```
MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.004   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0332,0.0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

```
MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.01     ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0732,0.1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

```
MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.015   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.1132,0.1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

!ÁREA À ESQUERDA DO LAMINADO

```
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025  ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0000,0.0250
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

!ÁREA À DIREITA DO LAMINADO

```
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025  ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0750,0.100
AMESH,ALL
ASEL,ALL
```

!AREAS ABAIXO DO LAMINADO

```
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0      ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D   ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025  ! dimensão máxima dos elementos
```

ASEL,S,LOC,Y,0.0300-e,0.0300
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

!1-CFRP ; 2-Betão ; 3-argamassa de vermiculite perlite

MPTEMP !MPDATA,C--> calor específico (J/kg.ºC)
MPTEMP,1,20,100,115,200,334,354
MPTEMP,7,400,491,518,600,650,700
MPTEMP,13,800

MPDATA,C,1,1,1287,1494,1533,1753,2100,5000
MPDATA,C,1,7,4963,4890,1600,1634,1655,1676,
MPDATA,C,1,13,1717

MPDATA,C,2,1,900,900,1470,1000,1067,1077
MPDATA,C,2,7,1100,1100,1100,1100,1100,1100
MPDATA,C,2,13,1100

MPDATA,C,3,1,712.1,760.6,772.1,848.0,985.7,1005.8
MPDATA,C,3,7,1049.5,1117.8,1131.1,1144.5,1127.3,1086.3
MPDATA,C,3,13,915.9

MPTEMP !MPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/m°C)
MPTEMP,1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,1,1,1.136,0.971,0.262,0.205,0.173,0.173
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595
MPDATA,KXX,3,1,0.058,0.075,0.105,0.108,0.131,0.148

MPTEMP !MPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1,20,115,120,200,300,400,
MPTEMP, 7,500,528,600,650,700,740,
MPTEMP, 13,784,1000
MPDATA,DENS,1,1,1550,1546,1543,1540,1532,1411
MPDATA,DENS,1,7,1318,1304,1252,1194,1023,761
MPDATA,DENS,1,13,1,1
MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2375,2352,2316,2280
MPDATA,DENS,2,7,2259,2253,2238,2228,2217,2209
MPDATA,DENS,2,13,2199,2154
MPDATA,DENS,3,1,500,494.5,437.5,425.5,423.5,422
MPDATA,DENS,3,7,421.5,421.5,420.5,418,411,396
MPDATA,DENS,3,13,377,373.5

MPTEMP !MPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP,1,20,1000
MPDATA,EMIS,1,1,0.875,0.875
MPDATA,EMIS,2,1,0.7,0.7
MPDATA,EMIS,3,1,0.7,0.7

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,20 !Temperatura inicial de todos os nós
TYPE,2
REAL,2

MAT,2

! --- Face fria ---

NSEL,S,LOC,Y,0.1532 !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100000,0.05,0.2032 !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
ESURF,100000 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face fria
SFE,ALL,1,CONV,0,10 !Temperatura no nó extra de radiação
D,100000,TEMP,bftcold

! --- Face quente ---

TYPE,2
REAL,2

MAT,3

```

MAT,2
MAT,1

NSEL,S,LOC,Y,0.0332-e      !selecionar face inferior da protecção
ESLN,S                         !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100001,0.05,0.0332-e-0.05   !Nó extra para radiação
ESURF,100001                   !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot%      !Convecção na face quente
D,100001,TEMP,%bftbot%        !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
ALLSEL,ALL
STEF,5.67e-8                  !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
FINISH

```

!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

```

/CONFIG, NRES, 1000000
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM             ! Activar os efeitos térmicos
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8     ! Limites de convergência
NEQIT,100                     ! Número máximo de iterações
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL

SOLVE
FINISH

```

Viga VP40

/TITLE, Viga VP40

!-----VARIÁVEIS E CONSTANTES-----

```

/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274                  ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
                             ! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
*DIM,hfhot,TABLE,4,,,TEMP    ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2°C)
hfhot(1,0)=20,1000
hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,,TIME   !Curva ISO 834
bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
bftbot(1,1)=349,502,603,678, 781, 842, 885, 945,1006,1049

bftcold = 20                 ! Temperatura ambiente

*SET,totaltime,12600          ! Tempo de exposição ao fogo
*SET,timestep,10
*SET,numstep,totaltime/timestep
*SET,minsteps,1
*SET,maxsteps,1000
*SET,iters,10
*SET,apprate,timestep

```

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS-----

```

ET,1,PLANE55                 ! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1           ! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1                   ! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0                   ! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2                   ! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1                   ! Opção de radiação

```

!-----GEOMETRIA-----

e=0.040 !e=espessura da protecção de VP (medida a partir da fibra inferior do betão)

K,1,0.0250,0.0300,0.0000
K,2,0.0250,0.0306,0.0000
K,3,0.0300,0.0306,0.0000
K,4,0.0300,0.0300,0.0000
K,5,0.0350,0.0306,0.0000
K,6,0.0350,0.0300,0.0000
K,7,0.0400,0.0306,0.0000
K,8,0.0400,0.0300,0.0000
K,9,0.0450,0.0306,0.0000
K,10,0.0450,0.0300,0.0000
K,11,0.0500,0.0306,0.0000
K,12,0.0500,0.0300,0.0000
K,13,0.0550,0.0306,0.0000
K,14,0.0550,0.0300,0.0000
K,15,0.0600,0.0306,0.0000
K,16,0.0600,0.0300,0.0000
K,17,0.0650,0.0306,0.0000
K,18,0.0650,0.0300,0.0000
K,19,0.0700,0.0306,0.0000
K,20,0.0700,0.0300,0.0000
K,21,0.0750,0.0306,0.0000
K,22,0.0750,0.0300,0.0000
K,23,0.0250,0.0312,0.0000
K,24,0.0250,0.0322,0.0000
K,25,0.0300,0.0322,0.0000
K,26,0.0300,0.0312,0.0000
K,27,0.0350,0.0322,0.0000
K,28,0.0350,0.0312,0.0000
K,29,0.0400,0.0322,0.0000
K,30,0.0400,0.0312,0.0000
K,31,0.0450,0.0322,0.0000
K,32,0.0450,0.0312,0.0000
K,33,0.0500,0.0322,0.0000
K,34,0.0500,0.0312,0.0000
K,35,0.0550,0.0322,0.0000
K,36,0.0550,0.0312,0.0000
K,37,0.0600,0.0322,0.0000
K,38,0.0600,0.0312,0.0000
K,39,0.0650,0.0322,0.0000
K,40,0.0650,0.0312,0.0000
K,41,0.0700,0.0322,0.0000
K,42,0.0700,0.0312,0.0000
K,43,0.0750,0.0322,0.0000
K,44,0.0750,0.0312,0.0000
K,45,0.0250,0.0332,0.0000
K,46,0.0300,0.0332,0.0000
K,47,0.0350,0.0332,0.0000
K,48,0.0400,0.0332,0.0000
K,49,0.0450,0.0332,0.0000
K,50,0.0500,0.0332,0.0000
K,51,0.0550,0.0332,0.0000
K,52,0.0600,0.0332,0.0000
K,53,0.0650,0.0332,0.0000
K,54,0.0700,0.0332,0.0000
K,55,0.0750,0.0332,0.0000
K,56,0.0000,0.0332,0.0000
K,57,0.0000,0.0732,0.0000
K,58,0.0000,0.1132,0.0000
K,59,0.0000,0.1532,0.0000
K,60,0.0250,0.0732,0.0000
K,61,0.0250,0.1132,0.0000
K,62,0.0250,0.1532,0.0000
K,63,0.0500,0.0732,0.0000
K,64,0.0500,0.1132,0.0000
K,65,0.0500,0.1532,0.0000
K,66,0.0750,0.0732,0.0000
K,67,0.0750,0.1132,0.0000
K,68,0.0750,0.1532,0.0000
K,69,0.1000,0.0332,0.0000
K,70,0.1000,0.0732,0.0000
K,71,0.1000,0.1132,0.0000
K,72,0.1000,0.1532,0.0000
K,73,0.0050,0.0332,0.0000
K,74,0.0100,0.0332,0.0000
K,75,0.0150,0.0332,0.0000
K,76,0.0200,0.0332,0.0000

K,77,0.0000,0.0322,0.0000
 K,78,0.0050,0.0322,0.0000
 K,79,0.0100,0.0322,0.0000
 K,80,0.0150,0.0322,0.0000
 K,81,0.0200,0.0322,0.0000
 K,82,0.0000,0.0312,0.0000
 K,83,0.0050,0.0312,0.0000
 K,84,0.0100,0.0312,0.0000
 K,85,0.0150,0.0312,0.0000
 K,86,0.0200,0.0312,0.0000
 K,87,0.0000,0.0306,0.0000
 K,88,0.0050,0.0306,0.0000
 K,89,0.0100,0.0306,0.0000
 K,90,0.0150,0.0306,0.0000
 K,91,0.0200,0.0306,0.0000
 K,92,0.0000,0.0300,0.0000
 K,93,0.0050,0.0300,0.0000
 K,94,0.0100,0.0300,0.0000
 K,95,0.0150,0.0300,0.0000
 K,96,0.0200,0.0300,0.0000
 K,97,0.0800,0.0332,0.0000
 K,98,0.0850,0.0332,0.0000
 K,99,0.0900,0.0332,0.0000
 K,100,0.0950,0.0332,0.0000
 K,101,0.0800,0.0322,0.0000
 K,102,0.0850,0.0322,0.0000
 K,103,0.0900,0.0322,0.0000
 K,104,0.0950,0.0322,0.0000
 K,105,0.1000,0.0322,0.0000
 K,106,0.0800,0.0312,0.0000
 K,107,0.0850,0.0312,0.0000
 K,108,0.0900,0.0312,0.0000
 K,109,0.0950,0.0312,0.0000
 K,110,0.1000,0.0312,0.0000
 K,111,0.0800,0.0306,0.0000
 K,112,0.0850,0.0306,0.0000
 K,113,0.0900,0.0306,0.0000
 K,114,0.0950,0.0306,0.0000
 K,115,0.1000,0.0306,0.0000
 K,116,0.0800,0.0300,0.0000
 K,117,0.0850,0.0300,0.0000
 K,118,0.0900,0.0300,0.0000
 K,119,0.0950,0.0300,0.0000
 K,120,0.1000,0.0300,0.0000
 K,121,0.0000,0.0332-e,0.0000
 K,122,0.1000,0.0332-e,0.0000

A,1,2,3,4 !A1
 A,4,3,5,6 !A2
 A,6,5,7,8 !A3
 A,8,7,9,10 !A4
 A,10,9,11,12 !A5
 A,12,11,13,14 !A6
 A,14,13,15,16 !A7
 A,16,15,17,18 !A8
 A,18,17,19,20 !A9
 A,20,19,21,22 !A10
 A,2,23,26,3 !A11
 A,3,26,28,5 !A12
 A,5,28,30,7 !A13
 A,7,30,32,9 !A14
 A,9,32,34,11 !A15
 A,11,34,36,13 !A16
 A,13,36,38,15 !A17
 A,15,38,40,17 !A18
 A,17,40,42,19 !A19
 A,19,42,44,21 !A20
 A,23,24,25,26 !A21
 A,26,25,27,28 !A22
 A,28,27,29,30 !A23
 A,30,29,31,32 !A24
 A,32,31,33,34 !A25
 A,34,33,35,36 !A26
 A,36,35,37,38 !A27
 A,38,37,39,40 !A28
 A,40,39,41,42 !A29

A,42,41,43,44 !A30
A,24,45,46,25 !A31
A,25,46,47,27 !A32
A,27,47,48,29 !A33
A,29,48,49,31 !A34
A,31,49,50,33 !A35
A,33,50,51,35 !A36
A,35,51,52,37 !A37
A,37,52,53,39 !A38
A,39,53,54,41 !A39
A,41,54,55,43 !A40
A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47
A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52
A,92,87,88,93 !A53
A,93,88,89,94 !A54
A,94,89,90,95 !A55
A,95,90,91,96 !A56
A,96,91,2,1 !A57
A,87,82,83,88 !A58
A,88,83,84,89 !A59
A,89,84,85,90 !A60
A,90,85,86,91 !A61
A,91,86,23,2 !A62
A,82,77,78,83 !A63
A,83,78,79,84 !A64
A,84,79,80,85 !A65
A,85,80,81,86 !A66
A,86,81,24,23 !A67
A,77,56,73,78 !A68
A,78,73,74,79 !A69
A,79,74,75,80 !A70
A,80,75,76,81 !A71
A,81,76,45,24 !A72
A,22,21,111,116 !A73
A,116,111,112,117!A74
A,117,112,113,118!A75
A,118,113,114,119!A76
A,119,114,115,120!A77
A,21,44,106,111 !A78
A,111,106,107,112!A79
A,112,107,108,113!A80
A,113,108,109,114!A81
A,114,109,110,115!A82
A,44,43,101,106 !A83
A,106,101,102,107!A84
A,107,102,103,108!A85
A,108,103,104,109!A86
A,109,104,105,110!A87
A,43,55,97,101 !A88
A,101,97,98,102 !A89
A,102,98,99,103 !A90
A,103,99,100,104 !A91
A,104,100,69,105 !A92
A,121,92,120,122 !A93

ASEL,ALL
AGLUE,ALL

!-----MALHA-----

MAT,1 ! Material 1
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025 ! dimensão máxima dos elementos
AMESH,1,40 ! Mesh selected areas

```

MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,004    ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,0332,0,0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,01     ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,0732,0,1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,015    ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,1132,0,1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!ÁREA À ESQUERDA DO LAMINADO
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,0300,0,0332
ASEL,R,LOC,X,0,0000,0,0250
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!ÁREA À DIREITA DO LAMINADO
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,0300,0,0332
ASEL,R,LOC,X,0,0750,0,100
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!AREAS ABAIXO DO LAMINADO
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0,0300-e,0,0300
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----
!1-CFRP ; 2-Betão ; 3-argamassa de vermiculite perlite

MPTEMP          !MPDATA,C--> calor específico (J/kg.°C)
MPTEMP,1,20,100,115,200,334,354
MPTEMP,7,400,491,518,600,650,700
MPTEMP,13,800

MPDATA,C,1,1,1287,1494,1533,1753,2100,5000
MPDATA,C,1,7,4963,4890,1600,1634,1655,1676,
MPDATA,C,1,13,1717

MPDATA,C,2,1,900,900,1470,1000,1067,1077
MPDATA,C,2,7,1100,1100,1100,1100,1100
MPDATA,C,2,13,1100

```

MPDATA,C,3,1,712.1,760.6,772.1,848.0,985.7,1005.8
MPDATA,C,3,7,1049.5,1117.8,1131.1,1144.5,1127.3,1086.3
MPDATA,C,3,13,915.9

MPTEMP !MPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/m°C)
MPTEMP,1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,1,1,1.136,0.971,0.262,0.205,0.173,0.173
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595
MPDATA,KXX,3,1,0.058,0.075,0.105,0.108,0.131,0.148

MPTEMP !MPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1,20,115,120,200,300,400,
MPTEMP, 7,500,528,600,650,700,740,
MPTEMP, 13,784,1000
MPDATA,DENS,1,1,1550,1546,1543,1540,1532,1411
MPDATA,DENS,1,7,1318,1304,1252,1194,1023,761
MPDATA,DENS,1,13,1,1
MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2375,2352,2316,2280
MPDATA,DENS,2,7,2259,2253,2238,2228,2217,2209
MPDATA,DENS,2,13,2199,2154
MPDATA,DENS,3,1,500,494.5,437.5,425.5,423.5,422
MPDATA,DENS,3,7,421.5,421.5,420.5,418,411,396
MPDATA,DENS,3,13,377,373.5

MPTEMP !MPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP,1,20,1000
MPDATA,EMIS,1,1,0.875,0.875
MPDATA,EMIS,2,1,0.7,0.7
MPDATA,EMIS,3,1,0.7,0.7

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,27 !Temperatura inicial de todos os nós
TYPE,2
REAL,2

MAT,2

! --- Face fria ---

NSEL,S,LOC,Y,0.1532 !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100000,0.05,0.2032 !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
ESURF,100000 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face fria
SFE,ALL,1,CONV,0,10 !Temperatura no nó extra de radiação
D,100000,TEMP,bftcold

! --- Face quente ---

TYPE,2
REAL,2

MAT,3
MAT,2
MAT,1

NSEL,S,LOC,Y,0.0332-e !selecionar face inferior da protecção
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100001,0.05,0.0332-e-0.05 !Nó extra para radiação
ESURF,100001 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face quente
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot% !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
D,100001,TEMP,%bftbot%
ALLSEL,ALL
STEF,5.67e-8 !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
FINISH

!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

/CONFIG, NRES, 1000000
/SOLU
SOLCONTROL,ON

```

ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM          ! Activar os efeitos térmicos
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8   ! Limites de convergência
NEQIT,100                 ! Número máximo de iterações
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL

SOLVE
FINISH

```

Viga SC25

/TITLE, Viga SC25

!-----VARIÁVEIS E CONSTANTES-----

```

/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274           ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
                      ! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
*DIM,hfhot,TABLE,4,,TEMP      ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2°C)
hfhot(1,0)=20,1000
hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,TIME    !Curva ISO 834
bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
bftbot(1,1)=349,502,603,678, 781, 842, 885, 945,1006,1049

bftcold = 20          ! Temperatura ambiente

*SET,totaltime,5160     ! Tempo de exposição ao fogo
*SET,timestep,10
*SET,numstep,totaltime/timestep
*SET,minsteps,1
*SET,maxsteps,1000
*SET,iters,10
*SET,apprate,timestep

```

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS-----

```

ET,1,PLANE55          ! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1    ! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1           ! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0           ! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2           ! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1           ! Opção de radiação

```

!-----GEOMETRIA-----

e=0.025 !e=espessura da protecção de SC (medida a partir da fibra inferior do laminado)

```

K,1,0.0250,0.0300,0.0000
K,2,0.0250,0.0306,0.0000
K,3,0.0300,0.0306,0.0000
K,4,0.0300,0.0300,0.0000
K,5,0.0350,0.0306,0.0000
K,6,0.0350,0.0300,0.0000
K,7,0.0400,0.0306,0.0000
K,8,0.0400,0.0300,0.0000
K,9,0.0450,0.0306,0.0000
K,10,0.0450,0.0300,0.0000
K,11,0.0500,0.0306,0.0000
K,12,0.0500,0.0300,0.0000
K,13,0.0550,0.0306,0.0000
K,14,0.0550,0.0300,0.0000
K,15,0.0600,0.0306,0.0000
K,16,0.0600,0.0300,0.0000
K,17,0.0650,0.0306,0.0000
K,18,0.0650,0.0300,0.0000

```

K,19,0.0700,0.0306,0.0000
K,20,0.0700,0.0300,0.0000
K,21,0.0750,0.0306,0.0000
K,22,0.0750,0.0300,0.0000
K,23,0.0250,0.0312,0.0000
K,24,0.0250,0.0322,0.0000
K,25,0.0300,0.0322,0.0000
K,26,0.0300,0.0312,0.0000
K,27,0.0350,0.0322,0.0000
K,28,0.0350,0.0312,0.0000
K,29,0.0400,0.0322,0.0000
K,30,0.0400,0.0312,0.0000
K,31,0.0450,0.0322,0.0000
K,32,0.0450,0.0312,0.0000
K,33,0.0500,0.0322,0.0000
K,34,0.0500,0.0312,0.0000
K,35,0.0550,0.0322,0.0000
K,36,0.0550,0.0312,0.0000
K,37,0.0600,0.0322,0.0000
K,38,0.0600,0.0312,0.0000
K,39,0.0650,0.0322,0.0000
K,40,0.0650,0.0312,0.0000
K,41,0.0700,0.0322,0.0000
K,42,0.0700,0.0312,0.0000
K,43,0.0750,0.0322,0.0000
K,44,0.0750,0.0312,0.0000
K,45,0.0250,0.0332,0.0000
K,46,0.0300,0.0332,0.0000
K,47,0.0350,0.0332,0.0000
K,48,0.0400,0.0332,0.0000
K,49,0.0450,0.0332,0.0000
K,50,0.0500,0.0332,0.0000
K,51,0.0550,0.0332,0.0000
K,52,0.0600,0.0332,0.0000
K,53,0.0650,0.0332,0.0000
K,54,0.0700,0.0332,0.0000
K,55,0.0750,0.0332,0.0000
K,56,0.0000,0.0332,0.0000
K,57,0.0000,0.0732,0.0000
K,58,0.0000,0.1132,0.0000
K,59,0.0000,0.1532,0.0000
K,60,0.0250,0.0732,0.0000
K,61,0.0250,0.1132,0.0000
K,62,0.0250,0.1532,0.0000
K,63,0.0500,0.0732,0.0000
K,64,0.0500,0.1132,0.0000
K,65,0.0500,0.1532,0.0000
K,66,0.0750,0.0732,0.0000
K,67,0.0750,0.1132,0.0000
K,68,0.0750,0.1532,0.0000
K,69,0.1000,0.0332,0.0000
K,70,0.1000,0.0732,0.0000
K,71,0.1000,0.1132,0.0000
K,72,0.1000,0.1532,0.0000
K,73,0.0050,0.0332,0.0000
K,74,0.0100,0.0332,0.0000
K,75,0.0150,0.0332,0.0000
K,76,0.0200,0.0332,0.0000
K,77,0.0000,0.0322,0.0000
K,78,0.0050,0.0322,0.0000
K,79,0.0100,0.0322,0.0000
K,80,0.0150,0.0322,0.0000
K,81,0.0200,0.0322,0.0000
K,82,0.0000,0.0312,0.0000
K,83,0.0050,0.0312,0.0000
K,84,0.0100,0.0312,0.0000
K,85,0.0150,0.0312,0.0000
K,86,0.0200,0.0312,0.0000
K,87,0.0000,0.0306,0.0000
K,88,0.0050,0.0306,0.0000
K,89,0.0100,0.0306,0.0000
K,90,0.0150,0.0306,0.0000
K,91,0.0200,0.0306,0.0000
K,92,0.0000,0.0300,0.0000
K,93,0.0050,0.0300,0.0000
K,94,0.0100,0.0300,0.0000

K,95,0.0150,0.0300,0.0000
K,96,0.0200,0.0300,0.0000
K,97,0.0800,0.0332,0.0000
K,98,0.0850,0.0332,0.0000
K,99,0.0900,0.0332,0.0000
K,100,0.0950,0.0332,0.0000
K,101,0.0800,0.0322,0.0000
K,102,0.0850,0.0322,0.0000
K,103,0.0900,0.0322,0.0000
K,104,0.0950,0.0322,0.0000
K,105,0.1000,0.0322,0.0000
K,106,0.0800,0.0312,0.0000
K,107,0.0850,0.0312,0.0000
K,108,0.0900,0.0312,0.0000
K,109,0.0950,0.0312,0.0000
K,110,0.1000,0.0312,0.0000
K,111,0.0800,0.0306,0.0000
K,112,0.0850,0.0306,0.0000
K,113,0.0900,0.0306,0.0000
K,114,0.0950,0.0306,0.0000
K,115,0.1000,0.0306,0.0000
K,116,0.0800,0.0300,0.0000
K,117,0.0850,0.0300,0.0000
K,118,0.0900,0.0300,0.0000
K,119,0.0950,0.0300,0.0000
K,120,0.1000,0.0300,0.0000
K,121,0.0000,0.0300-e,0.0000
K,122,0.1000,0.0300-e,0.0000

A,1,2,3,4 !A1
A,4,3,5,6 !A2
A,6,5,7,8 !A3
A,8,7,9,10 !A4
A,10,9,11,12 !A5
A,12,11,13,14 !A6
A,14,13,15,16 !A7
A,16,15,17,18 !A8
A,18,17,19,20 !A9
A,20,19,21,22 !A10
A,2,23,26,3 !A11
A,3,26,28,5 !A12
A,5,28,30,7 !A13
A,7,30,32,9 !A14
A,9,32,34,11 !A15
A,11,34,36,13 !A16
A,13,36,38,15 !A17
A,15,38,40,17 !A18
A,17,40,42,19 !A19
A,19,42,44,21 !A20
A,23,24,25,26 !A21
A,26,25,27,28 !A22
A,28,27,29,30 !A23
A,30,29,31,32 !A24
A,32,31,33,34 !A25
A,34,33,35,36 !A26
A,36,35,37,38 !A27
A,38,37,39,40 !A28
A,40,39,41,42 !A29
A,42,41,43,44 !A30
A,24,45,46,25 !A31
A,25,46,47,27 !A32
A,27,47,48,29 !A33
A,29,48,49,31 !A34
A,31,49,50,33 !A35
A,33,50,51,35 !A36
A,35,51,52,37 !A37
A,37,52,53,39 !A38
A,39,53,54,41 !A39
A,41,54,55,43 !A40
A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47

A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52
A,92,87,88,93 !A53
A,93,88,89,94 !A54
A,94,89,90,95 !A55
A,95,90,91,96 !A56
A,96,91,2,1 !A57
A,87,82,83,88 !A58
A,88,83,84,89 !A59
A,89,84,85,90 !A60
A,90,85,86,91 !A61
A,91,86,23,2 !A62
A,82,77,78,83 !A63
A,83,78,79,84 !A64
A,84,79,80,85 !A65
A,85,80,81,86 !A66
A,86,81,24,23 !A67
A,77,56,73,78 !A68
A,78,73,74,79 !A69
A,79,74,75,80 !A70
A,80,75,76,81 !A71
A,81,76,45,24 !A72
A,22,21,111,116 !A73
A,116,111,112,117!A74
A,117,112,113,118!A75
A,118,113,114,119!A76
A,119,114,115,120!A77
A,21,44,106,111 !A78
A,111,106,107,112!A79
A,112,107,108,113!A80
A,113,108,109,114!A81
A,114,109,110,115!A82
A,44,43,101,106 !A83
A,106,101,102,107!A84
A,107,102,103,108!A85
A,108,103,104,109!A86
A,109,104,105,110!A87
A,43,55,97,101 !A88
A,101,97,98,102 !A89
A,102,98,99,103 !A90
A,103,99,100,104 !A91
A,104,100,69,105 !A92
A,121,92,120,122 !A93

ASEL,ALL
AGLUE,ALL

!----- MESH -----

MAT,1
TYPE,1
MSHKEY,0
MSHAPE,0,2D
ESIZE,0.0025
AMESH,1,40

! Material 1
! Elemento tipo 1
! Tipo de malha
! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
! dimensão máxima dos elementos
! Mesh selected areas

MAT,2
TYPE,1
MSHKEY,0
MSHAPE,0,2D
ESIZE,0.004
ASEL,S,LOC,Y,0.0332,0.0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL

! Material 2
! Elemento tipo 1
! Tipo de malha
! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
! dimensão máxima dos elementos

MAT,2
TYPE,1
MSHKEY,0
MSHAPE,0,2D
ESIZE,0.01
ASEL,S,LOC,Y,0.0732,0.1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL

! Material 2
! Elemento tipo 1
! Tipo de malha
! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
! dimensão máxima dos elementos

```

MAT,2          ! Material 2
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,015    ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.1132,0.1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL

```

```

!AREAS ABAIXO DO LAMINADO
MAT,3          ! Material 3
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300-e,0.0300
AMESH,ALL
ASEL,ALL

```

```

!ÁREA À ESQUERDA DO LAMINADO
MAT,4          ! Material 4
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0000,0.0250
AMESH,ALL
ASEL,ALL

```

```

!ÁREA À DIREITA DO LAMINADO
MAT,4          ! Material 4
TYPE,1         ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0       ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D    ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0,0025   ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0750,0.100
AMESH,ALL
ASEL,ALL

```

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

!1-CFRP ; 2-Betão ; 3-silicato de cálcio ; 4-ar

```

MPTEMP          !MPDATA,C--> calor específico (J/kg.ºC)
MPTEMP,1,20,50,100,115,200,334
MPTEMP,7,354,400,491,518,800,1000

```

```

MPDATA,C,1,1,1287,1365,1494,1533,1753,2100
MPDATA,C,1,7,5000,4963,4890,1600,1717,1800

```

```

MPDATA,C,2,1,900,900,900,1470,1000,1067
MPDATA,C,2,7,1077,1100,1100,1100,1100,1100

```

```

MPDATA,C,3,1,687.3,763.3,820.8,832.4,878.2,920.7
MPDATA,C,3,7,925.6,935.7,952.7,957.1,993.2,1011.7

```

```

MPDATA,C,4,1,1004.6,1006.2,1010.4,1012.1,1024.7,1052.8
MPDATA,C,4,7,1057.5,1068.5,1090.3,1096.6,1154.2,1184.8

```

```

MPTEMP          !MPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/m°C)
MPTEMP,1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,1,1,1.364,0.971,0.262,0.205,0.173,0.173
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595
MPDATA,KXX,3,1,0.164,0.164,0.164,0.164,0.164,0.164
MPDATA,KXX,4,1,0.026,0.039,0.058,0.060,0.072,0.079

```

```

MPTEMP          !MPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1,20,115,120,200,300,400,
MPTEMP, 7,500,528,600,650,700,740,
MPTEMP, 13,784,1000
MPDATA,DENS,1,1,1550,1546,1543,1540,1532,1411
MPDATA,DENS,1,7,1318,1304,1252,1194,1023,761
MPDATA,DENS,1,13,1,1

```

MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2375,2352,2316,2280
MPDATA,DENS,2,7,2259,2253,2238,2228,2217,2209
MPDATA,DENS,2,13,2199,2154
MPDATA,DENS,3,1,870,843.9,825.6,817.8,802.1,771.7
MPDATA,DENS,3,7,757.8,753.4,736.9,724.7,710.8,707.3
MPDATA,DENS,3,13,706.4,705.6
MPDATA,DENS,4,1,1.207,0.911,0.818,0.748,0.617,0.525
MPDATA,DENS,4,7,0.457,0.441,0.405,0.383,0.363,0.349
MPDATA,DENS,4,13,0.334,0.277

MPTEMP !MPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP,1,20,1000
MPDATA,EMIS,1,1,0.875,0.875
MPDATA,EMIS,2,1,0.7,0.7
MPDATA,EMIS,3,1,0.75,0.95

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,28 !Associa Temperatura inicial a todos os nós(temperatura ambiente)
TYPE,2
REAL,2
MAT,2

! --- Face fria ---

NSEL,S,LOC,Y,0.1532 !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100000,0.05,0.2032 !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
ESURF,100000 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico,

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face fria
SFE,ALL,1,CONV,0,10 !Temperatura no nó extra de radiação
D,100000,TEMP,bftcold

! --- Face quente ---

TYPE,2
REAL,2
MAT,3
MAT,2
MAT,1

NSEL,S,LOC,Y,0.0300-e !selecionar face inferior da protecção
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100001,0.05,0.0300-e-0.05 !Nó extra para radiação
ESURF,100001 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face quente
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot%

D,100001,TEMP,%bftbot% !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
ALLSEL,ALL

STEF,5.67e-8 !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
FINISH

!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

/CONFIG, NRES, 1000000

/SOLU

SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM ! Activar os efeitos térmicos
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8 ! Limites de convergência
NEQIT,100 ! Número máximo de iterações
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
FINISH

Viga SC40

/TITLE, Viga SC40

!-----VARIÁVEIS E CONSTANTES-----

/PREP7
/UNITS,SI

TOFFST,274 ! Conversão de Kelvin para graus Celsius
! Unidades: m, °C, kg, s, J, Pa
DIM,hfhot,TABLE,4,,,TEMP ! Coeficiente de convecção na face quente (w/m^2°C)
hfhot(1,0)=20,1000
hfhot(1,1)= 5, 50

*DIM,bftbot,TABLE,12,,,TIME !Curva ISO 834
bftbot(1,0)= 60,180,360,600,1200,1800,2400,3600,5400,7200
bftbot(1,1)=349,502,603,678, 781, 842, 885, 945,1006,1049

bftcold = 20 ! Temperatura ambiente

*SET,totaltime,10920 ! Tempo de exposição ao fogo
*SET,timestep,10
*SET,numstep,totaltime/timestep
*SET,minsteps,1
*SET,maxsteps,1000
*SET,iters,10
*SET,apprate,timestep

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS-----

ET,1,PLANE55	! Elemento térmico plano (2D)
ET,2,SURF151,,,1,1	! Elemento de superfície plana com efeito térmico
KEYOPT,2,5,1	! Nó extra para cálculo de radiação e/ou convecção
KEYOPT,2,6,0	! Nó extra usado como "bulk temperature"
KEYOPT,2,8,2	! Avalia o coeficiente de convecção da face quente
KEYOPT,2,9,1	! Opção de radiação

!-----GEOMETRIA-----

e=0.040 !e=espessura da protecção de SC (medida a partir da fibra inferior do laminado)

K,1,0.0250,0.0300,0.0000
K,2,0.0250,0.0306,0.0000
K,3,0.0300,0.0306,0.0000
K,4,0.0300,0.0300,0.0000
K,5,0.0350,0.0306,0.0000
K,6,0.0350,0.0300,0.0000
K,7,0.0400,0.0306,0.0000
K,8,0.0400,0.0300,0.0000
K,9,0.0450,0.0306,0.0000
K,10,0.0450,0.0300,0.0000
K,11,0.0500,0.0306,0.0000
K,12,0.0500,0.0300,0.0000
K,13,0.0550,0.0306,0.0000
K,14,0.0550,0.0300,0.0000
K,15,0.0600,0.0306,0.0000
K,16,0.0600,0.0300,0.0000
K,17,0.0650,0.0306,0.0000
K,18,0.0650,0.0300,0.0000
K,19,0.0700,0.0306,0.0000
K,20,0.0700,0.0300,0.0000
K,21,0.0750,0.0306,0.0000
K,22,0.0750,0.0300,0.0000
K,23,0.0250,0.0312,0.0000
K,24,0.0250,0.0322,0.0000
K,25,0.0300,0.0322,0.0000
K,26,0.0300,0.0312,0.0000
K,27,0.0350,0.0322,0.0000
K,28,0.0350,0.0312,0.0000
K,29,0.0400,0.0322,0.0000
K,30,0.0400,0.0312,0.0000
K,31,0.0450,0.0322,0.0000
K,32,0.0450,0.0312,0.0000
K,33,0.0500,0.0322,0.0000

K,34,0.0500,0.0312,0.0000
K,35,0.0550,0.0322,0.0000
K,36,0.0550,0.0312,0.0000
K,37,0.0600,0.0322,0.0000
K,38,0.0600,0.0312,0.0000
K,39,0.0650,0.0322,0.0000
K,40,0.0650,0.0312,0.0000
K,41,0.0700,0.0322,0.0000
K,42,0.0700,0.0312,0.0000
K,43,0.0750,0.0322,0.0000
K,44,0.0750,0.0312,0.0000
K,45,0.0250,0.0332,0.0000
K,46,0.0300,0.0332,0.0000
K,47,0.0350,0.0332,0.0000
K,48,0.0400,0.0332,0.0000
K,49,0.0450,0.0332,0.0000
K,50,0.0500,0.0332,0.0000
K,51,0.0550,0.0332,0.0000
K,52,0.0600,0.0332,0.0000
K,53,0.0650,0.0332,0.0000
K,54,0.0700,0.0332,0.0000
K,55,0.0750,0.0332,0.0000
K,56,0.0000,0.0332,0.0000
K,57,0.0000,0.0732,0.0000
K,58,0.0000,0.1132,0.0000
K,59,0.0000,0.1532,0.0000
K,60,0.0250,0.0732,0.0000
K,61,0.0250,0.1132,0.0000
K,62,0.0250,0.1532,0.0000
K,63,0.0500,0.0732,0.0000
K,64,0.0500,0.1132,0.0000
K,65,0.0500,0.1532,0.0000
K,66,0.0750,0.0732,0.0000
K,67,0.0750,0.1132,0.0000
K,68,0.0750,0.1532,0.0000
K,69,0.1000,0.0332,0.0000
K,70,0.1000,0.0732,0.0000
K,71,0.1000,0.1132,0.0000
K,72,0.1000,0.1532,0.0000
K,73,0.0050,0.0332,0.0000
K,74,0.0100,0.0332,0.0000
K,75,0.0150,0.0332,0.0000
K,76,0.0200,0.0332,0.0000
K,77,0.0000,0.0322,0.0000
K,78,0.0050,0.0322,0.0000
K,79,0.0100,0.0322,0.0000
K,80,0.0150,0.0322,0.0000
K,81,0.0200,0.0322,0.0000
K,82,0.0000,0.0312,0.0000
K,83,0.0050,0.0312,0.0000
K,84,0.0100,0.0312,0.0000
K,85,0.0150,0.0312,0.0000
K,86,0.0200,0.0312,0.0000
K,87,0.0000,0.0306,0.0000
K,88,0.0050,0.0306,0.0000
K,89,0.0100,0.0306,0.0000
K,90,0.0150,0.0306,0.0000
K,91,0.0200,0.0306,0.0000
K,92,0.0000,0.0300,0.0000
K,93,0.0050,0.0300,0.0000
K,94,0.0100,0.0300,0.0000
K,95,0.0150,0.0300,0.0000
K,96,0.0200,0.0300,0.0000
K,97,0.0800,0.0332,0.0000
K,98,0.0850,0.0332,0.0000
K,99,0.0900,0.0332,0.0000
K,100,0.0950,0.0332,0.0000
K,101,0.0800,0.0322,0.0000
K,102,0.0850,0.0322,0.0000
K,103,0.0900,0.0322,0.0000
K,104,0.0950,0.0322,0.0000
K,105,0.1000,0.0322,0.0000
K,106,0.0800,0.0312,0.0000
K,107,0.0850,0.0312,0.0000
K,108,0.0900,0.0312,0.0000
K,109,0.0950,0.0312,0.0000

K,110,0.1000,0.0312,0.0000
K,111,0.0800,0.0306,0.0000
K,112,0.0850,0.0306,0.0000
K,113,0.0900,0.0306,0.0000
K,114,0.0950,0.0306,0.0000
K,115,0.1000,0.0306,0.0000
K,116,0.0800,0.0300,0.0000
K,117,0.0850,0.0300,0.0000
K,118,0.0900,0.0300,0.0000
K,119,0.0950,0.0300,0.0000
K,120,0.1000,0.0300,0.0000
K,121,0.0000,0.0300-e,0.0000
K,122,0.1000,0.0300-e,0.0000

A,1,2,3,4 !A1
A,4,3,5,6 !A2
A,6,5,7,8 !A3
A,8,7,9,10 !A4
A,10,9,11,12 !A5
A,12,11,13,14 !A6
A,14,13,15,16 !A7
A,16,15,17,18 !A8
A,18,17,19,20 !A9
A,20,19,21,22 !A10
A,2,23,26,3 !A11
A,3,26,28,5 !A12
A,5,28,30,7 !A13
A,7,30,32,9 !A14
A,9,32,34,11 !A15
A,11,34,36,13 !A16
A,13,36,38,15 !A17
A,15,38,40,17 !A18
A,17,40,42,19 !A19
A,19,42,44,21 !A20
A,23,24,25,26 !A21
A,26,25,27,28 !A22
A,28,27,29,30 !A23
A,30,29,31,32 !A24
A,32,31,33,34 !A25
A,34,33,35,36 !A26
A,36,35,37,38 !A27
A,38,37,39,40 !A28
A,40,39,41,42 !A29
A,42,41,43,44 !A30
A,24,45,46,25 !A31
A,25,46,47,27 !A32
A,27,47,48,29 !A33
A,29,48,49,31 !A34
A,31,49,50,33 !A35
A,33,50,51,35 !A36
A,35,51,52,37 !A37
A,37,52,53,39 !A38
A,39,53,54,41 !A39
A,41,54,55,43 !A40
A,56,57,60,45 !A41
A,45,60,63,50 !A42
A,50,63,66,55 !A43
A,55,66,70,69 !A44
A,57,58,61,60 !A45
A,60,61,64,63 !A46
A,63,64,67,66 !A47
A,66,67,71,70 !A48
A,58,59,62,61 !A49
A,61,62,65,64 !A50
A,64,65,68,67 !A51
A,67,68,72,71 !A52
A,92,87,88,93 !A53
A,93,88,89,94 !A54
A,94,89,90,95 !A55
A,95,90,91,96 !A56
A,96,91,2,1 !A57
A,87,82,83,88 !A58
A,88,83,84,89 !A59
A,89,84,85,90 !A60
A,90,85,86,91 !A61
A,91,86,23,2 !A62

A,82,77,78,83 !A63
A,83,78,79,84 !A64
A,84,79,80,85 !A65
A,85,80,81,86 !A66
A,86,81,24,23 !A67
A,77,56,73,78 !A68
A,78,73,74,79 !A69
A,79,74,75,80 !A70
A,80,75,76,81 !A71
A,81,76,45,24 !A72
A,22,21,111,116 !A73
A,116,111,112,117!A74
A,117,112,113,118!A75
A,118,113,114,119!A76
A,119,114,115,120!A77
A,21,44,106,111 !A78
A,111,106,107,112!A79
A,112,107,108,113!A80
A,113,108,109,114!A81
A,114,109,110,115!A82
A,44,43,101,106 !A83
A,106,101,102,107!A84
A,107,102,103,108!A85
A,108,103,104,109!A86
A,109,104,105,110!A87
A,43,55,97,101 !A88
A,101,97,98,102 !A89
A,102,98,99,103 !A90
A,103,99,100,104 !A91
A,104,100,69,105 !A92
A,121,92,120,122 !A93

ASEL,ALL
AGLUE,ALL

!----- MESH -----

MAT,1 ! Material 1
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025 ! dimensão máxima dos elementos
AMESH,1,40 ! Mesh selected areas

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.004 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0332,0.0732
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.01 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0732,0.1132
AMESH,ALL
ASEL,ALL

MAT,2 ! Material 2
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.015 ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.1132,0.1532
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!AREAS ABAIXO DO LAMINADO

MAT,3 ! Material 3
TYPE,1 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0 ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)

```

ESIZE,0.0025          ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300-e,0.0300
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!ÁREA À ESQUERDA DO LAMINADO
MAT,4                  ! Material 4
TYPE,1                 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0               ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D             ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025           ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0000,0.0250
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!ÁREA À DIREITA DO LAMINADO
MAT,4                  ! Material 4
TYPE,1                 ! Elemento tipo 1
MSHKEY,0               ! Tipo de malha
MSHAPE,0,2D             ! Elementos quadrangulares (1 para triangulares)
ESIZE,0.0025           ! dimensão máxima dos elementos
ASEL,S,LOC,Y,0.0300,0.0332
ASEL,R,LOC,X,0.0750,0.100
AMESH,ALL
ASEL,ALL

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----
!1-CFRP ; 2-Betão ; 3-silicato de cálcio ; 4-ar

MPTEMP                 !IMPDATA,C--> calor específico (J/kg.ºC)
MPTEMP,1,20,50,100,115,200,334
MPTEMP,7,354,400,491,518,800,1000

MPDATA,C,1,1,1287,1365,1494,1533,1753,2100
MPDATA,C,1,7,5000,4963,4890,1600,1717,1800

MPDATA,C,2,1,900,900,900,1470,1000,1067
MPDATA,C,2,7,1077,1100,1100,1100,1100,1100

MPDATA,C,3,1,687.3,763.3,820.8,832.4,878.2,920.7
MPDATA,C,3,7,925.6,935.7,952.7,957.1,993.2,1011.7

MPDATA,C,4,1,1004.6,1006.2,1010.4,1012.1,1024.7,1052.8
MPDATA,C,4,7,1057.5,1068.5,1090.3,1096.6,1154.2,1184.8

MPTEMP                 !IMPDATA,KXX --> Condutibilidade térmica (w/mºC)
MPTEMP,1,20,200,524,565,815,1000
MPDATA,KXX,1,1,1.364,0.971,0.262,0.205,0.173,0.173
MPDATA,KXX,2,1,1.642,1.332,0.907,0.865,0.672,0.595
MPDATA,KXX,3,1,0.164,0.164,0.164,0.164,0.164,0.164
MPDATA,KXX,4,1,0.026,0.039,0.058,0.060,0.072,0.079

MPTEMP                 !IMPDATA,DENS --> densidade (kg/m^3)
MPTEMP, 1.20,115,120,200,300,400,
MPTEMP, 7,500,528,600,650,700,740,
MPTEMP, 13,784,1000
MPDATA,DENS,1,1,1550,1546,1543,1540,1532,1411
MPDATA,DENS,1,7,1318,1304,1252,1194,1023,761
MPDATA,DENS,1,13,1,1
MPDATA,DENS,2,1,2400,2400,2375,2352,2316,2280
MPDATA,DENS,2,7,2259,2253,2238,2228,2217,2209
MPDATA,DENS,2,13,2199,2154
MPDATA,DENS,3,1,870,843.9,825.6,817.8,802.1,771.7
MPDATA,DENS,3,7,757.8,753.4,736.9,724.7,710.8,707.3
MPDATA,DENS,3,13,706.4,705.6
MPDATA,DENS,4,1,1.207,0.911,0.818,0.748,0.617,0.525
MPDATA,DENS,4,7,0.457,0.441,0.405,0.383,0.363,0.349
MPDATA,DENS,4,13,0.334,0.277

MPTEMP                 !IMPDATA,EMIS --> emissividade
MPTEMP,1,20,1000
MPDATA,EMIS,1,1,0.875,0.875
MPDATA,EMIS,2,1,0.7,0.7
MPDATA,EMIS,3,1,0.75,0.95

```

!-----APLICAR CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA-----

TUNIF,24 !Associa Temperatura inicial a todos os nós(temperatura ambiente)
TYPE,2
REAL,2
MAT,2

! --- Face fria ---

NSEL,S,LOC,Y,0.1532 !selecionar nós da face superior da viga
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100000,0.05,0.2032 !Nó extra para radiação, numeração e respectivas coordenadas
ESURF,100000 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico,

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face fria
SFE,ALL,1,CONV,0,10 !Temperatura no nó extra de radiação
D,100000,TEMP,bftcold

! --- Face quente ---

TYPE,2
REAL,2
MAT,3
MAT,2
MAT,1

NSEL,S,LOC,Y,0.0300-e !selecionar face inferior da protecção
ESLN,S !selecionar os elementos "agarrados" aos nós selecionados
N,100001,0.05,0.0300-e-0.05 !Nó extra para radiação
ESURF,100001 !Elemento SURF151 superfície com efeito térmico

ESEL,S,TYPE,,2 !Convecção na face quente
SFE,ALL,1,CONV,0,%hfhot%

D,100001,TEMP,%bftbot% !Temperatura no nó extra de radiação (simulação da curva ISO 834)
ALLSEL,ALL

STEF,5.67e-8 !Constante de Stefan-Boltzmann (w/m^2°C)
FINISH

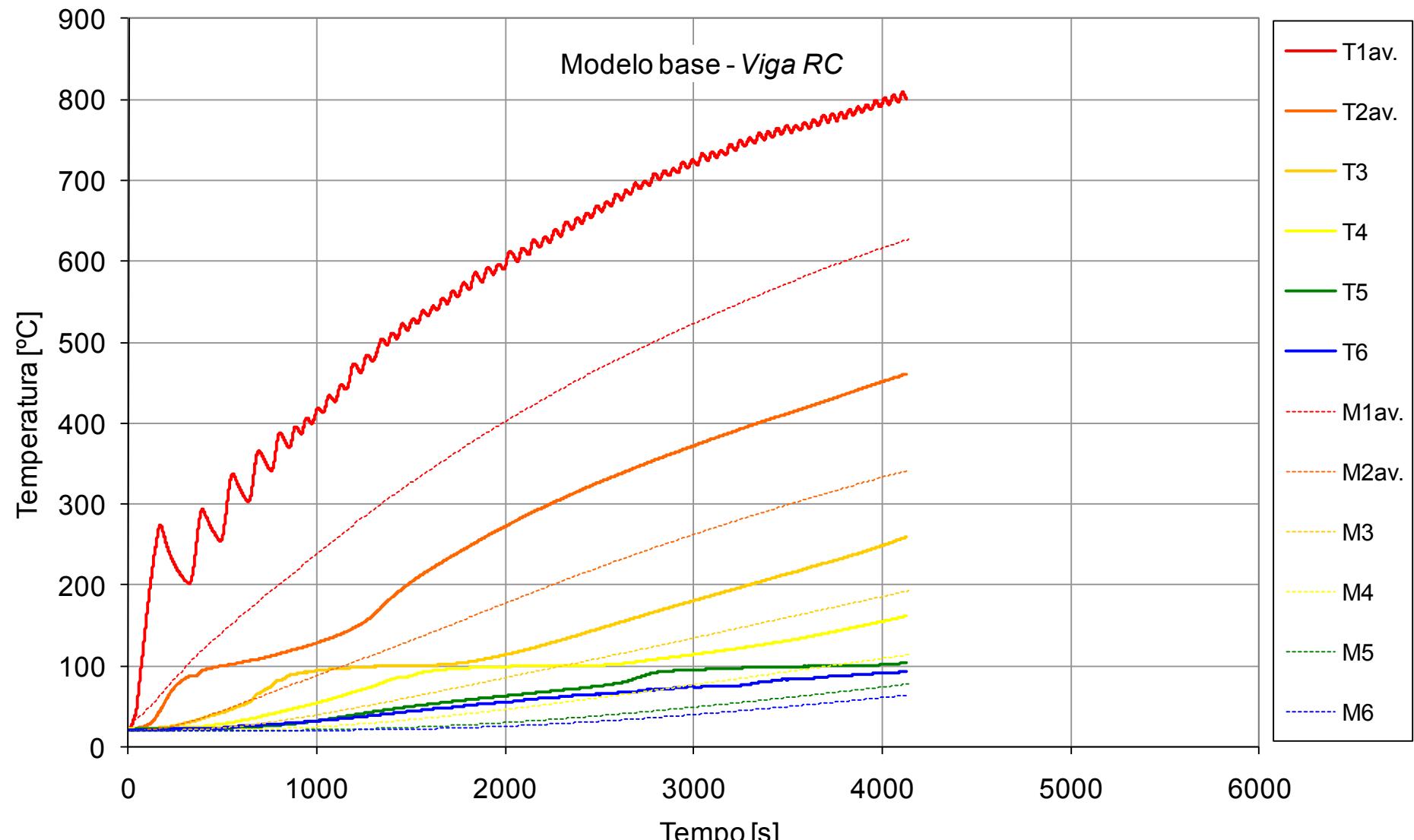
!-----SOLUÇÃO NÃO LINEAR-----

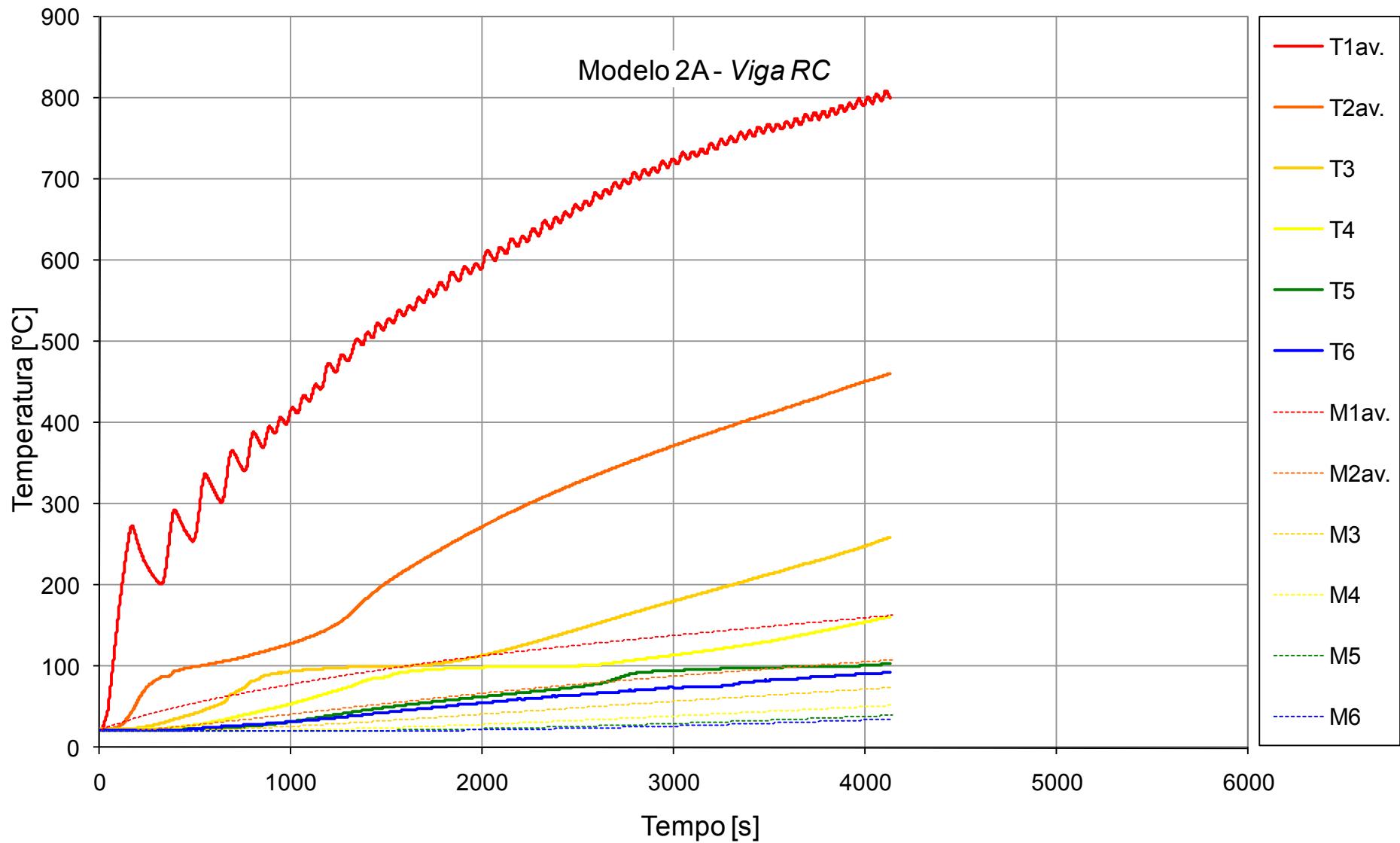
/CONFIG, NRES, 1000000

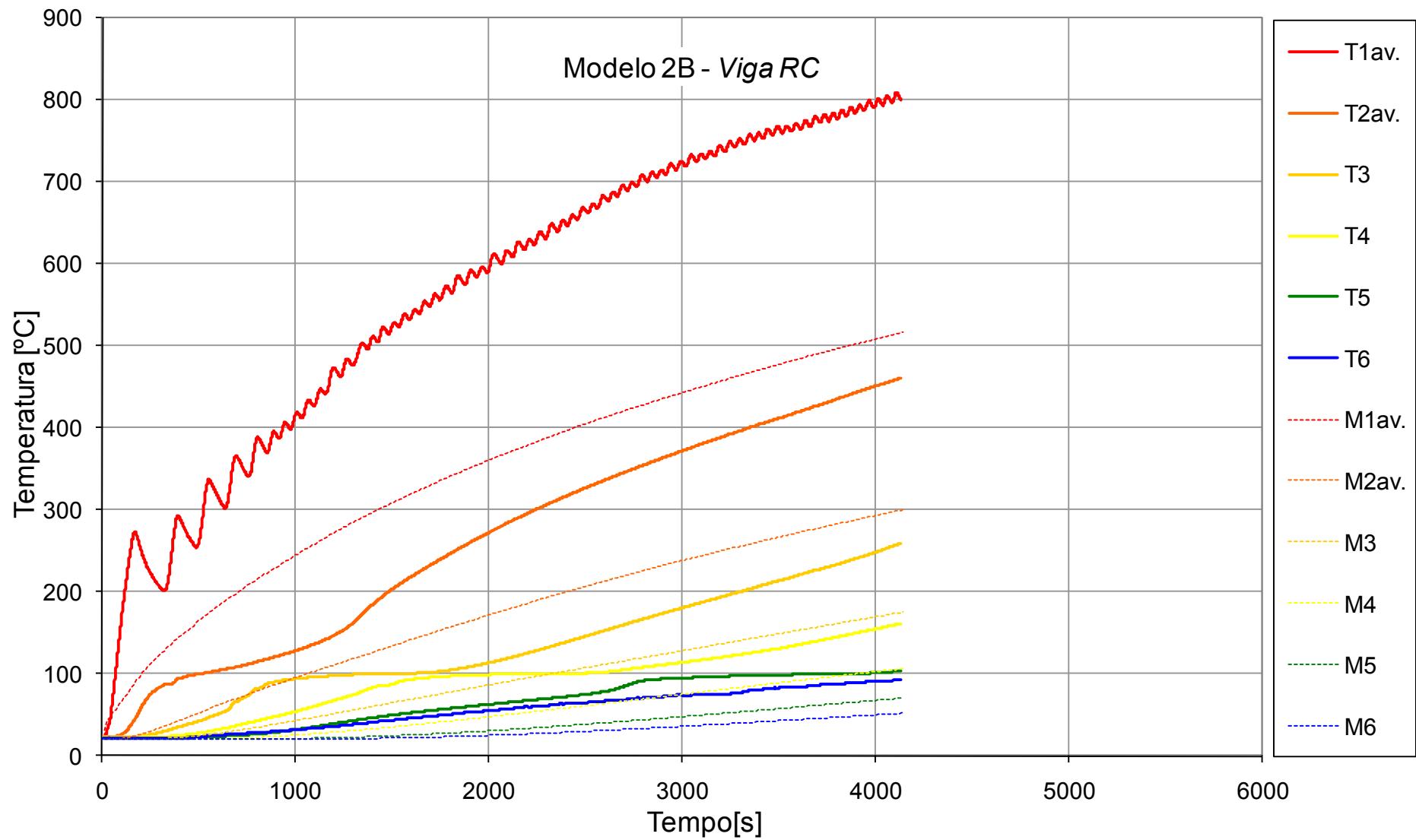
/SOLU

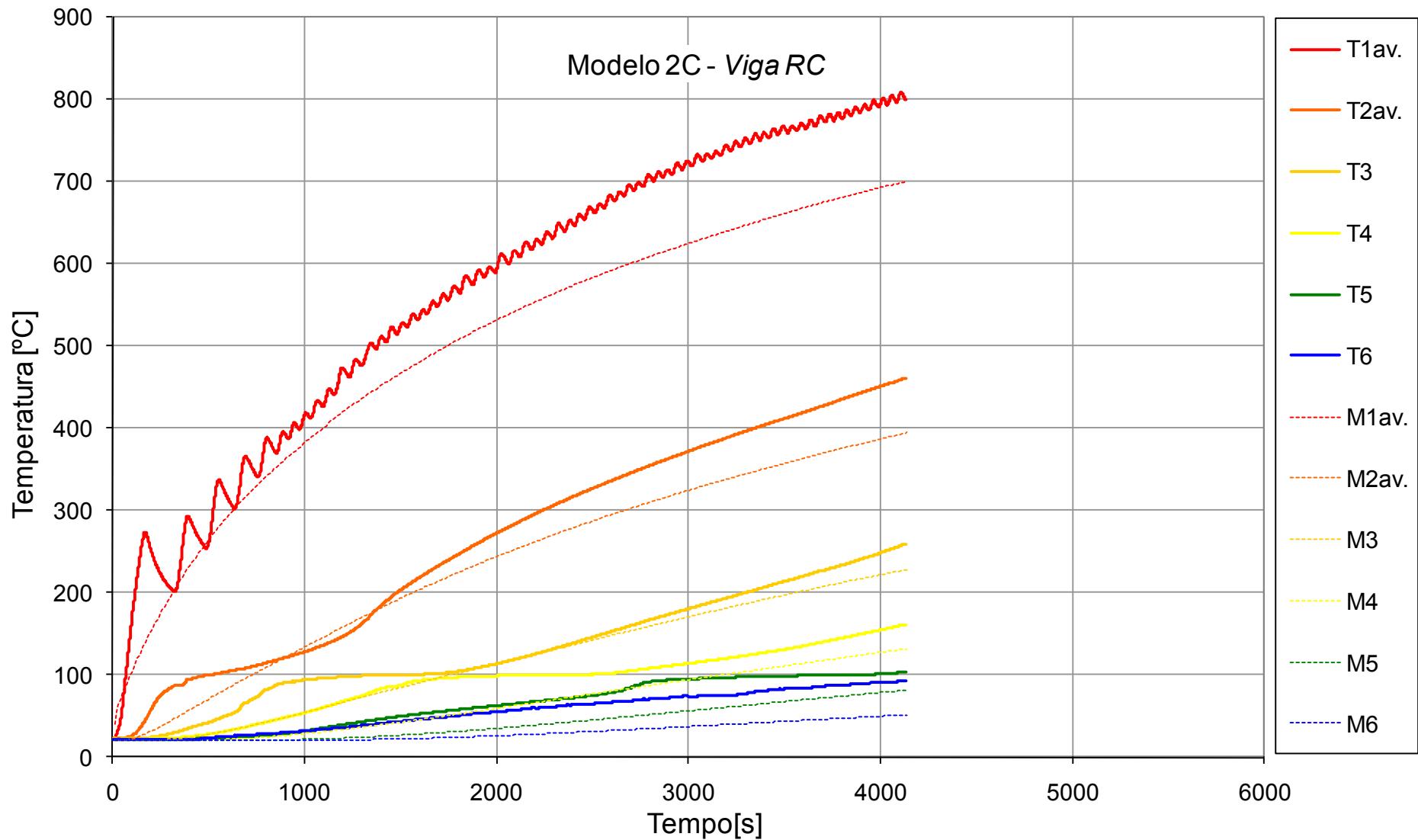
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,THERM ! Activar os efeitos térmicos
CNVTOL,HEAT,,1E-5,2,5E-8 ! Limites de convergência
NEQIT,100 ! Número máximo de iterações
NSUBST,numstep
KBC,1
TIME,totaltime
AUTOTS,OFF
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
FINISH

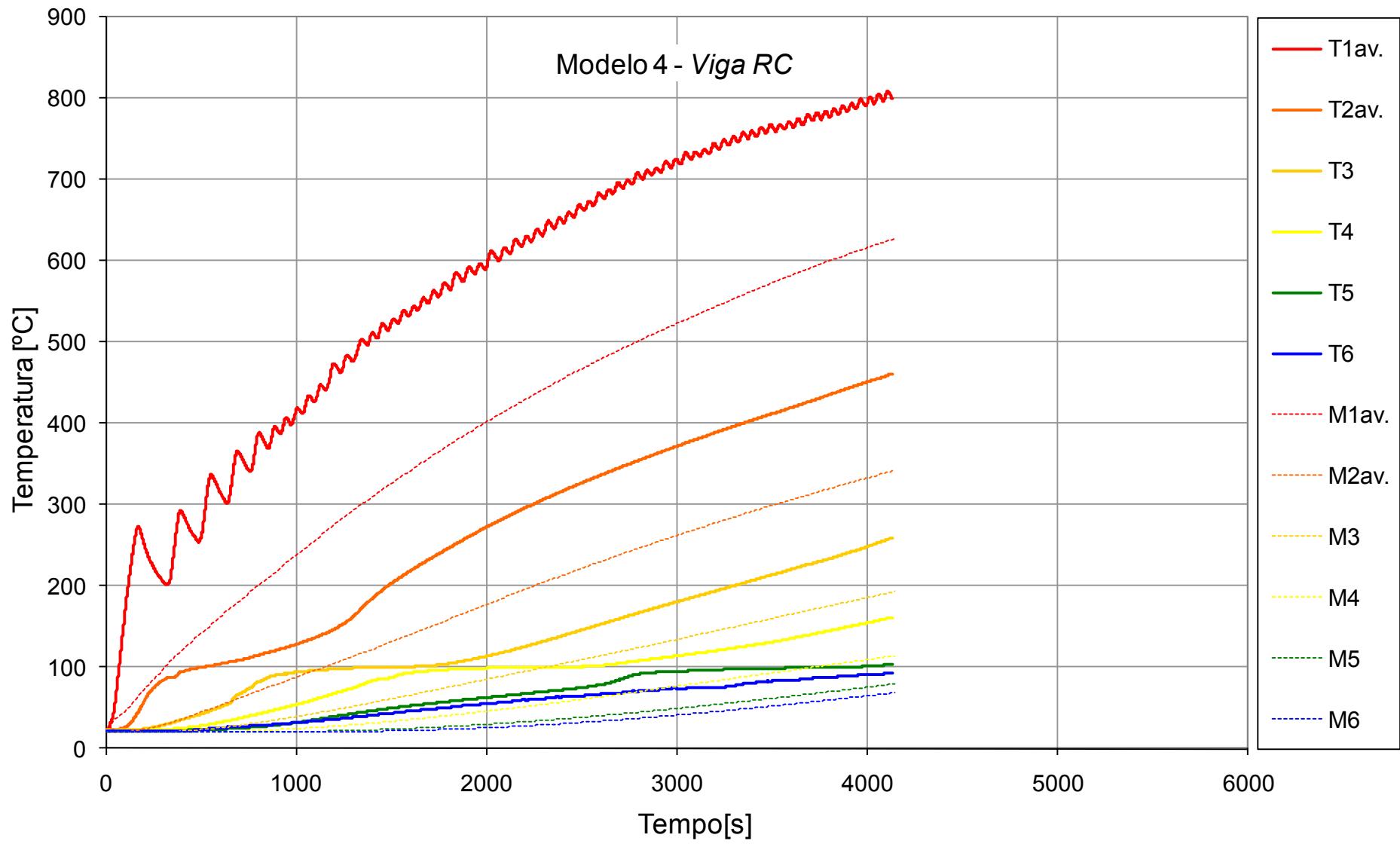
Anexo VI. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos obtidos nos estudos paramétricos na viga RC

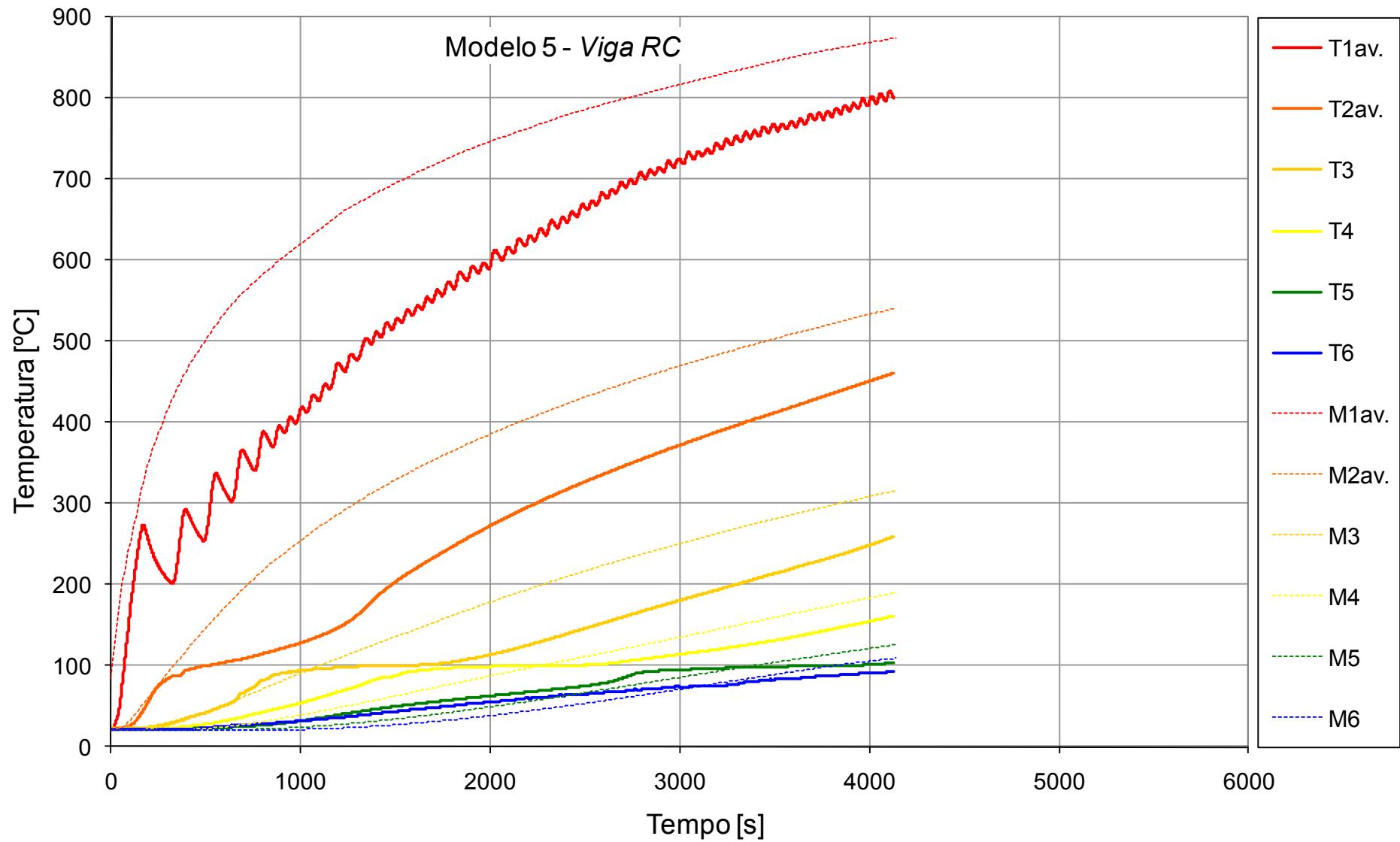




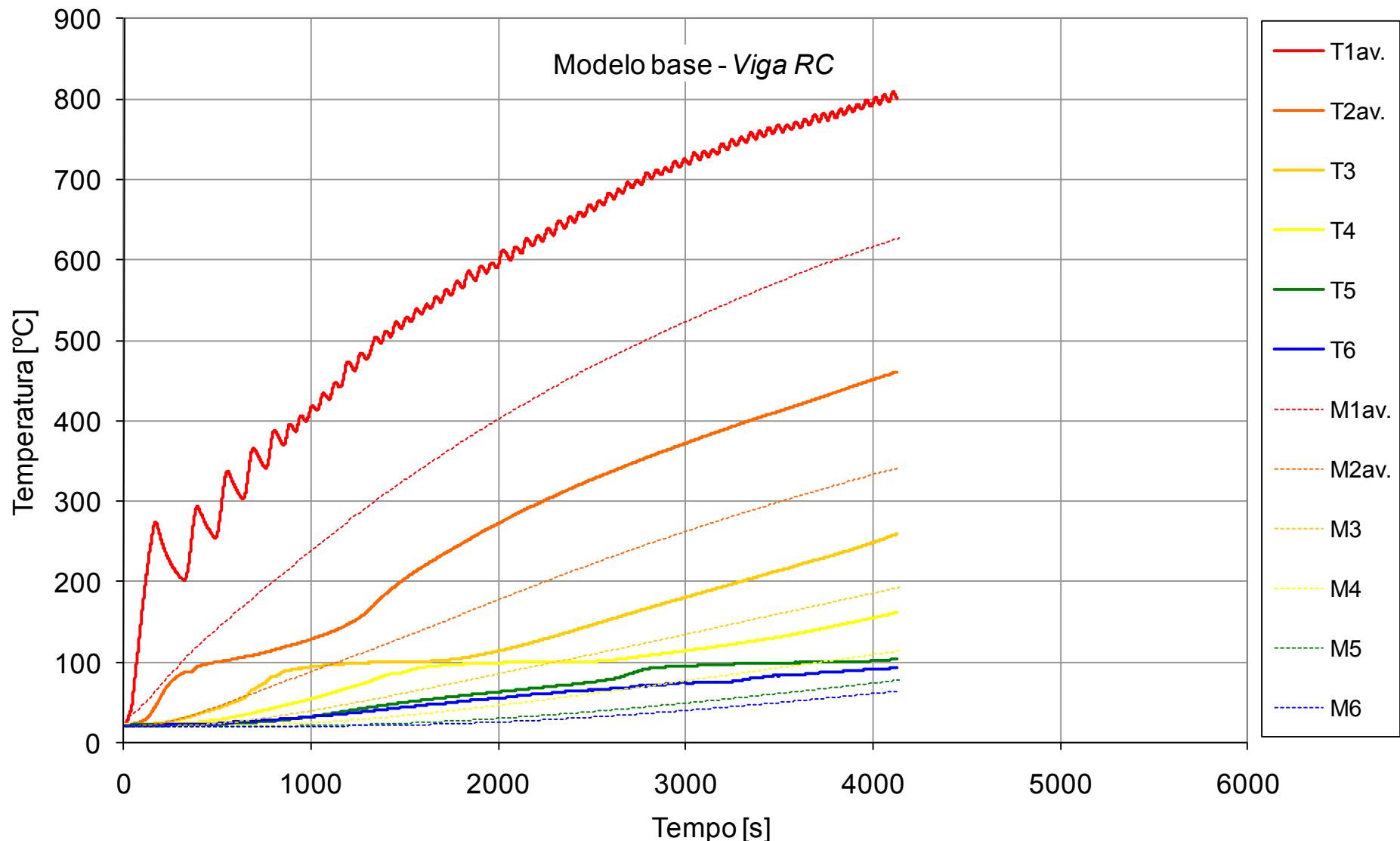


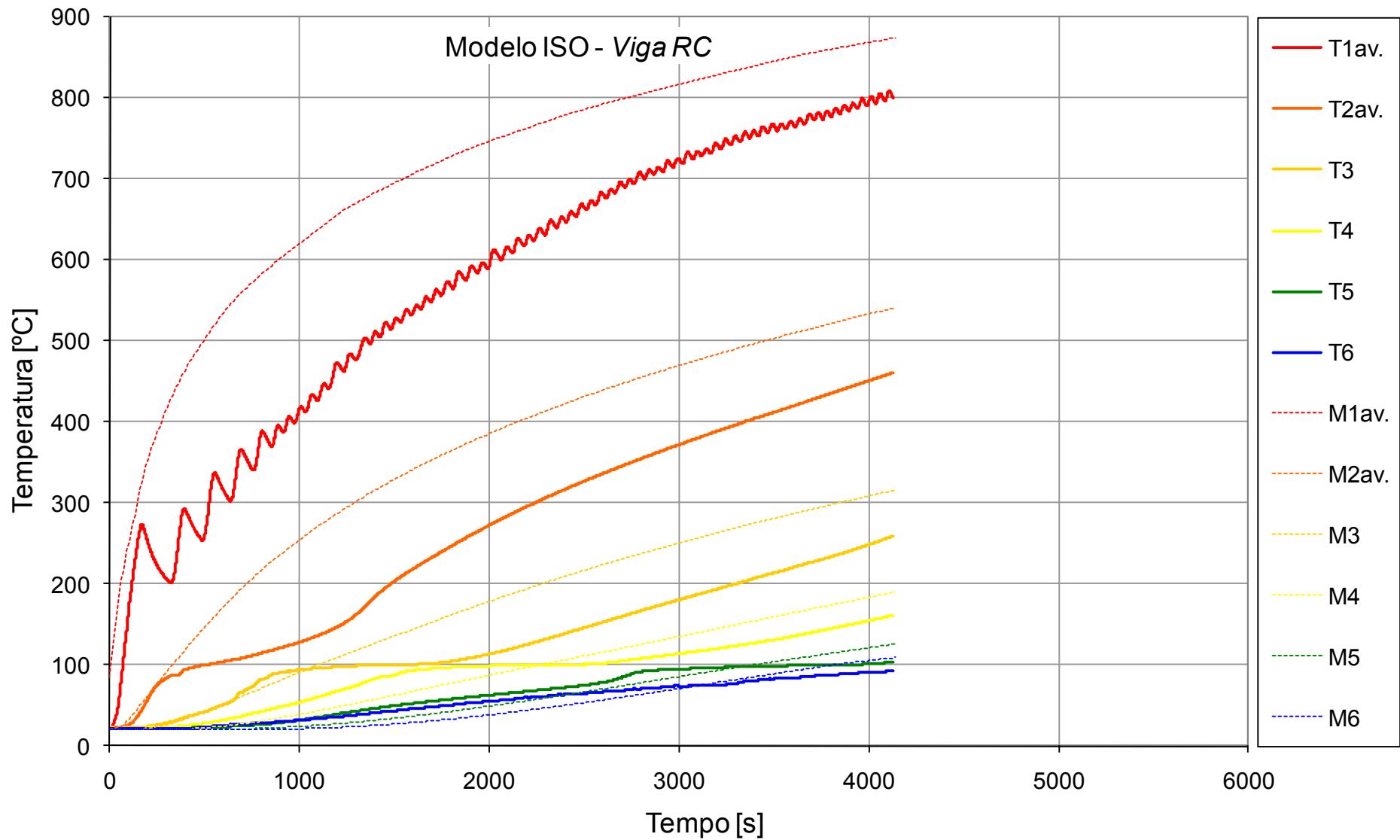


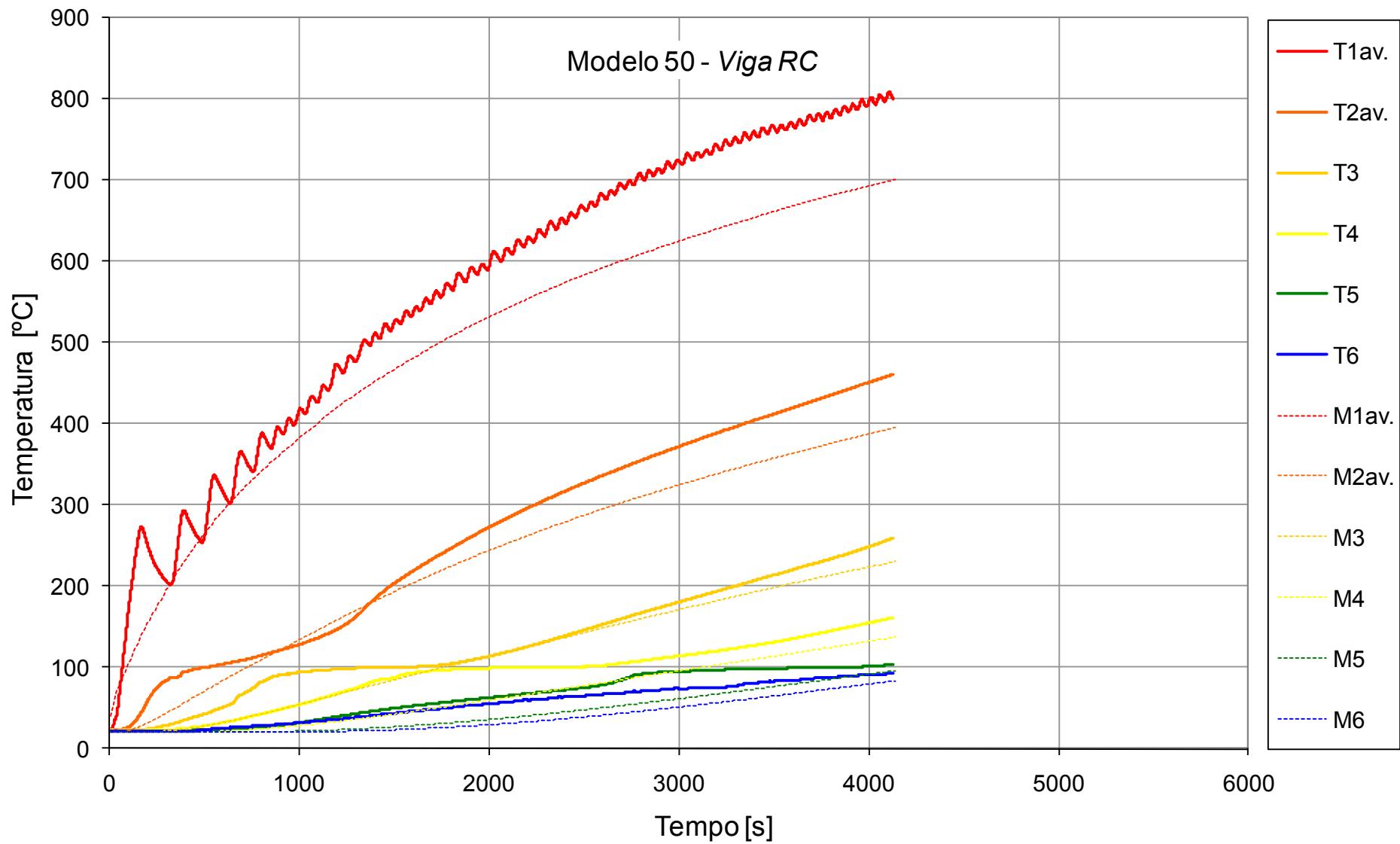




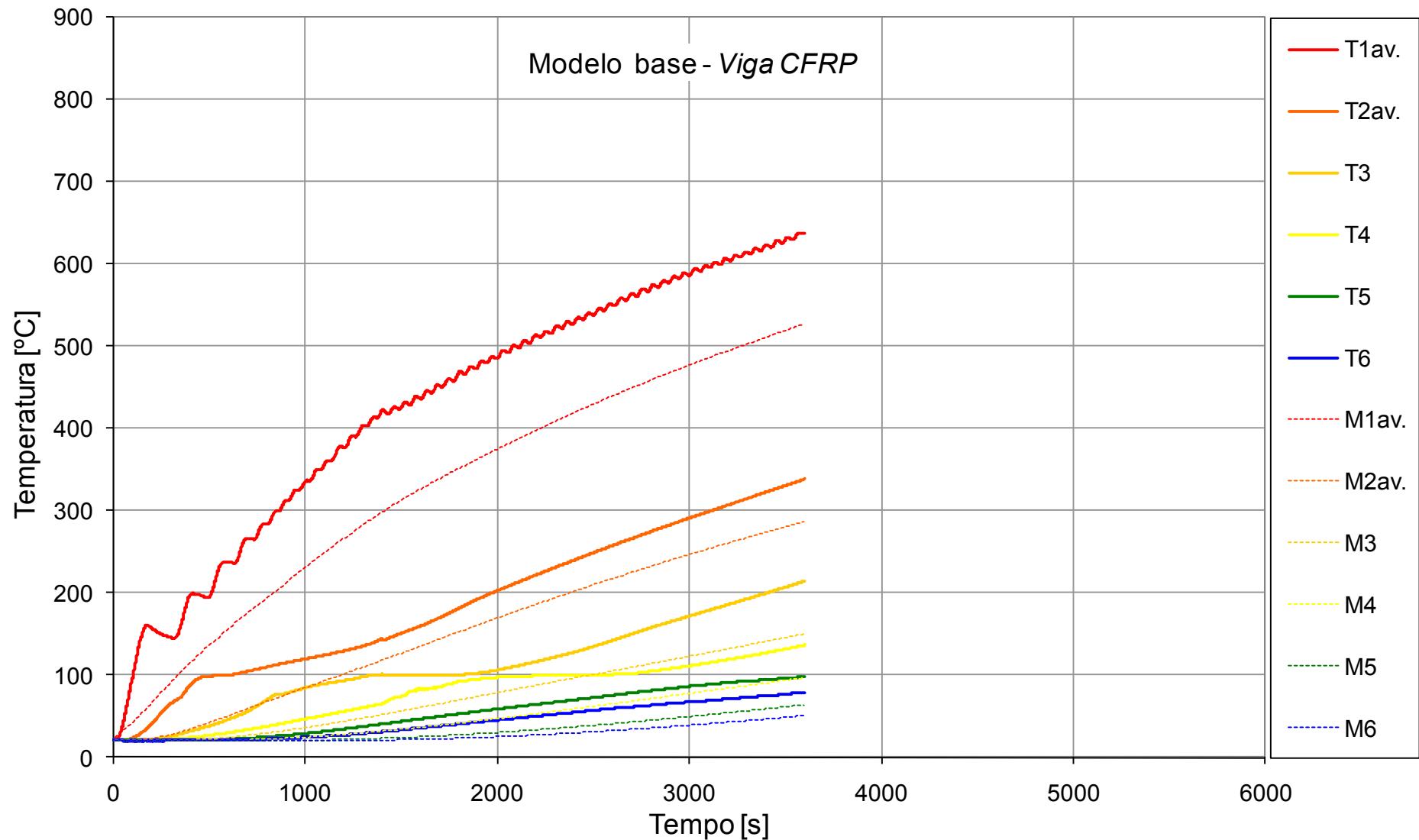
Anexo VII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga RC

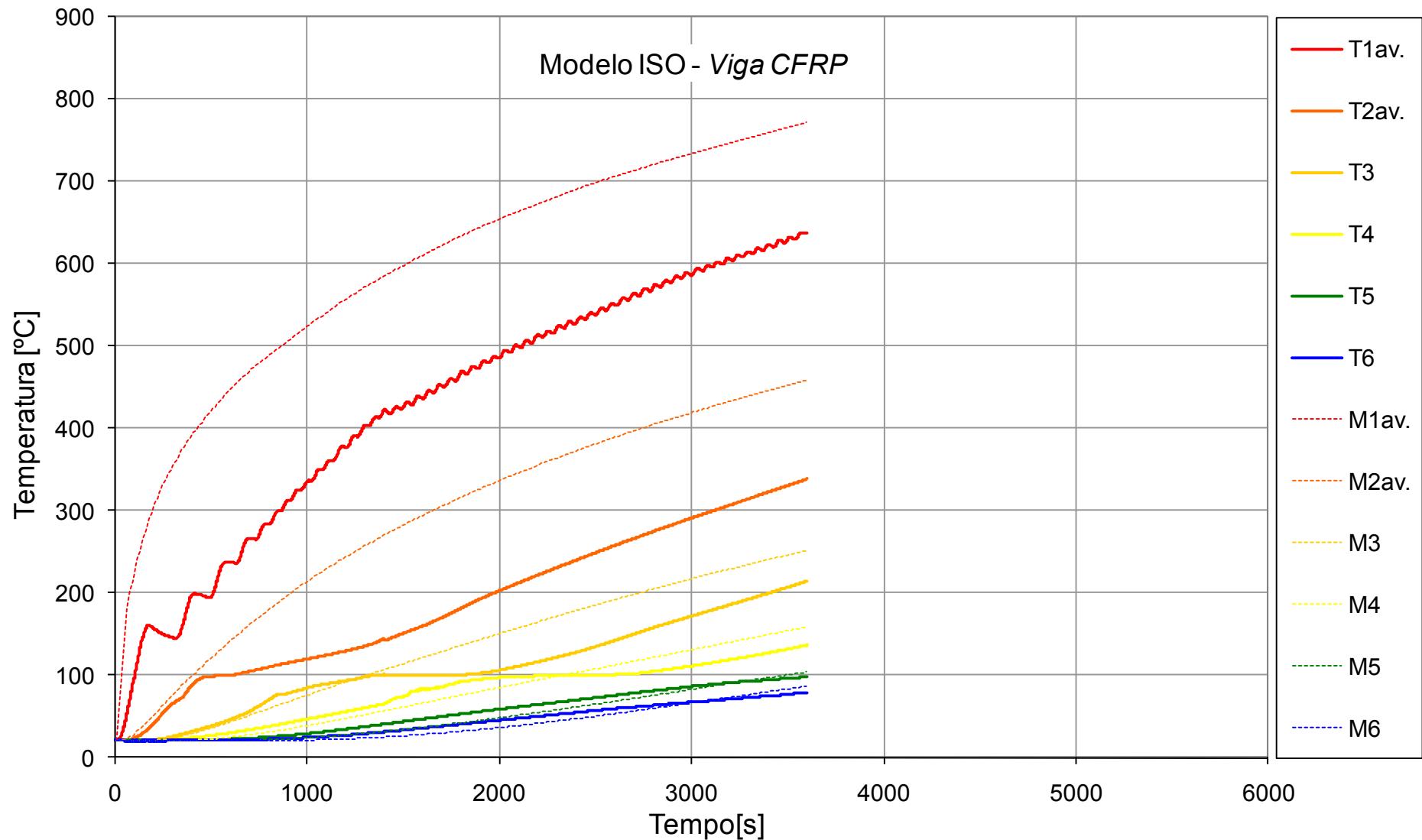


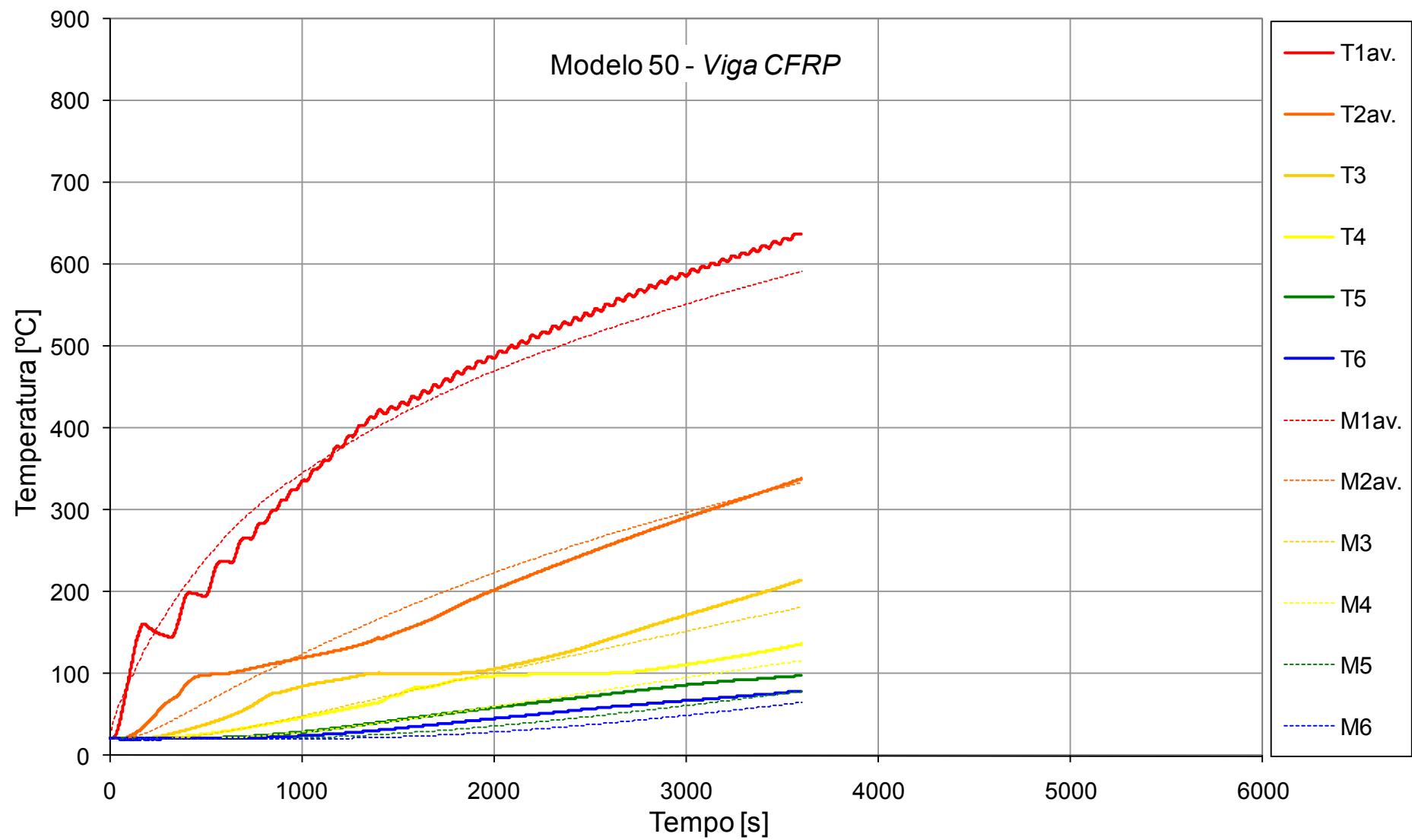




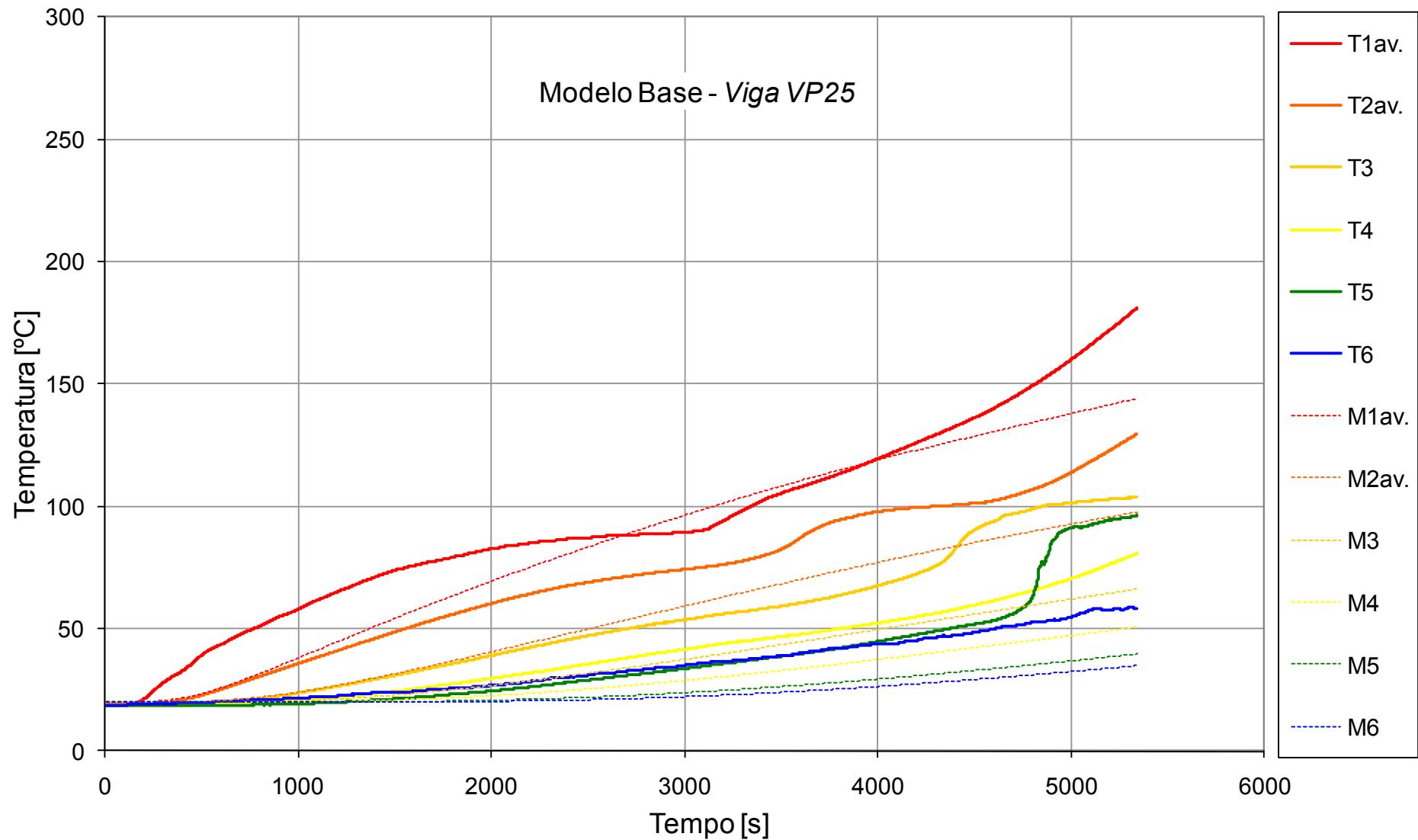
Anexo VIII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga CFRP

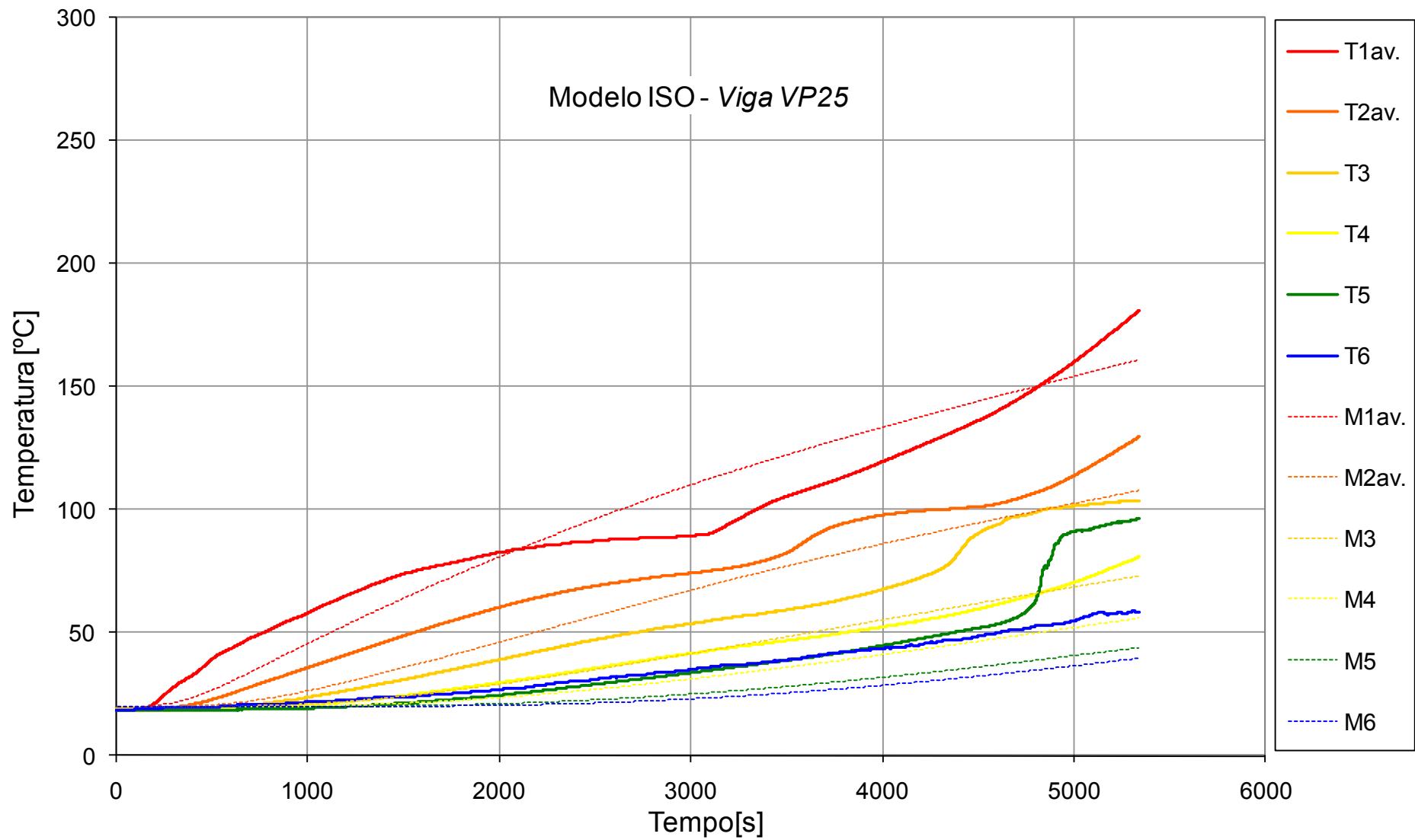


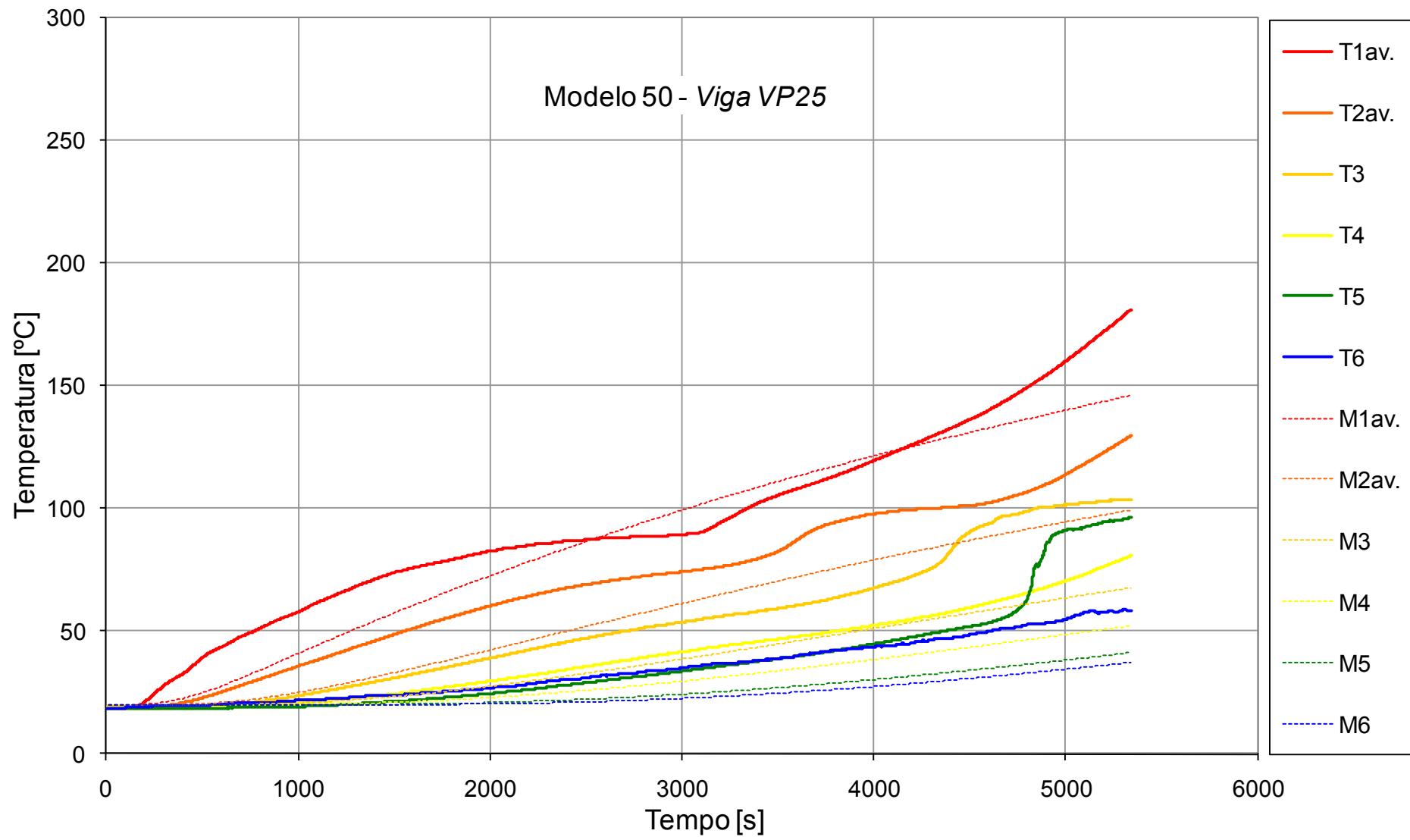




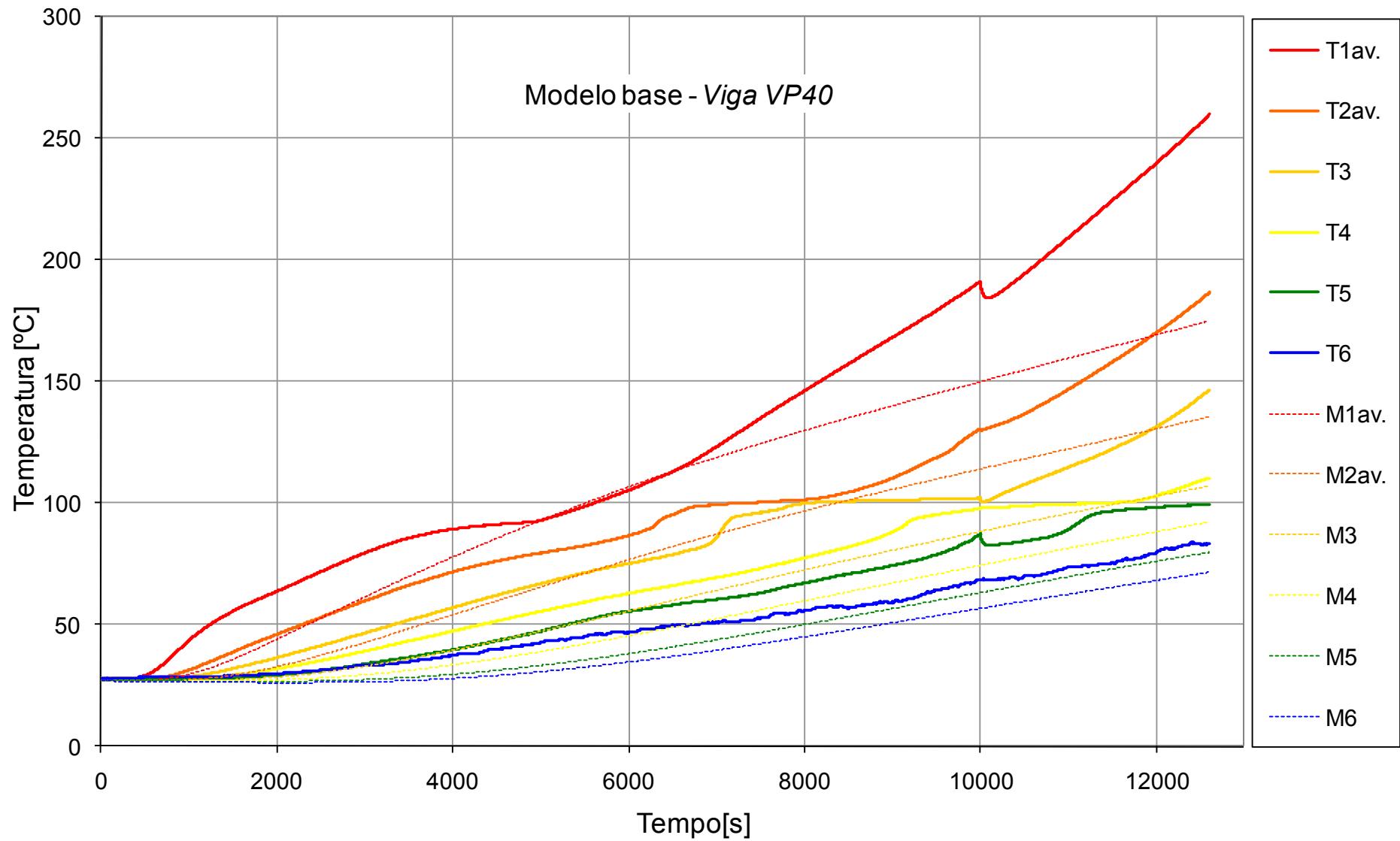
Anexo IX. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga VP25

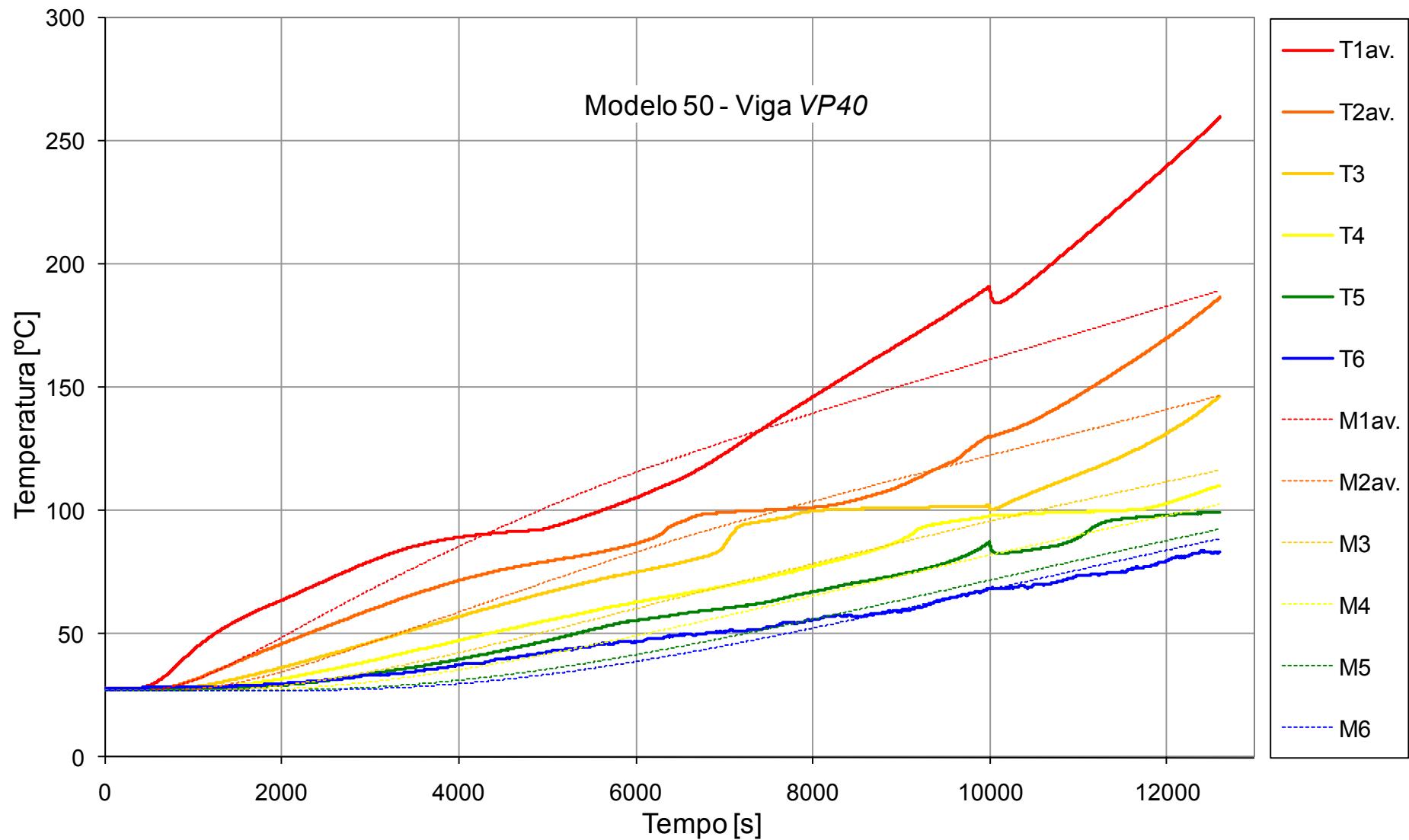


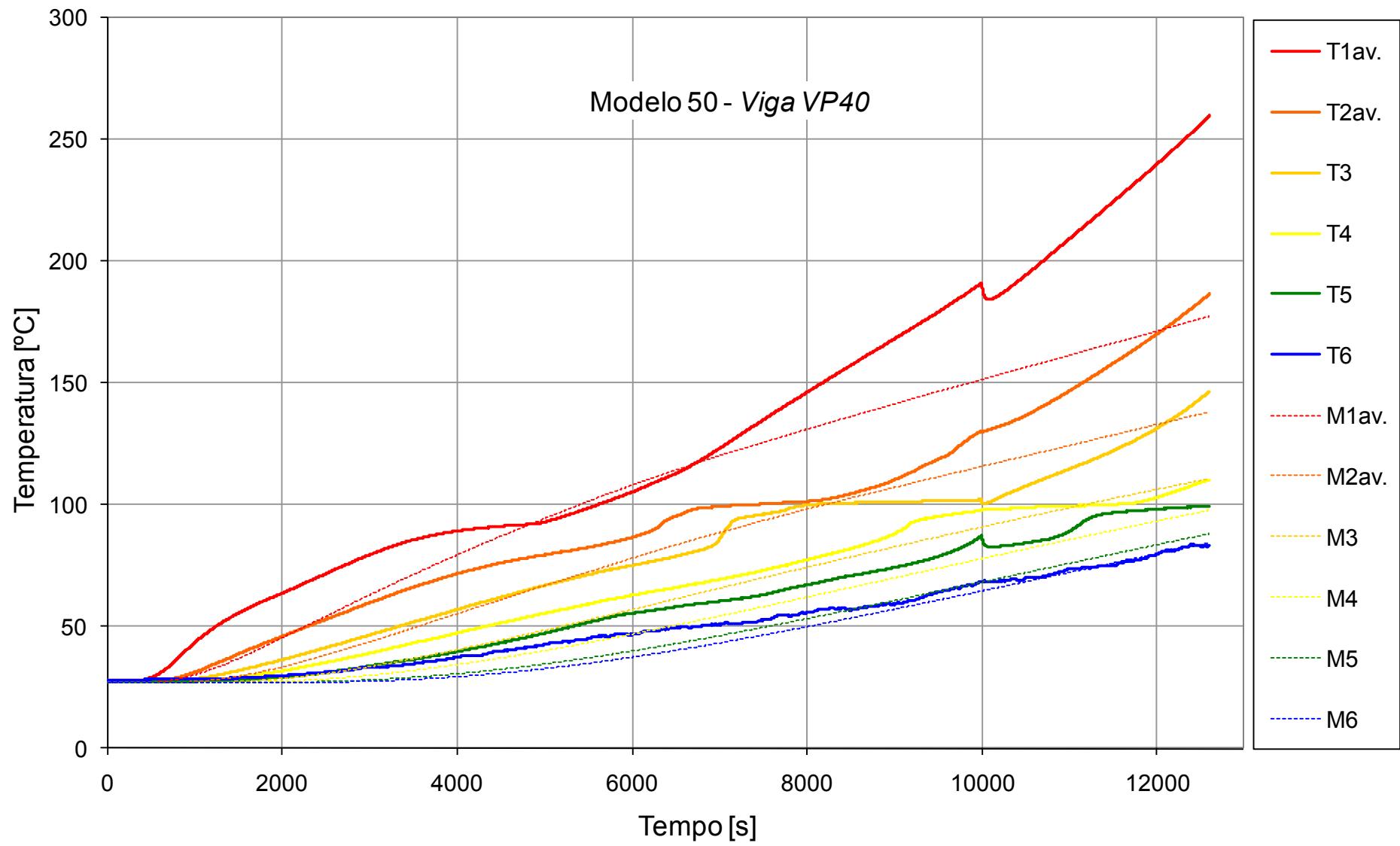




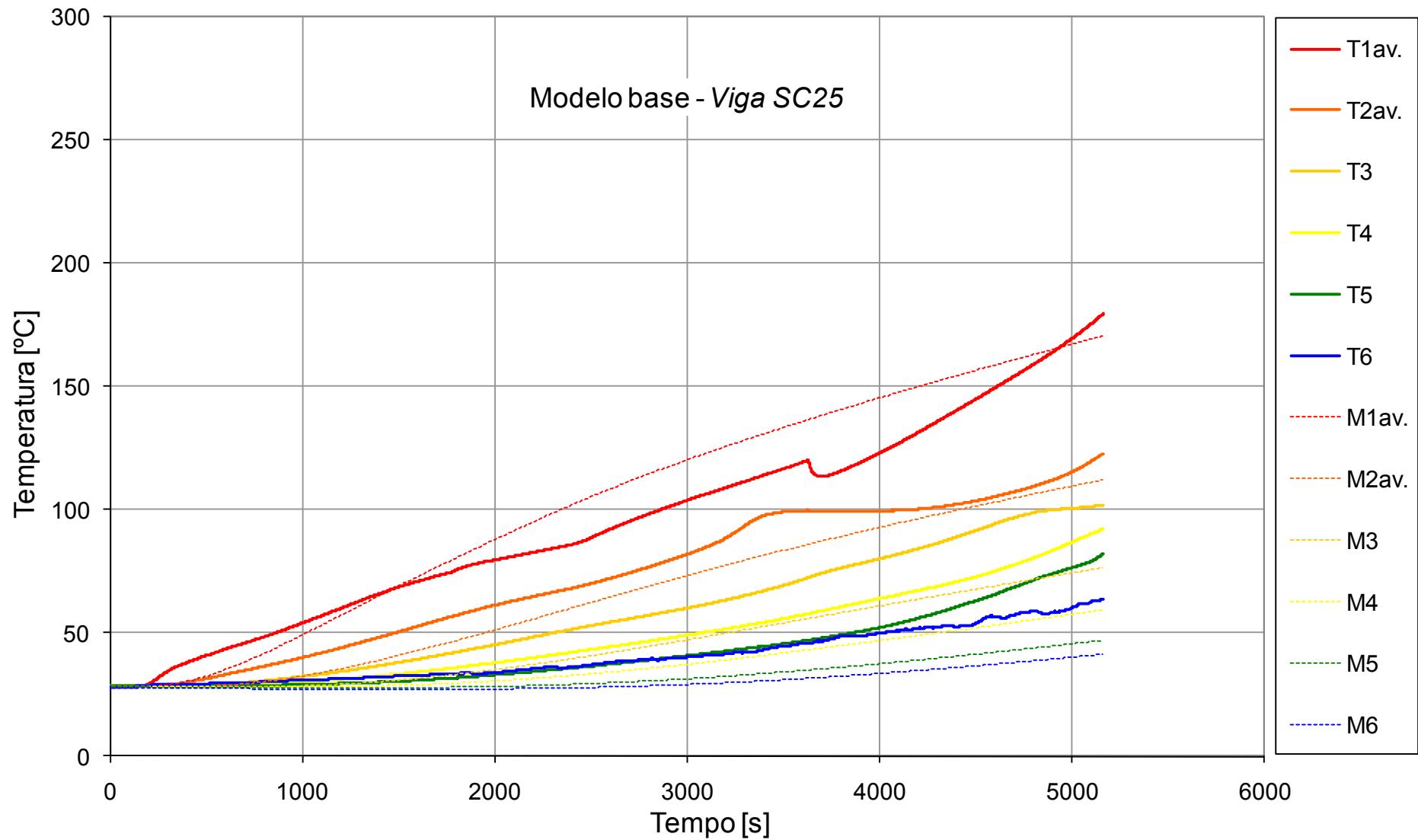
Anexo X. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga VP40

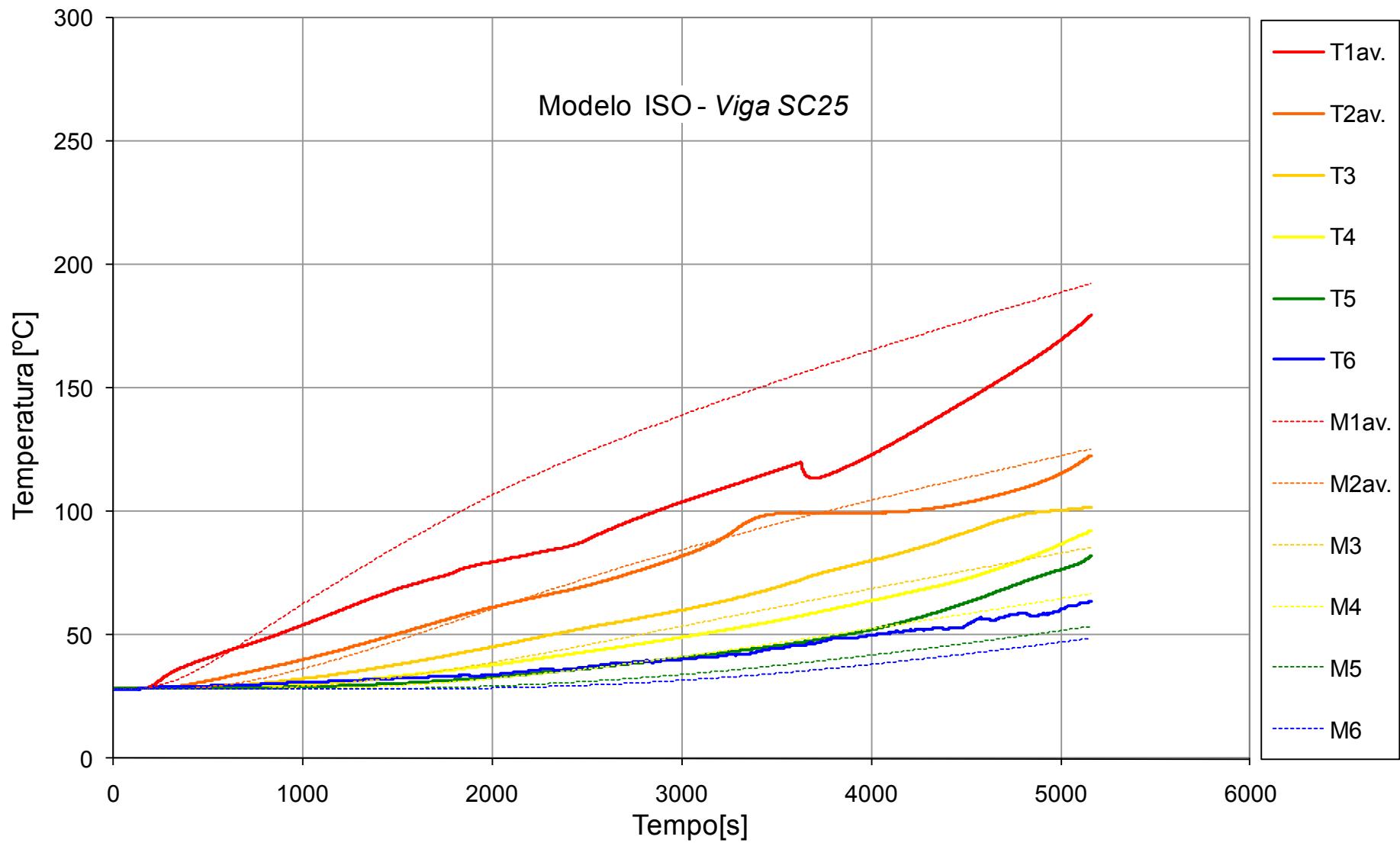


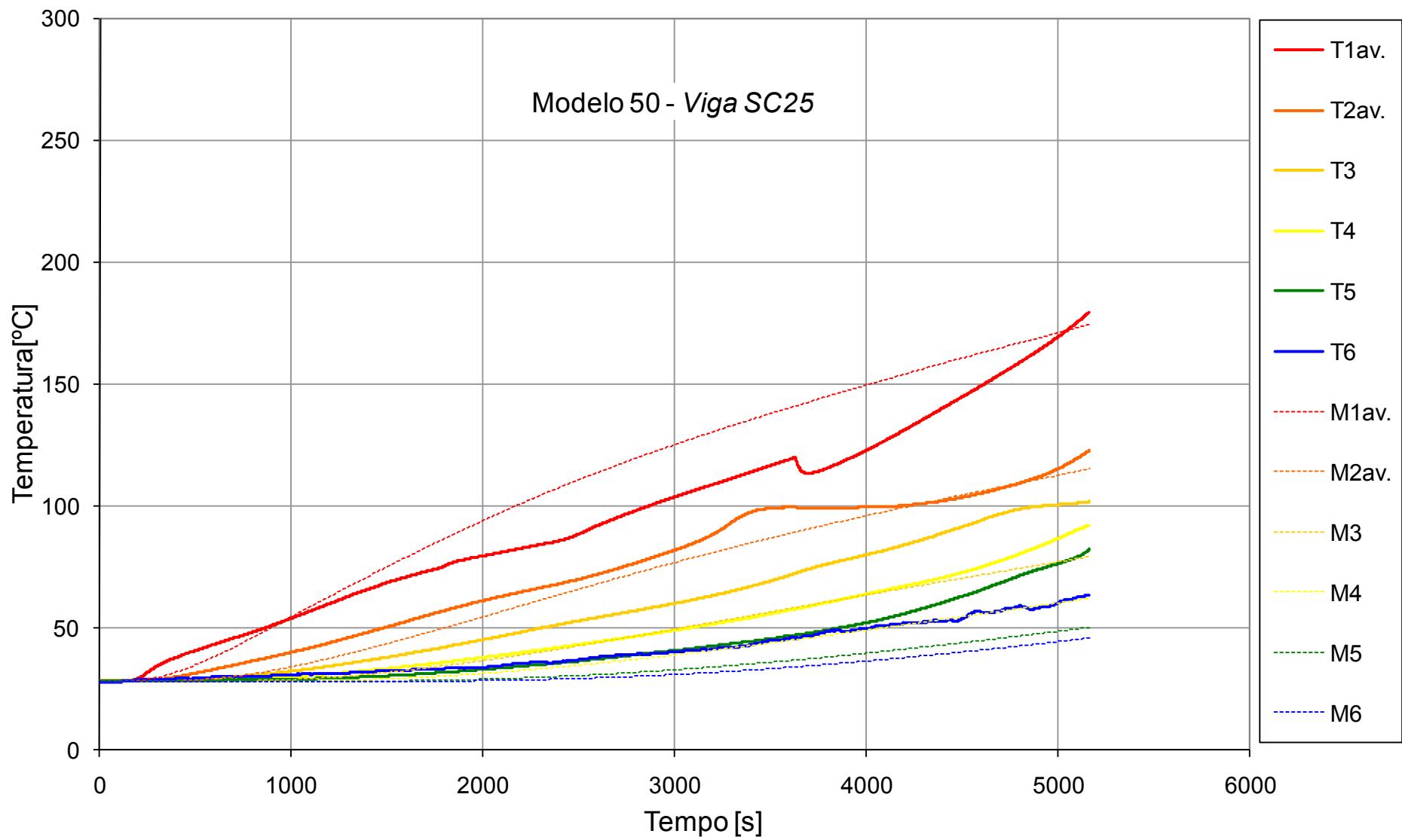




Anexo XI. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga SC25







Anexo XII. Comparação dos diagramas temperatura-tempo experimentais e numéricos da viga SC40

