

SISTEMAS DE PROTEÇÃO DOS COMPÓSITOS FRP ÀS EXPOSIÇÕES TÉRMICAS EXTREMAS

GABRIEL DE ANDRADE MELLO ACIOLY

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, minha Irmã
e minha Namorada

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar os próximos parágrafos para agradecer profundamente às pessoas que permitiram ser possível a realização deste trabalho, lembrando-os que compartilhamos esta conquista.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes, por tornar este trabalho possível, por todos os ensinamentos e esclarecimentos de dúvidas que me proporcionou, por procurar informações que foram de grande valia para o estudo, e por se mostrar sempre solícito e dedicado, apesar das adversidades que apareceram durante este trajeto.

Ao Professor Arlindo Begona, pela ajuda na interpretação das patologias dos materiais observadas nas esculturas decorativas do edifício Palladium.

Ao Engenheiro Filipe Dourado, Branch Manager da S&P Clever Reinforcement Iberica, Amora, Portugal, pelas sugestões transmitidas a respeito de sistemas de proteção de reforço estrutural com material FRP, face à sua experiência profissional em vários casos de obras, em Portugal e Brasil.

Ao professor Doutor Filipe Manuel Rodrigues Leite Magalhães, por fornecer dados importantes de registos térmicos de obras em Portugal.

Ao Núcleo de Reabilitação do Instituto da Construção (NRIC) da FEUP, em especial à Engenheira Esmeralda Paupério, por ter incentivado a realização da inspeção visual aos elementos escultóricos decorativos do edifício Palladium e ao Dr. Rui Manuel Silva por ter concretizado as sessões fotográficas e vídeos com o recurso ao drone e máquina fotográfica.

Aos meus pais, que sempre me motivaram durante todos os meus ciclos de estudo, não medindo esforços para serem possíveis, e que apesar da distância e preocupação, sempre entenderam os meus motivos e apoiaram-me de todas as formas durante a minha caminhada, sendo um pilar para mim.

À minha irmã, que, mesmo nos momentos distantes, esteve próxima a mim, demonstrando grande companheirismo.

À minha namorada, Sofia Hilgert, que desde o princípio motivou-me, sabendo de todas as dificuldades que a distância proporcionaria, por sempre se mostrar preocupada com as minhas questões, tentando-me ajudar da maneira que pudesse, principalmente durante a realização desta dissertação, pelo apoio emocional e por todos os momentos especiais que tivemos.

Por último, quero agradecer aos meus demais familiares e amigos próximos, por todos os conselhos dados, ajuda e bons momentos compartilhados.

RESUMO

Os sistemas compósitos de FRP surgiram como uma alternativa promissora para reforços de estruturas, por possuírem grande resistência mecânica, massa volúmica reduzida, facilidade de transporte e aplicação. Entretanto, estes materiais apresentam fragilidade com o aumento da temperatura, que em valores próximos a sua temperatura de transição vítrea (T_g), passa de um estado vítreo para elástico, com perdas acentuadas das suas propriedades mecânicas. Ademais, em valores mais elevados, tal como em situações de incêndio, a sua reação ao fogo pode produzir fumos, gases e resíduos tóxicos. Diante disto, pretende-se avaliar a resposta de sistemas de reforço com compósitos FRP em situações de exposição ambiental e ao fogo.

A temperatura tem um forte impacto na junta de ligação FRP-substrato de reforço. Os valores de temperatura em que se iniciam as alterações nas propriedades desta condição, para produtos comerciais disponíveis, foram avaliados a partir de ensaios realizados por outros autores, sendo observado que para situações de aplicação “in-situ” estes valores são mais críticos que para ensaios em laboratório. Outros parâmetros que interferem nestes resultados foram identificados, notando-se uma grande variabilidade de resultados para um mesmo material.

No caso da exposição ambiental, de modo a verificar a estabilidade da ligação de sistemas de reforço com compósitos de FRP, as temperaturas características em que estes sofrem alterações de comportamento foram comparadas às temperaturas máximas em serviço expectáveis nas estruturas. Para obter-se um gradiente térmico médio ambiental, foram examinados estudos que avaliaram as condições higrotérmicas de obras concretas e documentos com modelos teóricos que determinam valores da temperatura média expectável na superfície da estrutura, através de informações paramétricas. Em alguns casos, foi observado que o valor dessa temperatura superficial supera a temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos de FRP analisados, tornando necessária a utilização de uma técnica de proteção térmica.

Na situação de exposição ao fogo, por compilação de estudos que analisaram o comportamento de vários sistemas de proteção passiva para compósitos FRP, através de ensaios ao fogo, reuniram-se dados que permitiram avaliar a eficiência desses em manter a temperatura no compósito FRP abaixo de limites em que podem ocorrer perdas de propriedades e processos de combustão e decomposição dos seus elementos. A partir dos parâmetros analisados nas duas situações, foram definidos critérios de proteção, quer para exposição ambiental, quer exposição ao fogo. Foi analisado um caso de obra com reforço por colagem exterior de FRP e exposição ao meio urbano do Porto, Portugal, o que permitiu validar o sistema de proteção definido para essa exposição ambiental, decorridos cerca de 20 anos após a intervenção.

Concluiu-se ser possível a elaboração de sistemas de proteção que permitam prolongar o tempo de serviço dos reforços com FRP em situações de incêndio, sobretudo ao utilizar técnicas de aumento da espessura do sistema de proteção em zonas de ancoragem e colagem a partir da técnica de *Near-Surface Mounted* (NSM). Os sistemas de proteção analisados permitiram, da mesma forma, manter a temperatura em valores inferiores aos que ocorrem os processos de combustão e degradação dos elementos que constituem o FRP, por períodos prolongados. O efeito de proteção térmica, provido por estes sistemas, tem relação com a sua espessura, e alguns demonstram ser mais eficientes. As informações reunidas indicam bons parâmetros a serem avaliados na conceção de sistemas de proteção térmica para compósitos de FRP.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas compósitos de FRP, Temperatura de Transição Vítrea (T_g), Gradiente Térmico Ambiental, Fogo, Sistemas de Proteção

ABSTRACT

FRP composite systems have emerged as a promising alternative for structural reinforcement due to their high mechanical strength, low volume, ease of transport and application. However, these materials become brittle with increasing temperature as they transition from a glassy to a rubbery state as they approach the glass transition temperature (T_g), resulting in a severe loss of their mechanical properties. At higher values, their fire reaction can produce smoke, gases, and toxic residues. Therefore, the objective was to evaluate the response of FRP composite reinforcement systems exposed to the environment and to a fire.

Temperature has an important effect on the bond between the FRP composite and the reinforced structure. The temperature values corresponding to the onset of the change in bonding properties were taken from tests performed by other authors for the commercially available products. It was found that the results from "in-situ" applications were more critical than those from laboratory tests. Additional parameters that may influence these values were identified, and a large variability in results was found for the same material.

For environmental exposure, in order to verify the safety of FRP composite reinforcement systems, the temperature values consistent with these behavioral changes were compared to the maximum temperatures expected in structures service. Studies evaluating the hygrothermal conditions of structures and documents indicating possible values that can be achieved by a structure through parameter information have been studied to determine the environment average thermal gradient. In some cases, these values have been shown to exceed the glass transition temperature of the FRP composites studied, requiring the use of a thermal protection technique.

Data were compiled based on studies that analyzed the behavior of passive protection systems for FRP composites through fire tests. Based on these data, it was possible to analyze the efficiency of the systems to maintain the temperature of FRP composites below the values corresponding to the loss of properties and the onset of combustion and decomposition processes. Based on the analyzed parameters, protection criteria were defined for both environmental and fire exposure. A case study, of an externally bonded FRP exposed to urban environment for nearly 20 years in Porto, Portugal, allowed the validation of the protection system defined for this purpose,

It was found that the development of protection systems that allow the extension of the service life of FRP composite reinforcement in fire situations is possible, especially by increasing the thickness of the protection system in the anchorage zones and by bonding with the Near-Surface Mounted (NSM) technique. The investigated protection systems also made it possible to keep the temperature values below those associated with the combustion and degradation processes of the FRP composite components, for prolonged periods of time. The thermal protection efficiency of these systems depends on their thickness, with some proving to be more efficient. The information gathered points to important parameters that should be evaluated in the development of thermal protection systems for FRP composites.

KEYWORDS: FRP Composite Systems, Glass Transition Temperature (T_g), Environment Thermal Gradient, Fire, Protection Systems

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. COMPÓSITOS DE FRP EXPOSTOS À TEMPERATURA.....	5
2.1. SISTEMAS DE REFORÇO DE FRP	5
2.2. TÉCNICAS DE COLAGEM	6
2.3. EFEITO DA TEMPERATURA NOS COMPÓSITOS	7
2.4. O FOGO E OS COMPÓSITOS	9
2.5. NECESSIDADE DE PROTEÇÃO.....	9
2.6. SUSTENTABILIDADE DOS COMPÓSITOS FRP	10
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	12
3. COMPORTAMENTO DE ADESIVOS E RESINAS À TEMPERATURA	13
3.1. TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA (T _g).....	13
3.1.1. Conceito.....	13
3.1.2. Ensaios	14
3.2. VALORES DA T _g DAS RESINAS COMERCIAIS	16
3.2.1. Casos de Estudo	16
3.2.2. Análise de Resultados.....	18
3.2.3. Parâmetros Importantes	19
3.3. CONCEITO DE TEMPERATURA CRÍTICA (T _c).....	20
3.4. ENVOLVENTE TÉRMICA DE CASOS DE OBRA	21
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	27

4. COMPÓSITOS DE FRP EXPOSTOS AO FOGO	29
4.1. COMBUSTÃO E TOXICIDADE	29
4.2. TEMPERATURA DE DECOMPOSIÇÃO (Td).....	30
4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	31
4.4. RESUMO DE ENSAIOS	32
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
 5. SISTEMAS DE PROTEÇÃO PARA COMPÓSITOS FRP	 37
5.1. PRINCIPAIS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	37
5.1.1. Sistemas de Proteção Passiva.....	37
5.1.2. Revestimento intumescente	37
5.1.3. Placas de Gesso	38
5.1.4. Argamassa Cimentícia e de Gesso	39
5.1.5. Placas de Silicato de Cálcio	40
5.1.6. Lã de Rocha	41
5.1.7. Painéis de Betão Leve.....	41
5.1.8. Pintura Externa.....	42
5.2. CASO DE PROTEÇÃO À EXPOSIÇÃO AMBIENTAL	43
5.2.1. Caso de Estudo em Portugal	43
5.2.2. Reabilitação e Reforço	44
5.2.3. Observação Após 19 Anos (2022)	45
5.3. ENSAIOS AO FOGO	47
5.3.1. Parâmetros Observados	47
5.3.2. Revestimento Intumescente.....	48
5.3.3. Argamassa Cimentícia	48
5.3.4. Sistemas com Gesso e Lã de Rocha.....	49
5.3.5. Placas de Silicato de Cálcio	49
5.3.6. Placas de Betão Leve	51
5.3.7. Resumo de Ensaio	51
5.4. PROPOSTAS DE CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO	54
5.4.1. Critérios de Proteção às Altas Temperaturas	54
5.4.2. Critérios de Proteção ao Fogo.....	56
5.5. PROTEÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS	58

5.6. PROTEÇÃO AO FOGO	59
5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
 6. CONCLUSÕES.....	 63
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	63
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	64
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 65
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Compósitos de FRP pré-fabricado e curado “in situ”, adaptado de [3]	6
Figura 2 - Técnica de colagem EBR, adaptado de [7]	6
Figura 3 - Técnica NSM com laminado de FRP, adaptado de [3]	7
Figura 4 - Resistência à tração de compósitos FRP expostos a altas temperaturas, adaptado de [10].	8
Figura 5 - Resistência à flexão de compósitos FRP expostos a altas temperaturas, adaptado de [10].	8
Figura 6 - Resultados de LCA para estruturas reforçadas ou reconstruídas, adaptado de [19].	11
Figura 7 - Temperaturas de transição vítrea de polímeros epóxi, adaptado de [24]	14
Figura 8 - Equipamentos utilizados nos principais ensaios de avaliação da Tg, adaptado de [3]	15
Figura 9 - Curva típica de ensaio DSC, adaptado de [26] e [5].	15
Figura 10 - Valores indicados da Tc, adaptado de [6]	21
Figura 11 - Registo de Temperaturas nas Pontes 1 e 2, por [37].	24
Figura 12 - Zonas térmicas para temperaturas máximas (Tmax), em Portugal, adaptado de [38].	25
Figura 13 - Valores de α_s de superfícies em função da cor, adaptado de [39, 40]	25
Figura 14 - Radiação solar máxima incidente em superfícies em Portugal, adaptado de [39, 41].	26
Figura 15 - Compósitos GFRP e CFRP em teste de ignição após 60 segundos, adaptado de [45]. ...	29
Figura 16 - Ensaio com calorímetro de cone, adaptado de [46].	30
Figura 17 - Variação da massa por aumento de temperatura de FRP, adaptado de [7].	31
Figura 18 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real, adaptado de [7, 49].	32
Figura 19 - Taxa de libertação de calor em provetes reforçados com CFRP, adaptado de [52]	33
Figura 20 - Ignição da resina e produção de fumo de CFRP, adaptado de [52]	33
Figura 21 - Testes de fogo de Dalmarnock, adaptado de [53].	34
Figura 22 - Reação da tinta intumescente, adaptado de [59].	38
Figura 23 - Provetes protegidos com placa de gesso, adaptado de [52].	39
Figura 24 - Vermiculita expandida e perlita expandida [71, 72].	39
Figura 25 - Placa de silicato de cálcio [78].	40
Figura 26 - Placas de lã de rocha [83].	41
Figura 27 - Placa de betão leve Aestuver T [87].	41
Figura 28 - Elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium, adaptado de [90]	43
Figura 29 - Etapas de reparação dos elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium, adaptado de [3].	44
Figura 30 - Fachada de Santa Catarina (nascente), após 19 anos.	46
Figura 31 - Fachada de Passos Manuel (norte), após 19 anos.	47
Figura 32 - Temperatura nas zonas de ancoragem (ZA) no instante da descolagem, para EBR e NSM, adaptado de [100].	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da Tg de resinas comerciais, por [6].	16
Tabela 2 - Resultados da Tg para diferentes condições de cura, por [25].	17
Tabela 3 - Resultados da Tg do adesivo S&P Resin 220, por [13].	17
Tabela 4 - Valores da Tg do adesivo S&P Resin 220 exposto ao ambiente, por [28].	18
Tabela 5 - Obras, na região Norte, observadas por Juvandes et al. [6].	22
Tabela 6 - Obras na região Centro-Sul observadas por Juvandes et al. [6].	22
Tabela 7 - Resultados de parâmetros higrotérmicos obtidos por Juvandes et al. [6].	23
Tabela 8 - Parâmetros registados por [42] e estimados pela Equação 1 [39].	26
Tabela 9 - Temperatura superficial máxima de elementos verticais para diferentes zonas de Portugal.	27
Tabela 10 - Valores de absorção solar (α_s) por diferentes autores, adaptado de [42, 88].	42
Tabela 11 - Ensaio com Argamassa Cimentícia com e sem Vermiculita.	48
Tabela 12 - Ensaio com Sistemas de Proteção com Gesso	49
Tabela 13 - Resumo de Ensaio com Placas de Silicato de Cálcio	50
Tabela 14 - Resumo de temperaturas alcançadas para diferentes tempos de ensaio e sistemas de proteção.	53
Tabela 15 - Especificações dos critérios para proteção às altas temperaturas.	55
Tabela 16 - Resumo de valores das Tg e Tc máximos e mínimos observados em estudos.	56
Tabela 17 - Especificações dos critérios para proteção ao fogo.	57
Tabela 18 - Informações sobre os sistemas de proteção térmica	57
Tabela 19 - Propostas de sistemas de proteção às altas temperaturas.	58
Tabela 20 - Propostas de sistemas de proteção ao fogo.	60

SÍMBOLOS

α_s – Coeficiente de Radiação Solar Global [-]

E' - Módulo de Elasticidade ou Módulo de Ganho [GPa]

E'' - Módulo de Perda [GPa]

h_e – Condutância Térmica Superficial Exterior [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

HR – Humidade Relativa [%]

R – Radiação Solar [W/m^2]

T_1 – Temperatura Crítica [$^\circ C$]

T_A – Temperatura Ambiente [$^\circ C$]

Tangente de δ – Relação de Módulo de Elasticidade sobre Módulo de Perda (E'/E'') [-]

$T_{d,m}$ – Temperatura Característica referente a Decomposição Média [$^\circ C$]

T_e – Temperatura Exterior [$^\circ C$]

TE' – Temperatura Característica referente a redução do Módulo de Elasticidade [$^\circ C$]

TE'' – Temperatura Característica referente ao pico do Módulo de Perda [$^\circ C$]

T_c – Temperatura Crítica [$^\circ C$]

T_d – Temperatura de Decomposição [$^\circ C$]

T_{falha} – Tempo necessário para a Falha do Sistema de Reforço [minutos]

T_g – Temperatura de Transição Vítrea (do termo inglês *Glass Transition Temperature*) [$^\circ C$]

T_g 2% offset - Temperatura Característica referente a redução de 2% do ponto de TE' [$^\circ C$]

T_i – Temperatura Característica referente ao ponto médio da curva do Módulo de Elasticidade [$^\circ C$]

T_{max} – Temperatura Máxima do Ar à Sombra [$^\circ C$]

T_{out} – Temperatura do Ar Ambiente Externo [$^\circ C$]

T_S – Temperatura Superficial ou Temperatura do Substrato [$^\circ C$]

T_{se} – Temperatura de Superfície de um elemento [$^\circ C$]

$TTan\delta$ – Temperatura Característica referente ao pico de Tangente de δ [$^\circ C$]

TT_g – Tempo necessário para o adesivo ou resina do compósito atingir T_g [minutos]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Os materiais tradicionais de construção apresentam degradação ao decorrer do tempo, por conta de situações às que são expostos, gerando perda das suas propriedades mecânicas. Estes materiais, sobretudo o betão, principal material de construção utilizado, podem sofrer deterioração em decorrência da exposição ambiental, acidentes, nomeadamente incêndios ou sismos, conceção ou execução equivocadas, aumento de solicitação, comportamento ineficiente em serviço, entre outros. Por conta destes processos, são estudados métodos de reforço estrutural para reabilitar estruturas deterioradas.

Para a conceção de sistemas de reforços, eram inicialmente utilizados os mesmos materiais de construção, sobretudo o aço, que também estavam sujeitos aos mesmos processos de degradação, além de interferirem no aspeto arquitetónico. Isto gerou uma procura por novos materiais que possibilitassem sistemas de reforço mais duráveis e resistentes, com menor interferência no aspeto visual, e que fossem de fácil aplicação. Em meados dos anos 80, iniciaram-se os primeiros estudos a respeito do uso de materiais compósitos reforçados com fibras (FRPs, do termo inglês “*Fiber Reinforced Polymers*”) para reforços estruturais. Estes materiais, inicialmente utilizados em aplicações navais, automobilísticas e aeroespaciais, são compostos por fibras (de carbono, vidro ou aramida) e matrizes poliméricas. Em relação a outros materiais de reforço, nomeadamente o aço, eles apresentam grande resistência à tração, corrosão e fadiga, aliados a pequenas massas volúmicas, de simples transporte e aplicação. Além disso, recentes estudos indicam que estes materiais proporcionam uma maior sustentabilidade ao serem utilizados. Consequentemente, os compósitos de FRP vêm sendo utilizados cada vez mais pela indústria de construção, gerando também mais estudos a respeito do seu comportamento.

As principais desvantagens da utilização dos compósitos de FRP para reforço estrutural estão ligadas ao seu custo inicial elevado e características específicas do seu comportamento mecânico. O reforço estrutural provido por eles é gerado através da transferência de esforços da estrutura para as fibras do compósito, pela ligação provida pela matriz polimérica. O seu comportamento é afetado diretamente pela temperatura, e a partir de um intervalo de temperatura (geralmente entre 50 °C e 120 °C), denominada temperatura de transição vítrea (T_g), o material passa de estado vítreo para estado viscoso. Isto causa uma redução significativa das suas propriedades mecânicas e perda da resistência do sistema de reforço. Quando exposto ao fogo, o material pode entrar em combustão, gerando gases, fumos e resíduos tóxicos.

O comportamento dos materiais compósitos de FRP, face às altas temperaturas e ao fogo, representa, possivelmente, a maior desvantagem para a sua utilização. Esta preocupação é evidente ao observar as recomendações de normas e documentos regulamentares, que preconizam, na sua maioria, não considerar as propriedades mecânicas destes compósitos em casos de incêndio, exceto em casos em que

são utilizados sistemas de proteção que mantenham a temperatura abaixo da T_g , comprovados por estudos. Entretanto, apesar de existirem estudos a respeito do comportamento de compósitos de FRP expostos à alta temperatura e de diferentes sistemas de proteção térmica, são poucos os estudos que permitem avaliar comparativamente estes sistemas, apontando os mais eficientes.

1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

Os compósitos de FRP exercem um importante papel na engenharia civil, principalmente ao serem utilizados para reforço e reabilitação de estruturas. Além disso, ainda possibilitam diferentes soluções para preservação de patrimônio, como de edifícios históricos.

Por conta da fragilidade face ao aumento de temperatura, estes compósitos possuem as suas aplicações limitadas. Os principais aspetos referentes a este comportamento estão ligados à sua temperatura de transição vítrea, às condições higrotérmicas de exposição e às características do sistema de proteção utilizado. Perante tal, foram estabelecidos objetivos para o trabalho da presente dissertação.

Primeiro, é de elucidar o comportamento dos compósitos de FRP e dos seus elementos constituintes em temperaturas elevadas. Para isso, pretende-se identificar valores característicos de temperatura em que ocorrem diferentes efeitos nos materiais, nomeadamente, perda de resistência e rigidez, escorregamento do FRP na interface do elemento estrutural reforçado, degradação e combustão face ao fogo.

Seguidamente, procura-se avaliar a necessidade de um critério de proteção térmica de sistemas de reforços, quer face às temperaturas expectáveis durante a sua vida útil, quer face às exposições térmicas extremas, incluindo cenários de incêndio.

Em paralelo, este trabalho pretende avaliar a eficiência de sistemas de proteção térmica estudados na literatura técnica, apresentando-se de seguida critérios de proteção, tanto para temperaturas de serviço expectáveis, quanto para cenários de exposição ao fogo, observando quais sistemas apresentam melhor comportamento.

Por último, expor um caso de estudo realizado no Porto, onde elementos decorativos de uma fachada, reforçados com um sistema de FRP e protegidos um sistema de revestimento ambiental, são inspecionados e analisados após cerca de 20 anos em funcionamento.

A avaliação destes objetivos foi realizada com base na literatura disponível até a data, a partir de estudos que apresentaram resultados de ensaios, equações teóricas validadas por resultados experimentais, observações de situações reais, e recomendações de normas e documentos regulatórios.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, e as suas descrições são apresentadas em seguida.

- No *capítulo 1* é introduzido o enquadramento geral do tema em foque, são apresentados os objetivos e motivações do trabalho realizado, assim como a metodologia utilizada para obtê-los;
- No *capítulo 2* são apresentados os principais aspetos referentes aos diferentes métodos de reforço a partir de compósitos FRP, breve apresentação sobre o seu comportamento em exposições a altas temperaturas e ao fogo, observações a respeito da necessidade de proteção térmica e ao ambiente, e avaliação da sustentabilidade do seu uso;

- O *capítulo 3* é dividido em duas frentes principais: avaliação de critérios de definição de temperaturas em que ocorrem perdas de propriedades mecânicas dos compósitos de FRP, nomeadamente temperatura de transição vítrea e temperatura crítica, e análise das envolventes térmicas expectáveis durante situações de serviço de potenciais sistemas de reforço;
- No *capítulo 4* são analisados os efeitos do fogo nos compósitos de FRP, a partir de temperaturas em que ocorrem processos de combustão e decomposição, assim como os parâmetros a serem avaliados;
- O *capítulo 5* apresenta os principais sistemas de proteção térmica utilizados em estudos na literatura técnica, um caso prático de proteção à exposição ambiental realizado em Portugal e a sua resposta após quase 20 anos de exposição, os resultados de ensaios dos sistemas de proteção expostos ao fogo, um estudo comparativo em relação a estes sistemas, resultando em propostas de critérios de proteção para exposição ambiental e às altas temperaturas.
- Por fim, no *capítulo 6* são apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização desta dissertação, considerações finais, e sugestões de aspetos a serem avaliados por trabalhos futuros a respeito da proteção de compósitos de FRP.

2

COMPÓSITOS DE FRP EXPOSTOS À TEMPERATURA

2.1. SISTEMAS DE REFORÇO DE FRP

Os sistemas compósitos de FRP são constituídos por materiais que lhe conferem atributos para que possam ser utilizados como elementos de reforço estrutural. Estes sistemas desfrutam das boas propriedades mecânicas existentes em fibras contínuas, geralmente de carbono, vidro ou aramida, que podem ser dispostas de maneira unidimensional ou multidimensional. Para que ocorra a transmissão de esforços da estrutura a ser reforçada para as fibras, são empregadas resinas epóxi, assim como cargas de enchimento denominadas de “fillers” [1].

A designação internacional dos compósitos se dá a partir das suas fibras, sendo as mais comuns a CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) e AFRP (Aramid Fiber Reinforced Plastic). O desempenho dos compósitos é resultado da sua composição, e alguns dos fatores que o influenciam são a disposição das fibras, os seus comprimentos, formas, características da resina da matriz e a ligação entre fibras e matriz [1, 2].

Os sistemas comerciais de compósitos FRP podem ser encontrados nas formas de pré-fabricados e curados “in situ”, demonstrados na Figura 1. No primeiro caso, são utilizados laminados de FRP que são incorporados na estrutura a reforçar através de um adesivo epóxi. Os sistemas curados “in situ” são compostos de feixe de fibras dispostas de maneira unidirecional (mantas) e multidirecional (tecido), às quais serão adicionadas a resina de saturação apenas no momento da execução do reforço, gerando o FRP [3].



a) Pré-Fabricado (Laminado)



b) Curado “in situ” (Manta/Tecido)

Figura 1 - Compósitos de FRP pré-fabricado e curado "in situ", adaptado de [3]

Os compósitos têm como finalidade o reforço de estruturas, como de betão, aço, madeira ou alvenaria, que pode ocorrer em termos de flexão, corte e por confinamento. A eficiência deste sistema se dá por conta das propriedades de resistência e rigidez das fibras, assim como o seu reduzido peso. Associada à facilidade de aplicação e a resistência à corrosão de resinas, os compósitos geram um sistema muito eficaz para reforço estrutural [1]. Por outro lado, estas fibras apresentam comportamento mecânico diferente do aço, por ser perfeitamente elástico, sem apresentar deformação plástica e tensão de cedência, o que as classifica como um material frágil [4].

2.2. TÉCNICAS DE COLAGEM

O reforço de estruturas com compósitos FRP ocorre de maneira mecânica, colados pela resina ou adesivo epóxi. Os métodos de colagem mais utilizados são o EBR (Externally Bonded) e o NSM (Near-Surface Mounted). Ambos os métodos permitem a adoção de pré-esforço do material. A definição da técnica utilizada está relacionada com os objetivos a alcançar, particularmente ao tipo de reforço necessário, seja à tração, ao corte ou por confinamento [3].

A técnica de colagem exterior, EBR, consiste num sistema simples, em que se adicionam placas ou chapas de um material à superfície da estrutura a se reforçar, através de adesivos. Este adesivo permite a transmissão dos esforços da estrutura para as fibras do compósito FRP, através de tensões tangenciais formadas na sua interface de ligação. Esta técnica é aplicada principalmente em reforços por flexão e corte, em pilares, vigas e lajes e à compressão em pilares e zonas de ancoragem, como é ilustrado na Figura 2 [5]. Para aplicação desta técnica, inicialmente a superfície da estrutura deve ser preparada, de modo a torná-la rugosa e sem resíduos que possam comprometer a boa aderência. Ademais, não necessita de mão de obra muito especializada, sendo o sistema mais utilizado [6].



a) Colagem Laminados



b) Colagem Mantas

Figura 2 - Técnica de colagem EBR, adaptado de [7]

A técnica NSM surgiu com o objetivo de superar algumas limitações observadas pela EBR, como destacamento precoce e degradação dos compósitos por estarem expostos ao ambiente. A técnica, representada pela Figura 3, consiste na introdução de laminados de FRP em rasgos criados na superfície

da estrutura. Ela é limitada pela profundidade dos rasgos, que no caso do betão, não deve superar o recobrimento das armaduras. Porém, apresenta várias vantagens em relação ao outro método, como maior proteção a atos de vandalismo, menor ocorrência de arrancamento do FRP e um melhor comportamento ao fogo [8], como apontado por Firmo [7].

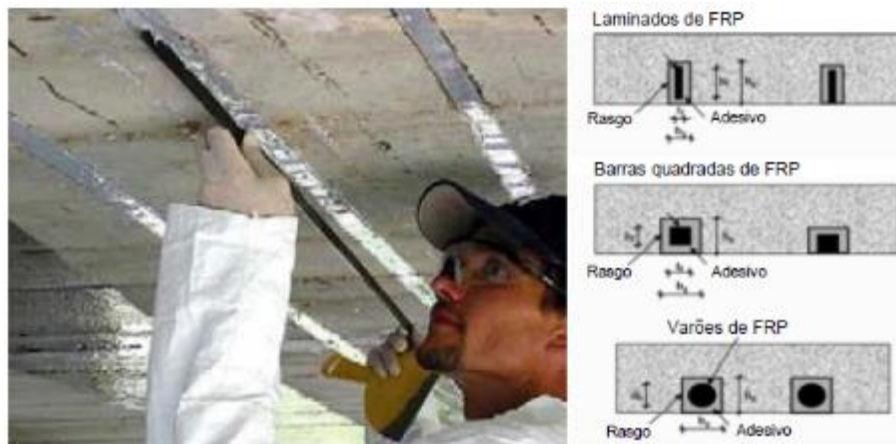


Figura 3 - Técnica NSM com laminado de FRP, adaptado de [3]

2.3. EFEITO DA TEMPERATURA NOS COMPÓSITOS

A temperatura gera alterações em todos os materiais que constituem o compósito FRP, principalmente na sua resina. Os polímeros possuem uma temperatura em que o material passa de um estado duro e vítreo para um estado elástico e dúctil, denominada Temperatura de Transição Vítrea (T_g). Esta temperatura varia entre 50 °C e 120 °C para resinas curadas em temperatura ambiente, e pode ser determinada por alguns ensaios, sendo os mais utilizados o DMTA (Dynamic Mechanic Thermal Analyses), DMA (Dynamic Mechanical Analyses) e o DSC (Differential Scanning Calometry). [6, 9]. Desta forma, ao longo dos últimos anos foram realizados diversos estudos a fim de identificar os efeitos da temperatura nos compósitos, sobre as suas propriedades de resistência, ligação, modos de rotura da estrutura reforçada, entre outros.

Bazli e Abolfazli [10] reuniram informações de vários artigos que estudaram a retenção da resistência à tração axial de mantas e laminados de FRP a elevadas temperaturas (Figura 4) (adaptada da tabela original). Foram identificadas as temperaturas para as quais os compósitos retiveram 50% da sua capacidade de resistência, denominadas temperaturas críticas (T_1), e comparadas aos respectivos valores da T_g . Estas temperaturas foram consideravelmente mais altas que a T_g , na maioria dos casos. Independente do material, resina, ou orientação da fibra, a T_1 variou geralmente entre 100 °C e 300 °C. Em temperaturas acima de 400 °C, os compósitos perdem quase a totalidade da sua resistência à tração.

Neste estudo, também foram comparadas a retenção da resistência à flexão de mantas e laminados, expostos a temperaturas elevadas, reunidas de diversos autores (Figura 5) (adaptada da tabela original), utilizando o mesmo critério de temperatura crítica. Referente a este parâmetro, foi observado que a temperatura crítica variou entre 100°C e 250°C, independente do material, sendo inferior à resistência à tração, por conta dos diferentes modos de rotura que ocorreram nos testes. A temperatura máxima na qual um compósito resiste à tração é abaixo de 400°C, inferior a testes à tração [10].

Fibre Type	Fibres Orientation	Resin Type	Specimen Dimensions (in mm)	T_g	Critical Temperature (T1)	Strength Retention at T1	Modulus Retention at T1
Carbon	Unidirectional	epoxy	400 × 200 (1 layer of fibre)	38	NA	NA	NA
Carbon	Unidirectional	epoxy	250 × 40 × 0.348	NA	300	54%	39%
Glass	Unidirectional	epoxy	250 × 40 × 0.352	NA	300	57%	70%
Carbon	Unidirectional	epoxy	250 × 40 × 0.99	85	131	50%	20%
Basalt	Unidirectional	epoxy	250 × 40 × 0.95	85	250	59%	73%
Glass	Unidirectional	epoxy	Dog-bone (600 × 20 × 2)	70	300	56%	NA
Glass	Woven	epoxy	Dog-bone (600 × 20 × 2)	70	300	51%	NA
Glass	Chopped strand mat	epoxy	Dog-bone (600 × 20 × 2)	70	60-80	50%	NA
Glass	Unidirectional	epoxy	300 × 20 × 5	70	300	45%	82%
Glass	Woven	epoxy	300 × 20 × 5	70	200	55%	87%
Glass	Chopped strand mat	epoxy	300 × 20 × 5	70	120	53%	89%
Carbon	Woven	epoxy	500 × 30 (1 layer of fabric)	60	300	50%	NA
Glass	Woven	epoxy	500 × 30 (1 layer of fabric)	60	400	50%	NA
Carbon	Unidirectional	epoxy	600 × 26 × 1.4	60	300	54%	NA
Glass	Unidirectional	epoxy	15 (width) × 1.27	167	200	57%	80%
Basalt	Unidirectional	epoxy	16 (width) × 1.27	167	NA	NA	NA
Glass	Unidirectional	Polypropylene	Dog-bone (300 × 15 × 12)	NA	150	50%	NA
Carbon	Unidirectional	epoxy	250 × 10 × 0.111	45	NA	NA	NA
Carbon	Unidirectional	epoxy	600 × 25 × 2.5	100	300	52%	NA
Glass	Unidirectional	epoxy	600 × 25 × 2.5	100	250	52%	NA
Glass	Unidirectional	Polyester	200 × 20 × 4	NA	200	47%	NA
Glass	Unidirectional	epoxy	735 × 38 × 2.6	75	75	48%	77%
Carbon	Unidirectional	NA	13.5 (wide) × 4.5 (thickness)	80	300	50%	53%
Carbon	Unidirectional	epoxy	1 (thickness)	78	400	50%	NA
Glass	Unidirectional	epoxy	1.3 (thickness)	78	350	50%	NA

Figura 4 - Resistência à tração de compósitos FRP expostos a altas temperaturas, adaptado de [10].

Fibre Type	Fibres Orientation	Resin Type	Laminate Dimensions	T_g	Critical Temperature (T1)	Strength Retention at T1
Glass	Unidirectional	epoxy	70 × 18 × 5	70	225	50%
Glass	Woven	epoxy	70 × 18 × 5	70	200	50%
Glass	Chopped strand mat	epoxy	70 × 18 × 5	70	200	47%
Basalt	Unidirectional	epoxy	7.8 × 2.6 × 1.27	167	100	50%
Carbon	Unidirectional	epoxy	100 × 25 × 2.5	100	250	50%
Glass	Unidirectional	epoxy	100 × 25 × 2.5	100	200	50%
Carbon	Unidirectional	Polyetheretherketone	12 × 30 × 2	NA	180	50%
Glass	Woven and chopped strand mat	phenolic	220 × 50 × 5	NA	120	46%
Glass	Unidirectional	Polyester	135 × 25 × 6.9	NA	250	50%
Glass	Unidirectional	Phenolic	90.5 × 25 × 4.2	NA	NA	NA
Glass	Unidirectional	Polyester	240 × 25 × 9.5	100	NA	NA
	Unidirectional	Vinylester	155 × 16 × 6	113	NA	NA
	Unidirectional	Phenolic	240 × 25 × 9.5	120	NA	NA
	Unidirectional	Polyester	95 × 47.5 × 9.5	100	NA	NA
	Unidirectional	Vinylester	60 × 30 × 6	113	NA	NA
	Unidirectional	Phenolic	95 × 47.5 × 9.5	120	NA	NA

Figura 5 - Resistência à flexão de compósitos FRP expostos a altas temperaturas, adaptado de [10].

Cao et al. [11] realizaram um estudo com mantas de CFRP que demonstrou um comportamento estável das mantas quando em temperaturas abaixo da T_g , e uma rápida perda de resistência do compósito quando a temperatura ultrapassa T_g . Ele indica que a variação da resistência à tração da manta está ligada fundamentalmente ao módulo de elasticidade da matriz de epóxi. As temperaturas de transição vítrea das resinas, testadas por DMA, foram de 42 °C e 45 °C, e as temperaturas em que elas foram testadas variaram entre 20 °C e 120 °C.

Carlos e Rodrigues [12] estudaram a resposta mecânica da ligação entre laminados CFRP e betão em elevadas temperaturas, a partir de ensaios de *Single Lap Shear Test* (SST). O adesivo utilizado possuía temperatura de transição vítrea de 75 °C, e as temperaturas de ensaio variaram entre 15 °C e 165 °C. Em temperaturas inferiores a Tg, o modo de rotura do sistema betão-FRP foi pelo substrato de betão, com exceção do teste a 65 °C, em que a falha no adesivo foi responsável pela rotura. Nesta temperatura, houve uma perda de 60% da força de ligação, que perdeu completamente a sua força quando a temperatura atingiu 165 °C. Até 40 °C, a ligação possuía 95% da sua capacidade inicial.

Firmo et al. [13] realizaram um programa experimental no qual foram testadas as propriedades mecânicas em diferentes temperaturas de um adesivo epóxi comercial, tipicamente utilizado em Portugal, denominado *S&P Resin 220* (colagem de laminados CFRP). Este adesivo tem Tg de 47 °C, obtido a partir de ensaio DMA, e teve as suas resistências ao cisalhamento e tração observados em temperaturas que variaram de 20 °C a 120 °C. Quando submetido a 42,5 °C, inferior ao seu Tg, o adesivo já perdia 27% da sua resistência ao cisalhamento e 23% da sua resistência à tração. Em temperaturas de 50 °C, estas perdas evoluíram a 68% e 69%, respetivamente.

2.4. O FOGO E OS COMPÓSITOS

Os compósitos FRP vem sendo utilizados como reforço para estruturas de betão armado há algum tempo, principalmente em pontes e estruturas externas, em que a resistência ao fogo não é, necessariamente, um ponto crítico. No entanto, ao utilizar este tipo de reforço em estruturas internas, deve-se levar em consideração o seu comportamento em cenários de exposição ao fogo, para atender aos critérios de duração ao fogo definidos nos códigos. Sabe-se que os compósitos não se comportam da mesma maneira que betão e aço quando sujeitos a temperaturas elevadas, e além disso, como todo material polimérico, possuem temperatura de ignição [9, 14].

Durante um incêndio, podemos ter uma grande variação de temperatura num curto período, atingindo valores muito elevados. Nestes casos, em situações que a temperatura excede os 200 °C, além de perder as suas propriedades mecânicas, os compósitos de FRP começam a se degradar e produzir fumo, calor e resíduos tóxicos. Quando sujeito a esta variação de temperatura, o compósito perde as suas ligações químicas e entre as suas fibras, o que causa perda das suas capacidades mecânicas e físicas [7, 9].

Atualmente, os documentos regulamentares aconselham a desprezar as propriedades de rigidez e resistência providas pelos compósitos FRP, em casos de incêndio. Neste caso, a estrutura inicial sem reforço deve suportar as cargas aplicadas em casos de incêndio, a não ser que sejam aplicados sistemas de proteção que comprovem sua eficácia, através de estudos [15].

2.5. NECESSIDADE DE PROTEÇÃO

O aumento da utilização de compósitos FRP, como materiais de reforço estrutural, trouxe consigo a demanda de serem utilizados numa maior variedade de circunstâncias. Apesar destes compósitos apresentarem boas performances quando se diz respeito a questão estrutural, sabemos que estas características são vinculadas a temperatura de serviço em que eles se encontram.

Em casos de exposição ao fogo, o consenso de normas e documentos regulamentares existentes, é que devem ser desconsiderados os atributos de resistência e rigidez adicionais providos pelos FRPs. Porém, deve também ser considerado qual será o comportamento da temperatura no elemento em situações diárias, como, por exemplo, num dia quente de verão. Isso porque, caso esta temperatura se aproxime ou ultrapasse um nível crítico, já podem existir alterações que comprometem a segurança da estrutura.

Outros fatores ambientais podem ocasionar um funcionamento inadequado dos FRP. Um destes fatores é a humidade, que de acordo com Silva [5], pode promover redução da Tg, resistência à tração e módulo de elasticidade, e possivelmente alterará o modo de ruína de uma estrutura, ao tornar crítica a interface de ligação entre ela e o FRP. Isso ocorre, possivelmente, por conta de uma plastificação do polímero, através da sua absorção de água. A exposição à radiação ultravioleta (UV) pode gerar fissuras na resina, o que provoca a exposição das fibras, e associada a altos valores de humidade, pode implicar em perdas de propriedades mecânicas dos compósitos FRP.

Estes fatores levam a procura de soluções que viabilizam o prolongamento da vida útil dos compósitos FRP, e muitos estudos foram realizados a respeito da proteção de sistemas que os empregam. O principal foco destas pesquisas é esclarecer o que é eficaz para proteção térmica dos FRP, principalmente quando expostos ao fogo. Desta maneira, com sistemas de proteção adequados, ocorreria a abrangência do emprego desse sistema para soluções estruturais.

Por mais que diversos autores sugiram a necessidade de sistemas de proteção térmica dos compósitos FRP, ainda não é possível encontrar documentos que auxiliem no dimensionamento destes sistemas [16]. Eles podem ser utilizados desde a fase de aplicação da técnica de reforço por FRP, durante a cura da resina, até, especialmente, na fase de serviço do sistema de reforço [3].

2.6. SUSTENTABILIDADE DOS COMPÓSITOS FRP

Na construção civil, os aspetos avaliados para a seleção de materiais são, inicialmente, de performance para a finalidade desejada e económico. Os materiais mais empregados, hoje em dia, são aqueles que vem sendo utilizados há mais tempo, demonstrando que este é um setor conservador a respeito do uso de novos materiais. Desta forma, não é simples para um material como os compósitos FRP passar a ser utilizado com maior frequência.

Recentemente, com as alterações climáticas observadas, houve um aumento da percepção pública a respeito da influência das atividades humanas no meio-ambiente, adicionando um novo aspeto a se considerar na escolha dos materiais para construção, referente a sustentabilidade. Para se obter um mundo sustentável, as necessidades das futuras gerações não podem ser comprometidas por ações do presente, por isso devemos sempre procurar opções que nos atendam, e que ao mesmo tempo geram menor impacto ao ambiente.

Estudos que utilizam a avaliação de ciclo de vida (LCA), são considerados os melhores recursos para interpretar o impacto ambiental de um produto ou serviço. Esta avaliação compara e une informações a respeito de diversos parâmetros e potencial impacto ambiental de um produto ou serviço durante todo o seu ciclo de vida [17]. Estudos foram feitos para avaliar a sustentabilidade dos compósitos FRP, e alguns deles utilizaram a metodologia LCA [17-21].

Maxineasa e Taranu [17] realizaram um estudo que consideraram uma situação em que uma viga de betão armado não apresentava um grau aceitável de segurança, tendo como soluções um cenário em que a viga seria demolida e construída outra no seu lugar, ou reforçada por compósitos FRP. A metodologia LCA utilizada considerou diversas categorias de impacto durante o ciclo de vida dos cenários, como aquecimento global, depleção de recursos e toxicidade. A maior parte dos impactos foi significativamente menor quando utilizados compósitos FRP. Ibrahim [19] recolheu comparações de impacto ambiental gerado por reforço de estruturas de betão com FRP ou demolição e construção de uma nova, e os resultados são mostrados na Figura 6, adaptada da tabela original.

Reference	Type of FRP	Increase % in the load-carrying capacity due to strengthening	Environmental Impact Category	Reduction % in the Environmental impact due to Strengthening
Maxineasa et al. (2015)	CFRP	207%	Global Warming (CO ₂ emissions)	69%
Maxineasa et al. (2015)	CFRP	207%	Human Toxicity	73%
Maxineasa et al. (2015)	CFRP	207%	Ozone Depletion	48%
Palacios-Munoz et al. (2018)	CFRP	50%	Global Warming (CO ₂ emissions)	72%
Palacios-Munoz et al. (2018)	CFRP	50%	Energy Consumption	60%
Maxineasa et al. (2018)	GFRP	N/A	Global Warming (CO ₂ emissions)	73%
Maxineasa et al. (2018)	GFRP	N/A	Ozone Depletion	14.2%
Maxineasa et al. (2018)	CFRP	N/A	Global Warming (CO ₂ emissions)	14.2%
Maxineasa et al. (2018)	CFRP	N/A	Ozone Depletion	66%

Figura 6 - Resultados de LCA para estruturas reforçadas ou reconstruídas, adaptado de [19].

Uma das principais comparações que são feitas aos compósitos FRP refere-se ao aço. Por serem elementos que podem ser utilizados para reforço de estruturas, e por suas boas capacidades de resistência à tração, vários estudos realizam comparações entre os dois materiais. Do ponto de vista econômico, a primeiro momento, o aço pode parecer mais favorável, por conta do alto custo de fabricação dos FRPs. Porém, para maiores intervalos de tempo de vida, os FRPs acabam se tornando mais eficientes. Além disso, a partir de uma maior disseminação do uso de compósitos FRP, o material vem se tornando cada vez mais barato, com mais desenvolvimento ao decorrer do tempo [21].

O processo de construção ao utilizar FRPs é mais seguro que com aço, pois o material é mais leve e o tempo necessário para aplicação é reduzido. Eles também são mais eficientes, pois apresentam um tempo de vida de serviço superior e com menos manutenção e reparos necessários. Em estudos com LCA são observados menores consumos de energia, emissão de carbono e toxicidade humana, em valores que chegam a 78% de redução comparado ao aço [19, 21].

Existem várias vantagens na utilização de compósitos FRP em relação ao betão, como redução do peso total da estrutura, transportes mais rápidos, menos emissão de carbono, aplicação mais simples e rápida e menos manutenção. Para se substituir um grande volume betão, por exemplo, seria necessário apenas uma pequena quantidade de FRP, o que gera melhores performances ambientais. Todas essas vantagens auxiliam na procura por um menor custo de ciclo de vida da estrutura [22].

As desvantagens da sua utilização dizem respeito ao seu custo inicial e descarte. Alguns autores sugerem que alguns métodos de reciclagem, mecânicos ou por incineração, geram produtos que podem ser utilizados para produção de argamassa e betão, por exemplo, sendo ainda necessários mais estudos. Nesta categoria, o aço apresenta maior vantagem, pois existe um grande mercado especializado na sua reciclagem e reutilização, mesmo que produza emissões de CO₂. [22].

Parece haver um consenso a respeito da maior sustentabilidade dos compósitos FRP em relação aos materiais tradicionais de construção. Na literatura, existe um entendimento, que, ao utilizá-los, o impacto ambiental gerado é reduzido, o que representa um papel importante na procura por um desenvolvimento sustentável. As desvantagens da sua utilização podem ser reduzidas com o decorrer do tempo, como é visto com o seu custo de utilização.

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas compósitos de FRP são divididos em duas categorias, nomeadamente pré-fabricados e curados “in situ”. Para utilização de pré-fabricados, são utilizados laminados de FRP com colagem via adesivo epóxi na estrutura a ser reforçada. Os sistemas curados “in situ” são obtidos a partir da utilização de mantas ou tecidos de fibras, com associação a resina de saturação aplicada no momento do reforço. A nomenclatura internacional para os compósitos faz referência às suas fibras, e as mais utilizadas são CFRP (fibras de carbono), GFRP (fibras de vidro) e AFRP (fibras de aramida).

As duas técnicas de colagem, dos sistemas compósitos de FRP no elemento reforçado, mais comuns são a EBR (colagem exterior) e NSM (rasgo na superfície do elemento). O sistema EBR é o mais simples e mais utilizado, e permite realizar reforço à flexão, ao corte e a partir de confinamento. A técnica NSM apresenta vantagens quanto a proteção do reforço e quantidade necessária de FRP a se empregar, porém, necessita de mão de obra mais qualificada e é limitada pela espessura do recobrimento do betão.

O aumento de temperatura gera alterações nos elementos que constituem um compósito FRP, sendo a principal afetada, por esta condição, a sua resina. A partir da temperatura de transição vítrea, a matriz polimérica passa de um estado duro e vítreo para elástico e dúctil. Nesta temperatura, existem perdas de propriedades mecânicas que podem incapacitar o bom funcionamento do sistema de reforço. A característica afetada inicialmente é a de ligação entre o compósito e a estrutura, sendo observado que a partir de valores de temperatura próximos a Tg ocorre alteração do modo de rotura da estrutura, que se traduz no descolamento do sistema de reforço, na maioria das vezes.

Como o sistema é vulnerável ao aumento da temperatura, o consenso dos documentos regulatórios é de que as propriedades adicionais, empregadas pelos compósitos de FRP, sejam desprezadas em combinação de ações ao incêndio. A temperatura também pode afetar os outros componentes de compósitos de FRP, e a partir de valores acima de 200 °C, além da perda de propriedades mecânicas, eles começam a sofrer processos de decomposição. Esta reação acaba por gerar libertação de calor, fumo, gases e resíduos tóxicos, que fatores que põe em risco a vida humana em situações de incêndio em locais fechados.

Outros agentes podem causar interferência nas características de serviço dos compósitos, como a presença de humidade e exposição aos agentes UV. Por conta destes fatores, principalmente da suscetibilidade ao aumento de temperatura, muito vem sendo estudado a respeito de possíveis sistemas de proteção de compósitos de FRP. Entre outros, são realizados ensaios de exposição ao aumento de temperatura e ao fogo, identificando a eficácia destes sistemas em garantir temperaturas abaixo da Tg nos compósitos por períodos prolongados.

A utilização de sistemas de compósitos de FRP aumenta gradativamente, e com isso surgiram comparações com outros elementos estruturais. Estas comparações, em adição às referentes às características mecânicas, podem ser observadas a partir de estudos de análise de ciclo de vida (LCA), que consideram diversas categorias de impacto ambiental gerado pelos materiais. A partir destes estudos, nota-se que os sistemas de compósitos de FRP apresentam menor impacto que o aço e betão armado, por exemplo, ao serem empregados para a mesma solução. São observados valores menores de emissão de carbono, consumo de energia, depleção de ozônio, e outros parâmetros que permitem constatar que os compósitos de FRP geram maior sustentabilidade que o materiais de construção tradicionais.

3

COMPORTAMENTO DE ADESIVOS E RESINAS À TEMPERATURA

3.1. TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA (TG)

3.1.1. Conceito

Denomina-se por Tg a temperatura na qual um polímero passa de um estado vítreo e frágil para um estado elástico e dúctil. Porém, a expressão “Temperatura de Transição Vítrea” não é necessariamente precisa, pois indica que, a partir de uma certa temperatura, ocorreriam mudanças repentinas nas propriedades do material, e este não é o caso. As propriedades de resistência e rigidez dos polímeros sofrem mudanças ao decorrer de uma variação de temperatura, que pode ser de 10 °C a 20 °C [23].

A Tg de um polímero depende de vários fatores, incluindo a estrutura molecular, composição da matriz polimérica, modo e grau de cura, presença de umidade e método de ensaio [24]. O grau de cura química presente num polímero corresponde ao número de ligações cruzadas formadas entre as suas cadeias poliméricas, dependente da temperatura e umidade, sendo que em casos que a temperatura é mais elevada, é possível observar um maior nível de cura, aumentando a Tg do material. O aumento da Tg também pode ser obtido com o envelhecimento físico, a partir da reconfiguração das cadeias poliméricas com o passar do tempo [25].

Os métodos para se identificar a Tg de um polímero relacionam a variação de módulo de elasticidade ou de ganho (E'), módulo de perda (E'') e tangente de δ , ao aumento da temperatura. A tangente de δ representa a relação E''/E' , ou seja, módulo de perda por módulo de ganho, denominado também de fator ou coeficiente de perda. O comportamento das variações ocorre inicialmente com uma perda linear inicial de E' , seguida por uma queda brusca deste valor, também de maneira linear, até que esta variação volte a ser reduzida, até valores residuais de E' . Startsev et al. [24] reuniram as principais definições da Tg recomendadas pelos documentos regulatórios de ISO e ASTM, e algumas são apresentadas na Figura 7. As nomenclaturas utilizadas pelos autores foram modificadas para que correspondessem às mais observadas em estudos a este respeito.

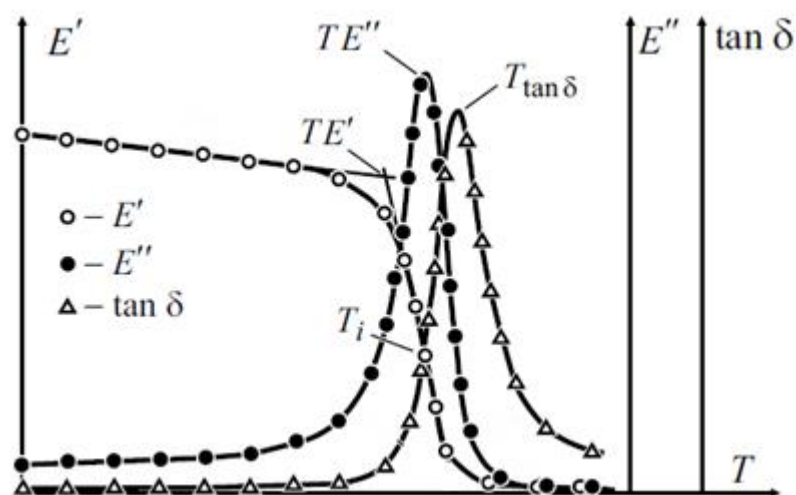


Figura 7 - Temperaturas de transição vítrea de polímeros epóxi, adaptado de [24]

Neste gráfico, a TE' representa ao encontro entre as extrapolações da linha inicial de variação linear de E' , com a linha de variação brusca de E' , e na literatura também pode ser encontrada como *Tg onset*. A “ T_i ” indica a temperatura de um ponto médio do trecho em que ocorre a maior variação de E' , podendo da mesma forma ser descrita como “ T_m ”. A TE'' é determinada pela temperatura no ponto máximo do módulo de perda, também denominada de temperatura de pico de módulo de perda ou *Tg Peak Loss*. A $T_{\tan \delta}$ indica a temperatura a qual ocorre no pico do fator de perda.

Ainda existe uma temperatura obtida quando o módulo de ganho é reduzido em 2% a partir de TE' , denominada de “*Tg 2% offset*”, e juntamente com TE' , $T_{\tan \delta}$ e TE'' , correspondem aos valores de temperatura que são utilizados para determinar a *Tg* de um polímero epóxi. A seleção de valores a se utilizar pode variar de acordo com o ensaio e com o autor, sendo que para os “2% offset” e TE' são observadas as menores temperaturas, mais indicadas para determinação de temperaturas de serviço aceitáveis, sem perdas acentuadas de propriedades mecânicas do material [25].

3.1.2. Ensaaios

A fim de se observar a variação das propriedades mecânicas dos polímeros correspondente ao aumento da temperatura, os principais ensaios utilizados são o DMTA, DMA e o DSC, representados pela Figura 8, mas também podem ser usados os *Heat Distortion Temperature* (HDT) e *Thermomechanical Analysis* (TMA). Dentre esses, os mais comuns para determinação da *Tg* são o DMTA e o DMA, pois indicam explicitamente as variações dos parâmetros avaliados, podendo gerar um gráfico como visto na Figura 7. O método de DSC mede o aquecimento necessário para que aumente a temperatura de um epóxi, e prover informações que avaliam diretamente a cura química do mesmo [23, 24].

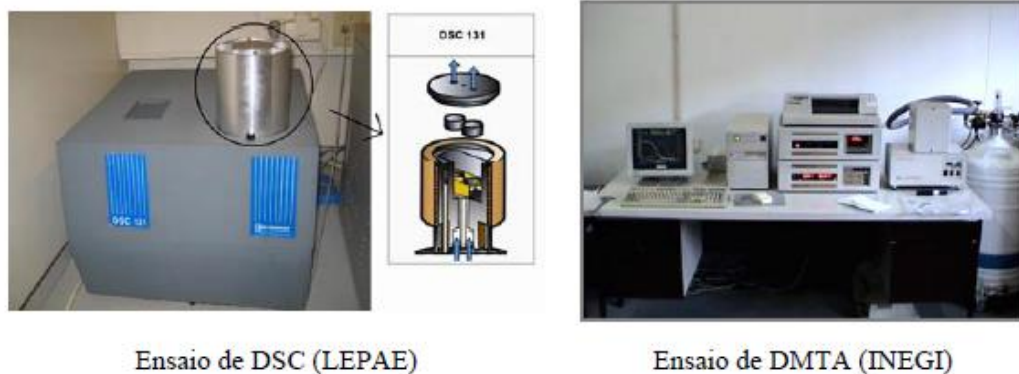


Figura 8 - Equipamentos utilizados nos principais ensaios de avaliação da Tg, adaptado de [3]

A análise térmica dinâmico-mecânica, conhecida por DMTA, similar a análise dinâmico-mecânica (DMA), avalia a degradação das propriedades de um material sob elevadas temperaturas em carregamentos cíclicos. Este é o ensaio considerado mais conveniente, pois indica as mudanças nos parâmetros de forma explícita. Também podem ser ajustados alguns fatores, como as frequências de vibração do ensaio e taxas de aquecimento, que resultam em variações no resultado final da Tg [24]. A partir deste ensaio, a definição da Tg utilizada fica ao critério do autor, que pode interpretar os resultados obtidos da maneira mais adequada.

A análise térmica por calorimetria diferencial de varrimento, ou DSC, é realizada ao medir o fluxo de calor de uma amostra conforme a temperatura ou tempo, comparando o seu comportamento com um material de referência, inativo para aquela faixa de temperaturas. A zona de transição vítrea é observada quando ocorre uma repentina variação de calor específico da amostra, e o valor da Tg obtido pelo ensaio se dá pelo valor médio desta zona. Este ensaio é considerado rápido, e necessita de apenas uma pequena amostra do material, porém, demanda uma boa calibração do equipamento, sendo a análise dos resultados não tão simples quanto a do DMTA, pois apresentam curvas que podem diferir do padrão de curvas típicas, como é mostrada na Figura 9.

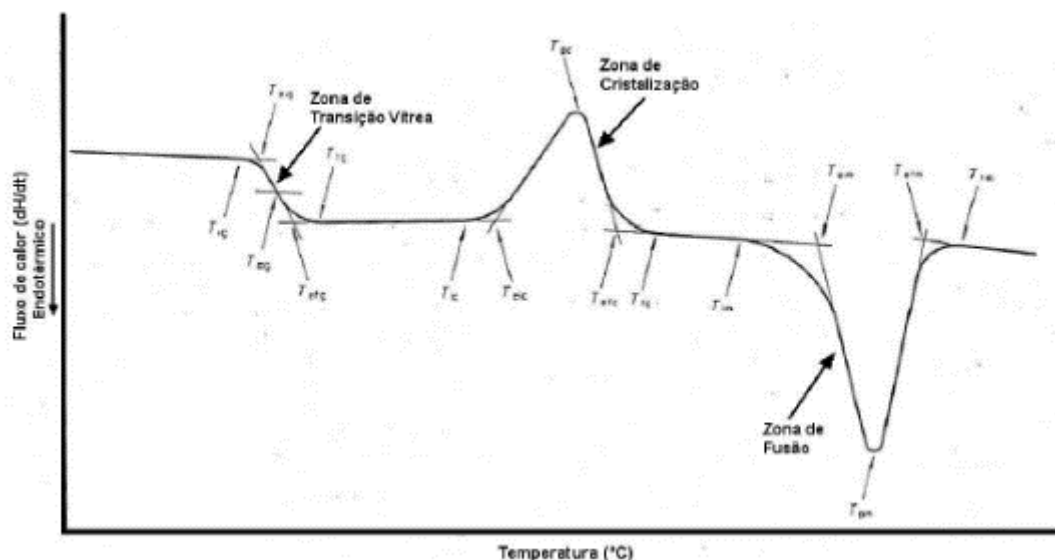


Figura 9 - Curva típica de ensaio DSC, adaptado de [26] e [5].

3.2. VALORES DA Tg DAS RESINAS COMERCIAIS

3.2.1. Casos de Estudo

Podemos encontrar na literatura vários artigos que estudam os valores da Tg de resinas disponíveis comercialmente. Estes estudos avaliam a Tg de acordo com vários parâmetros, como condição de cura e pós-cura (temperatura, humidade relativa e duração), assim como o método de ensaio utilizado. Neste trabalho, pretendemos identificar os valores obtidos pelos autores a respeito de resinas comerciais disponíveis em Portugal, a fim de se poder obter relações entre os parâmetros e o valor da Tg observado.

Juvandes et al. [6] avaliaram as Tgs de adesivos e resinas epóxi comercialmente encontrados em Portugal, através de ensaios DSC e DMTA. Os materiais foram sujeitos a condição de cura a temperatura ambiente em laboratório e obras, curados em laboratório com pós-cura a 80 °C, e curados a 80 °C, sendo que os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 1. Os ensaios DMTA seguiram a recomendação da ISO 6721-1 [27], que recomenda a definição da Tg como o pico do fator de perda, ou Ttan δ .

Tabela 1 - Resultados da Tg de resinas comerciais, por [6].

Sistemas FRP		Ambiente de cura	Ambiente de pós-cura	Resultados dos ensaios - Tg (°C)	
Produto	Resina			DSC	DMTA
Laminado	Mbrace Resin 220	Laboratório	-	54,5	57,5
Laminado	Sika Sikadur 30	Laboratório	-	45,6	57,1
Laminado	Mapei Adesilex PG1	Laboratório	-	43,6	-
Laminado	Mapei Adesilex PG2	Laboratório	-	43,8	-
Manta	Bettor Resin 55	Laboratório	-	55,5	57,2
Manta	Sika Sikadur 330	Laboratório	-	49,3	55,6
Manta	Mapei Mape Wrap 21	Laboratório	-	50,5	-
Manta	Mapei Mape Wrap 31	Laboratório	-	53,2	-
Laminado	S&P Resin 220	Obra	-	37,0	48,7
Manta	S&P Resin 55	Obra	-	44,4	54,8
Laminado	Mbrace Resin 220	80 °C	-	56,4	-
Laminado	Sika Sikadur 30	80 °C	-	51,6	-
Laminado	Bettor Resin 220	Laboratório	80 °C	54,1	-
Manta	Bettor Resin 55	Laboratório	80 °C	54,0	-

Neste mesmo estudo, os autores também identificaram valores de temperatura crítica (Tc) para sistemas FRP ensaiados por DMTA, sendo calculados a partir do gráfico de evolução de E' pela temperatura. Foi observado que os valores de Tc eram normalmente 11 °C abaixo dos valores da Tg observados pelo mesmo ensaio. O valor de temperatura crítica representa a temperatura máxima que um adesivo/resina pode atingir em estado de serviço, de maneira que não sofra deteriorações.

Othman et al. [25] realizaram ensaios DMA em resinas comerciais *Sika Sikadur 330*, expondo-as a diferentes condições de cura e observando as temperaturas Tg obtidas a partir da classificação Ttanδ. Neste estudo, os cenários de cura variavam em questão de tempo de cura, humidade relativa e temperatura durante o período. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da Tg para diferentes condições de cura, por [25].

Sistema FRP		Humidade Relativa	Temperatura de cura (°C)	Tg (°C) para tempo de cura			
Produto	Resina			3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Manta	Sika Sikadur 330	0%	24	55,9	58,9	61,5	63,1
Manta	Sika Sikadur 330	Imerso	24	54,7	57,7	57,2	57,4
Manta	Sika Sikadur 330	0%	50	80,1	83,0	84,1	85,0
Manta	Sika Sikadur 330	Imerso	50	67,8	68,9	68,9	68,6

Num estudo de Firmo et al. [13], foram realizados ensaios DMA, a fim de avaliar a Tg do adesivo comercial *S&P Resin 220*. As amostras de adesivo foram curadas à temperatura ambiente, em laboratório, sendo que metade passou por um processo de pré-cura, por 2 horas, a 120 °C. Para os ensaios, ocorreu a variação da taxa de aquecimento, e assim pode-se avaliar a influência desta taxa no resultado da Tg, sendo que estas foram avaliadas conforme os métodos TE', TE'', Ti e Ttanδ, com os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da Tg do adesivo S&P Resin 220, por [13].

Ambiente de pré-cura	Taxa de aquecimento (°C/min)	Resultados dos ensaios - Tg (°C)			
		DMA			
		TE'	Ti	TE''	Ttanδ
-	1	47,3	50,4	51,4	60,2
-	1	47,0	50,3	51,1	59,9
2 horas / 120 °C	1	43,6	48,7	55,7	66,1
2 horas / 120 °C	1	43,6	48,6	55,9	66,0
-	2	49,5	53,1	53,9	61,0
-	2	49,7	53,4	54,1	61,2
2 horas / 120 °C	2	47,0	53,0	58,0	68,0
2 horas / 120 °C	2	47,2	53,3	58,7	68,3
-	5	53,6	57,6	58,4	66,1
-	5	53,2	57,3	58,1	65,8
2 horas / 120 °C	5	50,9	58,6	61,5	71,1
2 horas / 120 °C	5	51,2	59,2	61,3	70,5

Em Portugal, Cruz et al. [28] investigaram o efeito do envelhecimento natural de adesivos epóxis nas suas Tgs, a partir de ensaios DMA. Inicialmente, os exemplares de adesivos *S&P Resin 220* foram curados em laboratório, por sete dias, a 23 °C, e posteriormente duas amostras permaneceram em laboratório, com temperatura e humidade relativa controladas, e as demais foram expostas ao ambiente em quatro regiões diferentes do país. Neste estudo, foram utilizados os métodos de avaliação da Tg de TE' e Ttanδ em três momentos: logo após a sua cura, com um ano e dois anos de exposição. Os valores da Tg encontrados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da Tg do adesivo S&P Resin 220 exposto ao ambiente, por [28].

Ambiente de exposição	Tg (°C) para tempo de exposição					
	TE'			Ttanδ		
	Inicial	1 ano	2 anos	Inicial	1 ano	2 anos
Laboratório / 20 °C / 50% HR		50,4	50,5		62,0	62,8
Laboratório / 20 °C / Imerso		46,6	43,2		57,9	54,9
Ambiente 1 - Lisboa	46,2	51,8	54,1	57	64,5	67,6
Ambiente 2 - Seia		51,5	54,9		62,7	65,8
Ambiente 3 - Elvas		51,2	56,2		65,9	70,4
Ambiente 4 - Viana do Castelo		49,9	-		61,1	-

Outros autores, como Silva et al. [29], realizaram estudos utilizando resinas comerciais disponíveis em Portugal, em que avaliaram os seus valores da Tg sob diferentes condições de cura, pós-cura ou exposição. Seus resultados são apresentados no Anexo A1, e serão discutidos posteriormente.

3.2.2. Análise de Resultados

Existem várias maneiras de se avaliar a Tg de uma resina, e é expectável observar uma diferença de valores de acordo com ensaio utilizado e método de avaliação do autor. Esta é a razão da Tg ser caracterizada em forma de intervalo, como, por exemplo, 40 °C - 60 °C [6, 30]. Este parâmetro também sofre alterações dependendo do método de cura, pré e pós-cura, humidade e ambiente de exposição.

Os resultados obtidos por Juvandes et al. [6] apresentaram diferenças de cerca de 10 °C a mais da Tg quando realizados por ensaios DMTA, em comparação aos obtidos por ensaios DSC. Como o método de avaliação da Tg, por DMTA, foi a partir da temperatura de pico de tanδ, sendo este o que apresenta valores mais altos dentre os possíveis por este ensaio, caso fossem observados os valores referentes a outras definições, como TE', os resultados provavelmente seriam mais próximos aos obtidos por DSC.

O estudo realizado por Othman et al. [25] evidenciou a evolução dos valores da Tg de acordo com o tempo de cura do epóxi, em situações em que esta ocorreu com humidade relativa de 0%. Este aumento foi de até 7,2 °C no valor final, quando a cura foi feita por 28 dias, a 24 °C, comparada a três dias. O aumento da temperatura de cura provocou também um aumento no valor da Tg, sendo este mais expressivo, representando uma variação de aproximadamente 22 °C no cenário em que esta foi realizada a 50 °C, em comparação a 24 °C. Entretanto, em situações que a resina esteve submersa, não foi possível observar a mesma evolução da Tg ao decorrer do tempo, e ela manteve-se praticamente constante após

sete dias. O aumento da temperatura de cura em situação submersa gerou um acréscimo no valor da Tg, entretanto este aumento foi de apenas torno de 11 °C, metade do incremento em estado seco.

Nos ensaios de DMA realizados por Firmo et al. [13], foi possível observar variações da Tg de acordo com o método de avaliação da mesma, para cada amostra. Como esperado, os menores valores da Tg foram constatados a partir do método de TE', e os máximos de Ttanδ. A variação máxima entre estes valores superou 22° em situações em que as amostras passaram por processo de pré-cura, e manteve-se em torno de 12 °C nas amostras que não passaram por ele. Os resultados indicam que este processo gerou um aumento da Tg das amostras, quando foi observada por Ttanδ e TE'', e uma redução por TE' e Ti, sem claros motivos. Outro aspecto evidenciado foi o acréscimo de valor da Tg ao aumentar a taxa de aquecimento do ensaio, sendo que a alterando de 1 °C/min para 5 °C/min resultou num aumento próximo de 6 °C no valor da Tg.

Novamente, pelo trabalho de Cruz et al. [28], observamos a diferença entre as Tgs obtidas segundo os métodos de avaliação. Neste caso, especialmente por se tratar da mesma resina estudada por Firmo et al. [13], a Tg avaliada por Ttanδ também foi 12 °C mais elevada que a obtida por TE'. Além disso, nota-se um incremento na Tg ao decorrer do tempo, principalmente durante o primeiro ano, maior em amostras expostas ao ambiente, e desprezível em exemplares imersos. Outro ponto observado é que após o primeiro ano, as amostras mantidas em laboratório, com ambiente controlado, mantiveram os seus valores da Tg, e no caso das submersas, apresentam redução. Entretanto, nas expostas ao ambiente, o valor da Tg ainda apresenta acréscimos de até 5,1 °C em relação ao ano anterior.

3.2.3. Parâmetros Importantes

É evidente que possam ser observados valores diferentes da Tg de uma mesma resina, seja por conta de ensaios, avaliações ou outras condições. Apesar de os métodos DMTA e DMA serem os mais comuns para avaliar esta propriedade, eles podem ser interpretados de diversas maneiras, que resultarão em diferentes valores. Além disso, alterações em parâmetros do ensaio, como a taxa de aquecimento e frequência utilizada no ensaio, podem resultar em divergências, fato reafirmado por outros autores [24, 31].

O processo de cura é diretamente responsável pelo valor da Tg de uma resina. Ao aumentar a temperatura de uma resina durante este processo, pode-se obter valores consideravelmente superiores da Tg. Observa-se também uma evolução do valor da Tg ao decorrer do tempo, nomeada de envelhecimento físico, exceto em casos que a amostra se encontra com alta humidade relativa, como em condição imersa. Nestes casos, não é possível observar o acréscimo da Tg ao decorrer do tempo, e após períodos acima de um ano, pode ainda ocorrer uma redução no valor da Tg.

Startsev et al. [24] compararam resultados da Tg de diversos ensaios obtidos por outros autores, e observaram que as maiores discrepâncias ocorreram por conta da utilização de diferentes métodos de avaliação de temperatura em cada ensaio, quando estes eram realizados sob os mesmos parâmetros. Os autores também verificaram que os padrões ISO e ASTM indicam diferentes temperaturas características como critério de identificação da Tg. Proia e Matthys [32] constataram que resultados da Tg observados a partir de ensaios DSC segundo a norma EN:12614:2004 [33], produzem resultados incompatíveis com condições "in situ", pois o procedimento recomenda realizar dois ciclos de aquecimento, com a Tg sendo obtida pelo segundo, ainda que o primeiro ciclo gere alterações na amostra.

Ao expor uma resina a temperaturas elevadas após a sua cura, podem ser notados incrementos na sua Tg e melhorias nas suas propriedades mecânicas, mesmo que esta pós-cura seja resultado de um ciclo de ensaio, como DMA ou DSC [28]. Porém, Proia e Matthys [32] perceberam que este acréscimo parece

ser revertido após 30 dias em condições ambientes, mostrando não ser prudente considerá-lo para valores da Tg. Juvandes et al. [6] também verificaram que não houve acréscimo da Tg a partir da técnica de pós-cura a 80 °C, sugerindo que esta não é uma técnica eficiente. O processo de pré-cura não apresentou melhorias em Tg, podendo até mesmo indicar um falso aumento, apenas quando consideradas as definições Ttan δ e TE', mas reduzindo a Tg quando observada por TE' e Ti.

De qualquer forma, a fim de se avaliar a Tg de um compósito FRP aplicado "in situ" de maneira pertinente, a partir de ensaios com amostras curadas em laboratório, a condição higrotérmica de cura deve ser replicada de forma fidedigna, para que estes valores sejam representativos.

Os métodos de definição da Tg podem apresentar uma considerável diferença no valor alcançado, e apesar de existirem normas e recomendações a se seguir, não existe um mecanismo que auxilie na convergência dos valores, gerando faixas de temperatura da Tg para uma mesma resina ou adesivo. Dentre as definições mais utilizadas, a TE' apresenta as menores temperaturas, e, em contrapartida, a temperatura característica Ttan δ , recomendada por alguns documentos, pode superá-la em mais de 12 °C.

3.3. CONCEITO DE TEMPERATURA CRÍTICA (Tc)

O desempenho de um reforço estrutural por compósitos FRP está relacionado a sua temperatura de serviço. A partir de um certo ponto, ocorre uma rápida degradação das propriedades mecânicas do polímero, podendo comprometer este desempenho. A procura por um método de determinação desta característica introduziu o conceito da Tg. Porém, como observamos, esta temperatura é dependente de vários fatores, e pode induzir a valores superiores ao que o compósito começa a perder os seus atributos. Desta forma, não podemos concluir que o reforço é eficiente somente pelo facto da sua temperatura não atingir Tg. Por este motivo, deve ser definida uma temperatura máxima em que o compósito ainda retém as suas propriedades iniciais, sendo esta denominada de temperatura crítica (Tc).

O EUROCOMP [34] recomenda que a Tc seja fixa de 10 °C a 20 °C mais baixa que o valor da Tg de um compósito, o que representaria um comportamento indicado na Figura 10 [6]. A *fib Bulletin 90* [35] sugere esta mesma faixa de redução da Tg, quando utilizados os métodos DSC, DMA e DMTA. A recomendação de ACI 440.2R-17 [36] propõe que esta redução seja de 15 °C quando a Tg for definida por ensaios DMTA e DMA, em condições secas [32]. Proia e Matthys [32] observaram que a margem de segurança de 10 °C é adequada para ensaios DSC em condições secas e húmidas, com exceção de temperaturas mais elevadas (acima de 70 °C), e para ensaios DMTA e DMA, o limite da "Tg - 15 °C" mostrou ser apropriado. Juvandes et al. [6] concluíram que a Tc se aproximou da "Tg - 11 °C", para ensaios DMTA.

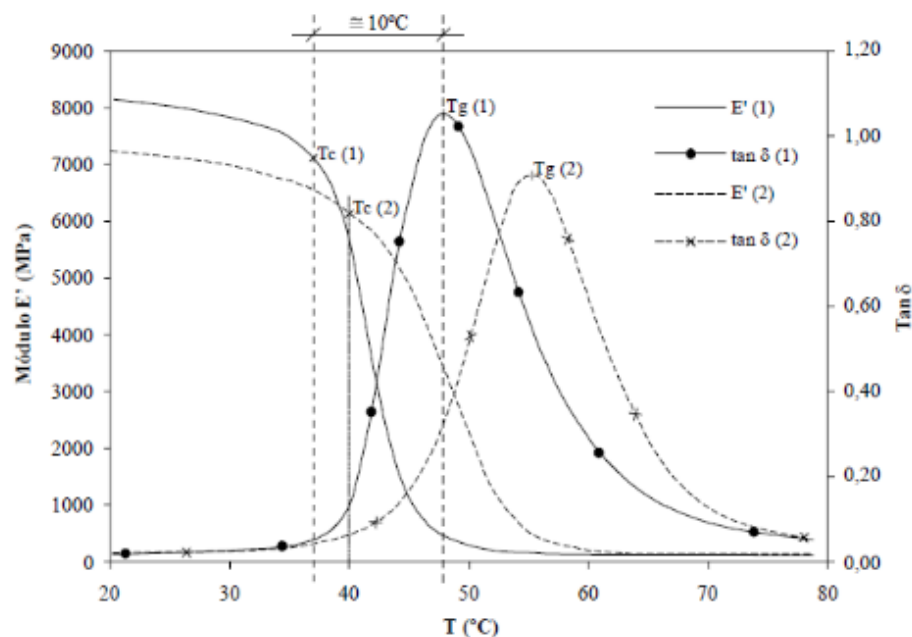


Figura 10 - Valores indicados da T_c , adaptado de [6]

De acordo com os gráficos das Figura 7 e Figura 10, percebe-se que a T_c calculada a partir da redução da T_g (definida por $T_{\tan \delta}$) se aproxima de valores de $T_{E'}$, que ocorre no início da fase em que ocorre a maior diminuição do módulo de elasticidade do material.

Portanto, a fim de estabelecer valores representativos de T_c para compósitos em condições reais, deve ser considerada qual a temperatura característica utilizada para determinação da T_g . No caso de $T_{\tan \delta}$, obtida por ensaios DMTA e DMA, valores de T_c pertinentes podem ser obtidos entre “ $T_g - 15^{\circ}\text{C}$ ” ou “ $T_g - 10^{\circ}\text{C}$ ”. Porém, para definições de $T_{E'}$ ou T_i , essa redução pode ser considerada muito conservadora, podendo ser utilizadas menores reduções. A definição da T_g por $T_{E'}$ resulta em valores próximos da T_c , e pode ser uma representação aproximada dela. Para ensaios DSC, um valor adequado da T_c pode ser obtido por “ $T_g - 10^{\circ}\text{C}$ ”.

Entre os adesivos e resinas encontrados em Portugal, os valores de T_c , registados e estimados, podem variar entre $32,6^{\circ}\text{C}$ e $46,6^{\circ}\text{C}$, o que representam temperaturas que podem ser atingidas durante o tempo de serviço dos compósitos FRP, e devem ser avaliadas para a sua segurança [6].

3.4. ENVOLVENTE TÉRMICA DE CASOS DE OBRA

A temperatura superficial de toda estrutura depende de alguns fatores, como temperatura ambiente, tempo e intensidade de radiação solar a que ela está sujeita. No caso das estruturas reforçadas por compósitos FRP, esta temperatura influenciará diretamente sobre as características mecânicas do adesivo ou resina, caso ultrapasse o valor de T_c .

Existem técnicas de monitorização que avaliam a situação higrotérmica de estruturas, registando valores de temperatura ambiente (TA), do substrato (TS), e valores de humidade relativa (HR) em locais estratégicos. Com estes dados, podem ser estimados os valores médios máximos e mínimos num determinado período de avaliação, que podem ser correlacionados com os limites de condição de temperatura e humidade relativa aceitáveis pelo sistema de reforço de FRP [6].

Juvandes et al. [6] utilizaram esta técnica para avaliar estes parâmetros em estruturas de diversas localidades em Portugal. Para o estudo, foram analisadas, entre outras, obras de barragens, pontes e viadutos, divididas em região Norte e Centro-Sul do país, e suas características são demonstradas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Obras, na região Norte, observadas por Juvandes et al. [6].

Caso	Obra/Estrutura	Localização (ambiente)	Orientação do sensor	Material	Cor
C1	Viaduto Parque da Maia	Maia (Urbano)	N - S	Aço	Cinza-escuro
C2	Ponte do Pinhão	Pinhão (Rural)	E - O	Aço	Cinza-escuro
C3	Viaduto das Andressas	Porto (Urbano)	E - O	Aço	Cinza-claro
C4	Ponte Luiz I	Porto (Urbano)	E - O	Aço	Cinza-escuro
C5	Ponte N. Sra da Guia	Ponte de Lima (Urbano)	E - O	Betuminoso	Preto
C6	Viaduto de Cartes	Porto (Urbano)	N - S	Betão	Cinza-claro
C7	Barragem do Catapereiro	Vila Nova de Foz Côa (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro
C8	Barrag. do Covão do Meio	Seia (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro
C9	Demonstrador laboratorial	Porto (Urbano)	Interior	Betão	Cinza-claro

Tabela 6 - Obras na região Centro-Sul observadas por Juvandes et al. [6].

Caso	Obra/Estrutura	Localização (ambiente)	Orientação do sensor	Material	Cor
C10	Pavilhão Atlântico	Lisboa (Urbano)	Interior	Madeira	Castanho-claro
C11	Barragem do Cabril	Leiria (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro
C12	Barragem do Funcho	Silves (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro
C13	Barragem da Pracana	Mação (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro
C14	Ponte sobre o Rio Sorraia	Salvaterra de Magos (Rural)	N - S	Betão	Cinza-claro

Sabe-se que o tipo de material pode interferir nas características mensuradas, como a humidade relativa, sendo mais facilmente absorvida pela madeira. Por esta razão, os autores recolheram informações das variáveis que consideraram mais importantes para avaliar os resultados, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de parâmetros higrotérmicos obtidos por Juvandes et al. [6].

Caso	Período de observação (meses)	Valores observados					
		TS (°C)		TA (°C)		HR (%)	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
C1	9	37,8	1,0	-	-	-	
C2	6	-	-	49,1	-2,9	-	
C3	6	41,3	5,8	-	-	-	
C4	13	44,5	2,2	42,1	1,0	-	
C5	31	46,9	0,3	36,9	0,1	-	
C6	33	37,1	3,4	37,2	0,6	-	
C7	74	37,8	1,4	39,1	-7,1	-	
C8	60	27,5	1,1	26,6	-7,3	-	
C9	11	32,9	14,5	34,6	10,3	77,7	20,0
C10	33	35,9	9,2	34,0	5,0	84,5	20,4
C11	50	27,5	4,0	22,0	7,5	-	
C12	60	49,2	7,1	39,5	1,0	-	
C13	60	36,1	5,2	44,2	0,0	-	
C14	8	34,7	4,7	39,3	0,0	46,0	21,7

Os autores observaram que, na maioria das vezes, a máxima temperatura superficial da estrutura superou a máxima temperatura ambiente, e quando isso não ocorreu, os valores se aproximaram. Foi verificado também que nem sempre o máximo valor de temperatura foi encontrado nos meses de verão, ou mínimo nos meses de inverno. Os tipos de incidência de raios solares influenciaram nas máximas temperaturas, observadas principalmente em locais onde foram empregados materiais betuminosos. Os autores consideram que, na região centro-sul, a máxima temperatura, observada na estrutura referente ao caso C12, foi resultado da sua localização [6].

Magalhães [37] realizou monitorações de temperatura em pontos estratégicos de pontes rodoviárias em São Mamede de Ribatua, em Portugal, durante 46 e 62 meses. Os sensores foram posicionados na parte inferior do tabuleiro, em orientação norte-sul para a ponte 1, e Nordeste-Sudoeste para a ponte 2. Os registos de temperatura são apresentados na Figura 11, em que cada coloração representa a medição de um sensor.

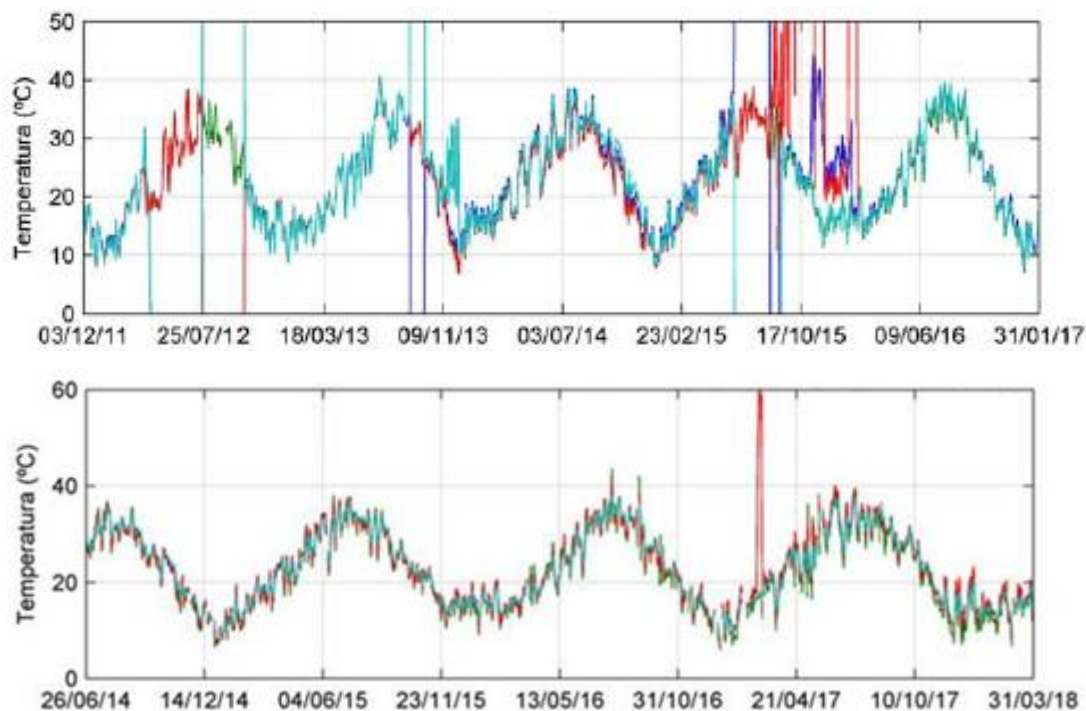


Figura 11 - Registo de Temperaturas nas Pontes 1 e 2, por [37].

Apesar de não ser possível observar com precisão os valores de temperatura máxima registados pelos sensores, admite-se que estes valores ultrapassaram pontualmente os 40 °C. Estes resultados complementam a base de dados de valores máximos de temperatura superficial observados por Juvandes et al. [6] em Portugal, em que o máximo se aproximou de 50 °C.

A norma EN 1991-1-5 [38] indica valores de temperatura que devem considerados para dimensionamento de estruturas em estado limite último ou de utilização, que dão origem a acções térmicas. A norma diz respeito a valores de temperatura do ar ambiente exterior (T_{out}), calculada a partir da soma da temperatura máxima do ar à sombra (T_{max}) e fator da coloração da superfície da estrutura. Os valores de T_{max} correspondem a um período de retorno de 50 anos, e em Portugal podem ser 45 °C, 40 °C ou 35 °C, correspondentes às zonas A, B e C, como indicadas na Figura 12. O fator de coloração da superfície pode ser 0 °C, se for clara e brilhante, 2 °C, para cores claras, e 5 °C para superfícies escuras. Portanto, o caso que apresentaria o maior valor de T_{out} seria de 50 °C, temperatura que poderia superar a T_g de algumas resinas comerciais.

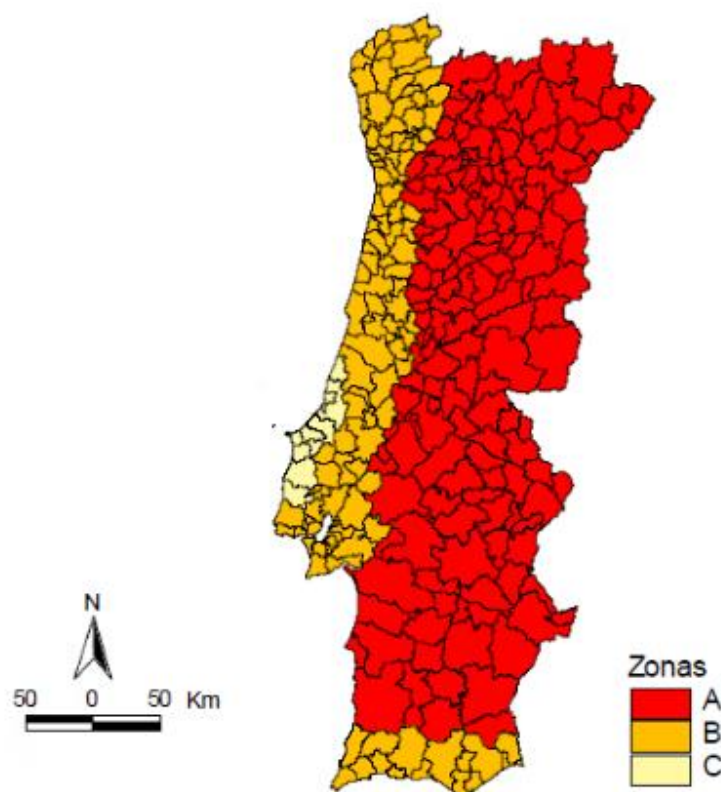


Figura 12 - Zonas térmicas para temperaturas máximas (Tmax), em Portugal, adaptado de [38].

No Manual de Aplicação de Revestimento Cerâmicos, de Sousa et al. [39], é apresentada a Equação 1, que permite calcular a temperatura de superfície de um elemento (Tse) [°C] a partir da temperatura exterior (Te) [°C], radiação solar (R) [W/m²], coeficiente de absorção da radiação solar global (α_s) [-], e condutância térmica superficial exterior (h_e) [W/m².°C]. Os autores sugerem que pode ser utilizado o valor de 25 W/m².°C para a condutância térmica, em situações em que o valor de α_s é condicionado principalmente pela cor da superfície.

$$Tse = Te + \frac{\alpha_s * R}{h_e} \quad (1)$$

Os valores de radiação solar global máxima, para Portugal Continental, são apresentados de acordo com orientação das superfícies verticais e estação do ano, apresentadas na Figura 14. Os coeficientes de absorção de radiação solar, dependentes das cores das superfícies, também podem ser estimados a partir dos valores da Figura 13.

Cor da Superfície	Valor de α_s
Branco	0,2 a 0,3
Amarelo, Cor-de-laranja, Vermelho claro	0,3 a 0,5
Vermelho escuro, Verde claro, Azul claro	0,5 a 0,7
Castanho, Verde escuro, Azul vivo, Azul escuro	0,7 a 0,9
Castanho escuro, Preto	0,9 a 1

Figura 13 - Valores de α_s de superfícies em função da cor, adaptado de [39, 40]

Estações do Ano	Radiação solar global máxima – R [W/m ²]						
	Orientação						
	N	E	SE	S	SO	O	H*
Inverno	90	680	940	1050	920	670	750
Primavera/Outono	150	720	980	790	940	700	-
Verão	180	900	880	460	800	780	1100

* Superfície horizontal, com inclinação entre 0° e 15°.

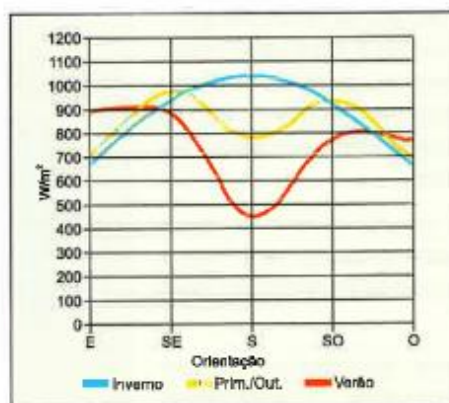


Figura 14 - Radiação solar máxima incidente em superfícies em Portugal, adaptado de [39, 41].

Na literatura, podemos encontrar trabalhos que realizaram medições dos parâmetros utilizados para o cálculo de Tse, como o de Carneiro [42]. Na sua pesquisa, foram registados valores de α , R, Te e Tse, através de termopares, pirômetros e outros equipamentos. Apesar de existirem outros fatores que influenciam no valor final da temperatura superficial, a equação de Sousa et al. [39] revela produzir uma estimativa próxima, e até mesmo conservadora da Tse observada “in situ”, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros registados por [42] e estimados pela Equação 1 [39].

Valores registados por Carneiro [42]				Valor calculado pela equação de Sousa et al. [39]
α_s	Te máx. (°C)	R máx. (W/m ²)	TSE máx. (°C)	TSE (°C)
0,9	24	850	62	54,6
0,9	24	850	60	54,6
0,85	24	850	60	52,9
0,86	24	850	53	53,24
0,17	24	850	36	29,78
0,9	29	800	72	57,8
0,76	29	800	66	53,32
0,8	29	800	61	54,6
0,85	29	800	68	56,2
0,86	29	800	64	56,52
0,17	29	800	40	34,44

Ao utilizar a Equação 1, considerando os valores de T_{max} sugeridos pela EN 1991-1-5 [38] referentes à cota zero (nível do mar), como sendo a máxima temperatura exterior (T_e) de acordo com cada zona térmica (Figura 12), e os dados máximos de R e h_e propostos por Sousa et al. [39], podemos estimar valores máximos de temperatura superficial de elementos verticais em Portugal, de acordo com a sua disposição e localização. O valor de α_s admitido foi de 0,8, que corresponde a uma parede de betão [43]. Estes valores, que representam elementos com exposição direta ao sol, são exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Temperatura superficial máxima de elementos verticais para diferentes zonas de Portugal.

Caso	Localização (Zona)	TSE (°C)	TE (°C)	α_s	R (W/m ²)	h_e (W/m ² ·°C)
Superfície de betão, face ao norte	Évora (A)	50,8	45,0	0,8	180,0	25,0
Superfície de betão, face a este	Évora (A)	73,8	45,0	0,8	900,0	25,0
Superfície de betão, face ao sul	Évora (A)	59,7	45,0	0,8	460,0	25,0
Superfície de betão, face a oeste	Évora (A)	70,0	45,0	0,8	780,0	25,0
Superfície de betão, face ao norte	Porto (B)	45,8	40,0	0,8	180,0	25,0
Superfície de betão, face a este	Porto (B)	68,8	40,0	0,8	900,0	25,0
Superfície de betão, face ao sul	Porto (B)	54,7	40,0	0,8	460,0	25,0
Superfície de betão, face a oeste	Porto (B)	65,0	40,0	0,8	780,0	25,0
Superfície de betão, face ao norte	Óbidos (C)	40,8	35,0	0,8	180,0	25,0
Superfície de betão, face a este	Óbidos (C)	63,8	35,0	0,8	900,0	25,0
Superfície de betão, face ao sul	Óbidos (C)	49,7	35,0	0,8	460,0	25,0
Superfície de betão, face a oeste	Óbidos (C)	60,0	35,0	0,8	780,0	25,0

A temperatura superficial dos elementos mostra ser diretamente afetada pela exposição solar e absorção desta radiação. Em Portugal, a disposição em que a Tse pode ser mais afetada por esta propriedade corresponde a elementos verticais com face a este, e em casos extremos, pode superar 70 °C.

A partir dos resultados observados por Juvandes et al. [6] e Magalhães [37], assim como os estimados pela Equação 1, conclui-se que as temperaturas superficiais de estruturas localizadas em Portugal podem atingir valores significativos, a ponto de prejudicar o funcionamento de reforços com compósitos FRP, por superarem a sua T_c . Isto reforça o facto da necessidade de avaliação do ambiente ao qual o compósito FRP estará sujeito durante a sua utilização, e caso necessário, deve ser aplicado um sistema de proteção térmica.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento das propriedades mecânicas de um polímero apresenta uma variação peculiar com o aumento de temperatura. Por conta disso, utiliza-se o conceito da T_g para definir a passagem de um estado vítreo e frágil para um estado elástico e dúctil do elemento. Porém, esta temperatura é dependente de diversos fatores, como condições de cura e método de ensaio. A temperatura limite em que um

compósito retém aproximadamente as suas propriedades iniciais pode ser definida como a T_c , obtida por ensaios ou aproximações da T_g , como “ $T_g - 15\text{ °C}$ ” e “ $T_g - 10\text{ °C}$ ”, de acordo com o ensaio.

A T_c dos compósitos FRP disponíveis comercialmente em Portugal pode chegar a valores mínimos de $32,6\text{ °C}$, dependendo do seu processo de cura e ambiente higrotérmico. É possível observar que as temperaturas superficiais de estruturas em Portugal possam alcançar valores superiores a T_c , a partir de registos feitos em obra e estimativas obtidas por equações teóricas.

Para garantir um bom comportamento de sistemas de reforço com FRP, o utilizador deve classificar corretamente a sua T_c correspondente a situação “in situ”, assim como avaliar as condições ambientais às quais o compósito estará sujeito. Os parâmetros mais importantes a se avaliar são a temperatura ambiente, humidade relativa e grau de exposição solar. Esta avaliação pode ser feita através de documentos regulatórios e estimativas propostas na literatura, com base na sua localização e disposição. Em casos em que é constatado que a temperatura do compósito pode superar a sua T_g , deve ser aplicado um sistema de proteção térmica.

4

COMPÓSITOS DE FRP EXPOSTOS AO FOGO

4.1. COMBUSTÃO E TOXICIDADE

A principal preocupação referente a utilização de compósitos de FRP diz respeito ao seu comportamento perante o aumento de temperatura, que ocorre com maior intensidade em casos de incêndio. A inflamabilidade do compósito é uma característica natural da sua matriz polimérica. Após entrar em combustão, a matriz pode liberar gases, resíduos e fumos tóxicos, além de perder rapidamente as suas propriedades mecânicas [44, 45].

Existem algumas características que podem ser avaliadas e mensuradas a partir da reação dos compósitos ao fogo, como inflamabilidade, pico e taxa de libertação de calor, fumos produzidos e produção de gases tóxicos. Estes últimos afetam a visibilidade e capacidade de pessoas que tentam evadir um edifício em chamas, e são considerados aspetos de segurança à vida [45].

O fumo produzido pelos compósitos FRP é influenciado pelos tipos da resina, de fibras e fluxo de calor, sendo que poliéster, viniléster e epóxi, comumente utilizados, podem gerar um fumo preto denso [14, 15]. Além disso, os gases gerados pela combustão de FRPs são tóxicos ao ser humano [15]. Um estudo de Bakhtiyari et al. [45] revelou que compósitos FRP de vidro e carbono demonstram ser altamente inflamáveis (Figura 15), emitindo altos valores de monóxido de carbono quando expostos ao fogo.

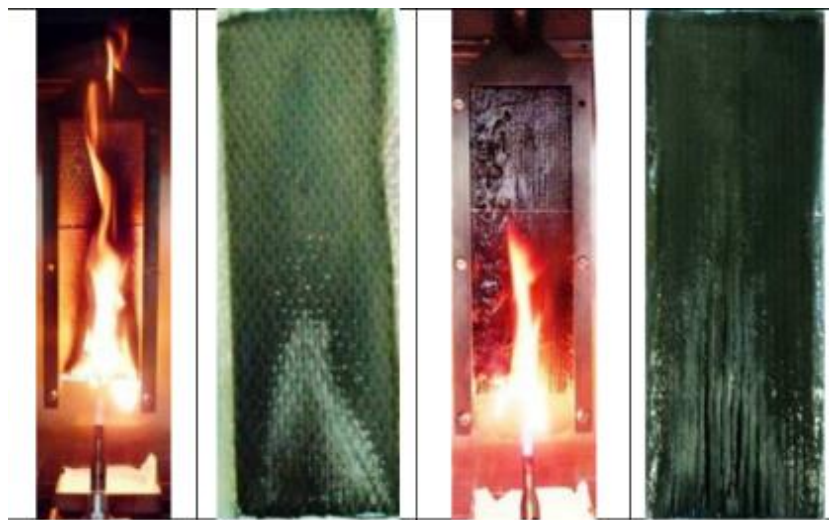


Figura 15 - Compósitos GFRP e CFRP em teste de ignição após 60 segundos, adaptado de [45].

Os compósitos de FRP podem ser divididos em duas categorias: compostos por fibras combustíveis (aramidas) e por fibras não combustíveis (vidro e carbono). Em compósitos de fibras combustíveis, elas contribuem para a geração de fumo e gases tóxicos, e a sua degradação ocorre após aproximadamente 500 °C [46, 47].

Dentre as propriedades de reação ao fogo dos materiais, a taxa de libertação de calor é considerada a mais importante, e pode ser mensurada a partir de um calorímetro de cone (Figura 16). Ela é obtida pelo produto entre a taxa de perda de massa de um material e o seu calor de combustão. Em compósitos de fibras não combustíveis, esta característica é relacionada linearmente com outros aspetos importantes, como densidade do fumo e libertação de monóxido e dióxido de carbono. No caso daqueles com fibras combustíveis, somente a libertação de monóxido de carbono é dependente deste parâmetro. O tempo de ignição não se mostrou ser relacionado a esta propriedade, pois depende de outros fatores [46, 47]. Dessa forma, se realizado um ensaio observando a libertação de calor de um compósito, podem ser feitas correlações com essas propriedades.

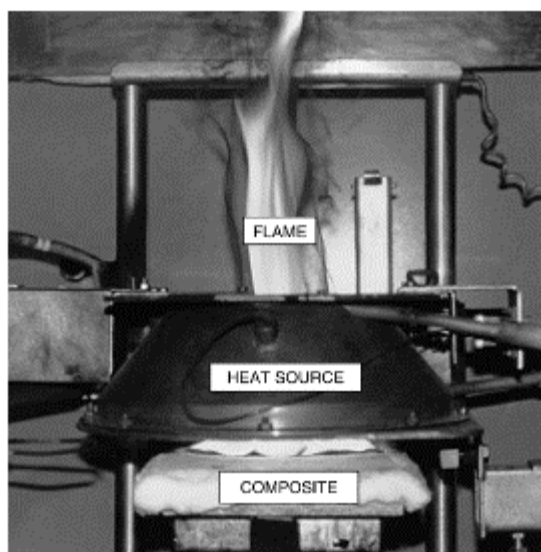


Figura 16 - Ensaio com calorímetro de cone, adaptado de [46].

4.2. TEMPERATURA DE DECOMPOSIÇÃO (Td)

Além da temperatura de transição vítrea (T_g), os compósitos FRP também apresentam uma gama de valores de temperatura em que ocorrem processos de degradação do material, chamada de temperatura de decomposição (T_d). Neste ponto, ocorre diminuição significativa da sua massa, tornando suas propriedades resistentes muito reduzidas. O processo de decomposição ocorre em dois meios distintos, primeiramente a partir a decomposição da matriz polimérica, e em sequência das fibras [7].

A temperatura T_d pode ser obtida através de ensaios DSC ou TGA (*Thermogravimetric Analysis*), a partir de gráficos de variação de massa por temperatura, sendo que o valor da T_d geralmente é definido a partir do correspondente à decomposição de sua matriz polimérica. Este processo é similar ao observado para a T_g , pois ocorre num intervalo de temperatura, e a definição mais utilizada é a do valor médio observado pela curva, indicado como “ $T_{d,m}$ ” na Figura 17 [7].

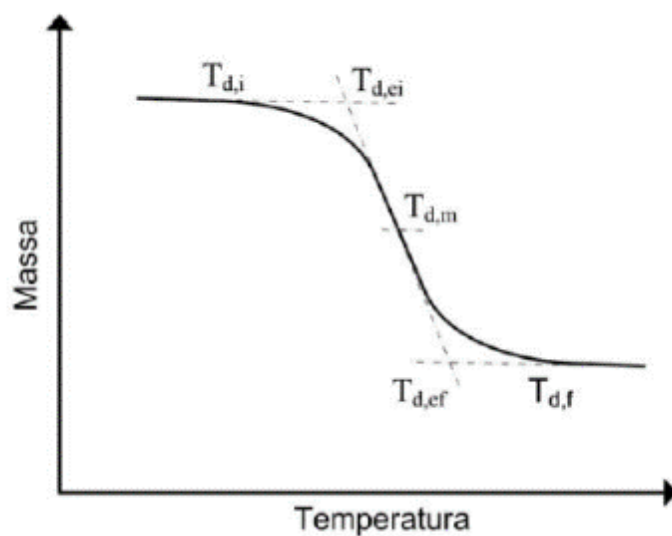


Figura 17 - Variação da massa por aumento de temperatura de FRP, adaptado de [7].

Em ensaios DSC e TGA realizados por Firmo [7], em laminados de CFRP, houve duas faixas de redução considerável de massa, a primeira entre 350 °C e 425 °C, e a seguinte entre 625 °C e 775 °C. A primeira relaciona-se à decomposição da matriz polimérica, e a segunda das fibras de carbono. Com base na definição da $T_{d,m}$, o valor da T_d do compósito foi de 380,3 °C. Ao realizar os ensaios num adesivo epóxi, a redução significativa da massa iniciou após 200 °C, obtendo um valor da T_d de 379,1 °C. Neste momento, a massa restante da resina era de cerca de 83%. O autor ainda realizou ensaios de exposição ao fogo deste compósito como reforço de vigas de betão armado, em fornos com curva de incêndio baseada na ISO 834 [48], em que a T_d foi atingida após 20 minutos.

4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para se estudar o comportamento de estruturas em situação de incêndio, são utilizadas curvas de incêndio padrão, e a mais utilizada é proposta pela ISO 834 [48]. Um incêndio é constituído de diversas fases, divididas em desenvolvimento, propagação, pleno desenvolvimento e extinção, como é mostrado na Figura 18. Durante a fase inicial, geralmente os valores de temperatura não são críticos para os elementos estruturais, como o betão armado [7]. Isso implicaria num tempo de serviço da estrutura durante o início do incêndio, possibilitando a evacuação de pessoas do interior. Porém, no caso de estruturas reforçadas com compósitos FRP, estas temperaturas já seriam capazes de reduzir drasticamente a resistência dos elementos estruturais, por ultrapassar a T_g dos compósitos.

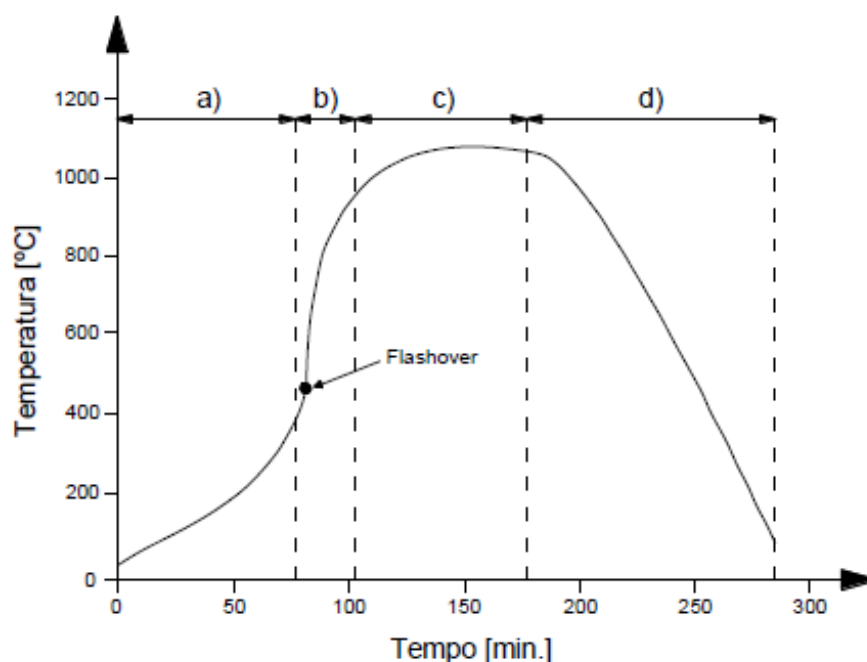


Figura 18 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real, adaptado de [7, 49].

Ao superar o valor da T_g , existe perda da ligação do compósito com o elemento reforçado, e assim pode-se admitir que ele não confere a resistência adicional prevista a estrutura. Como esta temperatura é atingida em questão de minutos, em situações de incêndio, vários códigos de dimensionamento recomendam considerar que os materiais de FRP serão perdidos. Desta forma, a resistência da estrutura original deve ser suficiente para resistir aos seus carregamentos com fator de carga, como é proposto, por exemplo, pelo código ACI 440.2R-02, de acordo com Bisby et al. [15, 50].

Duas categorias de ensaios são frequentemente realizadas para definir o comportamento mecânico de estruturas reforçadas com compósitos sob altas temperaturas: aquecer a amostra até certa temperatura e adicionar carga até a sua falha, ou carregar a amostra a uma fração da sua capacidade de carga em temperatura ambiente, e aquecê-la até a falha [44].

4.4. RESUMO DE ENSAIOS

Grilo et al. [51] efetuaram ensaios em provetes de betão reforçados com CFRP sujeitos ao corte com aumento de temperatura. Neles, foram avaliados os modos de roturas dos sistemas e as temperaturas em que ocorreram. As cargas aplicadas nos provetes corresponderam a 50% e 75% da força de rotura de ensaios a frio, realizados previamente. O reforço por CFRP foi feito a partir de mantas, com colagem a partir de resinas epóxi *Sika Sikadur 30*, que possuem T_g entre 50 °C e 60 °C, como mostrado previamente por ensaios de outros estudos [6, 23]. Percebeu-se que, para carregamentos de 50%, a rotura ocorreu entre 87,9 °C e 101,1 °C, devido à perda de aderência entre compósito e betão. No caso das cargas de 75%, as roturas sucederam entre 68,4 °C e 84,2 °C, por conta de rotura na lâmina do CFRP ou rotura do betão.

Silva et al. [52] realizaram ensaios que registaram a taxa de libertação de calor de provetes reforçados por compósitos FRP expostos à fluxos de calor provenientes de calorímetros de perda de massa. Estes

provetes, reforçados por laminados (L) e mantas (S), de CFRP, foram expostos à ação de dois fluxos de calor, de 35 kW/m² e 75 kW/m². As curvas de taxa de libertação de calor pela temperatura para cada caso são dispostas na Figura 19. Neste ensaio, verificou-se que para um fluxo de calor de 35 kW/m², a ignição da resina epóxi ocorreu após 4 minutos, sendo este tempo de 1 minuto para um fluxo de calor de 75 kW/m². Os comportamentos de mantas e laminados foram similares, e ocorreu a libertação de fumo até a extinção da chama, mostrada na Figura 20.

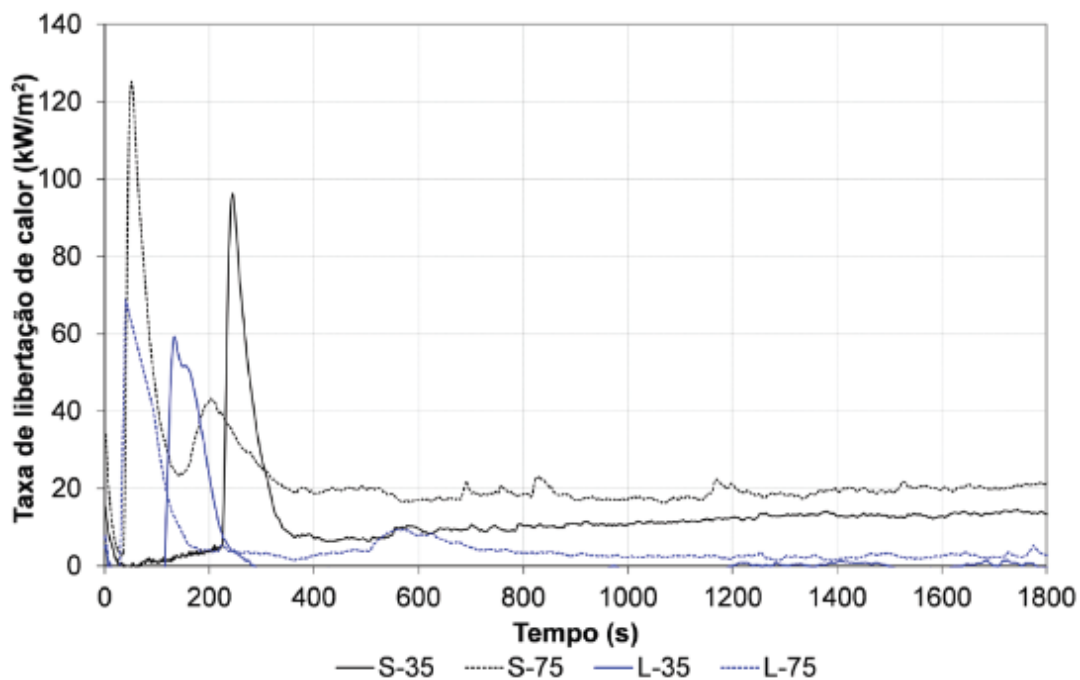


Figura 19 - Taxa de libertação de calor em provetes reforçados com CFRP, adaptado de [52]

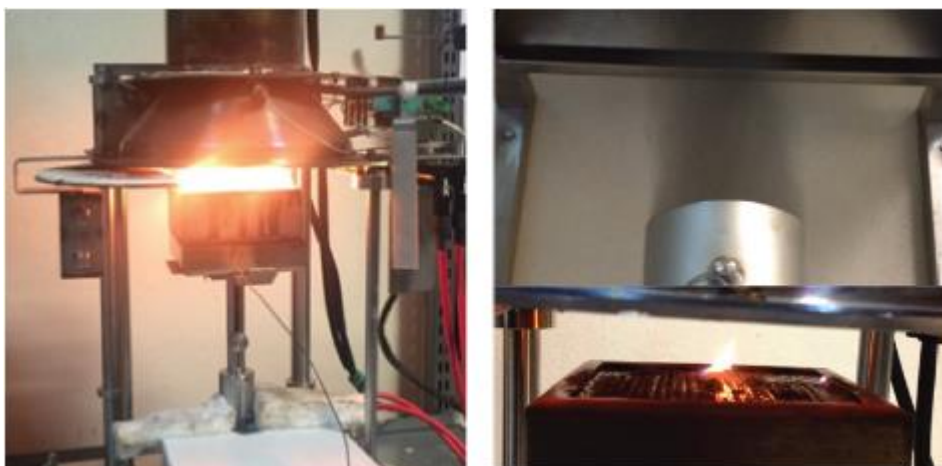


Figura 20 - Ignição da resina e produção de fumo de CFRP, adaptado de [52]

As curvas da taxa de libertação de calor dos compósitos apresentam comportamentos similares, são inicialmente baixas, até que a resina atinja o seu valor de temperatura de pirólise. Neste momento, a taxa sofre um acréscimo acentuado, até atingir um pico, que em seguida reduz gradativamente, até o fim do

processo de combustão. O tempo até que a resina entre em combustão é reduzido com o aumento do fluxo de calor, como era esperado [52].

Os ensaios com calorímetros de cone podem fornecer boas indicações do comportamento dos compósitos em situações de incêndio, como a libertação de fumos e gases tóxicos. Porém, devem ser realizados mais testes avaliando este e outros aspetos, como o tempo de ignição. Estas características são fundamentais para se avaliar a segurança da resposta dos compósitos em situações de incêndio, pois geram perigo à vida humana.

Estes ensaios, em escala reduzida, ajudam a compreender os aspetos que compreendem a situação de um incêndio real. Comparado a um teste em escala real, eles são menos custosos e mais fáceis de se realizar. A partir dos resultados, podem ser feitas correlações com os parâmetros utilizados, como, por exemplo, o fluxo de calor. Para esta característica do incêndio, foi observado que várias reações são linearmente dependentes dela, como densidade do fumo, libertação de monóxido e dióxido de carbono e taxa de perda de massa [47].

Por outro lado, os testes em escala real têm a vantagem de reproduzir fielmente o comportamento do material durante um incêndio, ainda que vários aspetos podem variem, nomeadamente a circulação de ar e radiação térmica no ambiente. Estes ensaios podem validar os modelos de resposta ao fogo que possuímos a partir de testes em escala reduzida, e ratificar as características a combustão dos materiais de FRP disponíveis comercialmente [47].

Em 2006, foram realizados testes em escala real de compósitos de FRP expostos ao fogo, num edifício de betão armado de 23 andares, conhecidos como Testes de Fogo de Dalmarnock (Figura 21). Dois compartimentos foram utilizados para os ensaios, com diferença apenas nos parâmetros de ventilação dos ambientes. No primeiro foram instalados seis laminados de CFRP no teto (teste 1), sendo metade colados pela técnica EBR e metade pela NSM. Para o segundo ambiente (teste 2), com ventilação controlada, uma placa de CFRP foi colada exteriormente, e foi instalada uma barra de CFRP pela técnica NSM [53].



Figura 21 - Testes de fogo de Dalmarnock, adaptado de [53].

Nestes testes, observou-se que a temperatura na interface do adesivo atingiu a sua Tg rapidamente, entre quatro e cinco minutos para técnica EBR e de cinco a seis minutos nas técnicas de NSM. As placas coladas externamente descolaram do teto em cerca de dez minutos, enquanto o reforço por NSM aparentou menor degradação física, mantendo-se na sua posição inicial após o teste [53].

Em 2022, Sharifianjazi et al. [54] recolheram informações observadas por diversos autores numa revisão sobre a performance estrutural de estruturas de betão reforçadas com FRP expostos às altas temperaturas. Nesta revisão, avaliaram as respostas dos sistemas de reforço sujeitos a diferentes condições de temperaturas e ao fogo. Em ensaios ao fogo, a Tg dos compósitos CFRP foi atingida num curto período de exposição, em todas as amostras.

Dentre os estudos avaliados que realizaram ensaios com exposições de até 100 °C, um deles observou uma grande degradação na capacidade de carga de vigas reforçadas com FRP acima de 65 °C, com redução do momento fletor de falha de 25%. Em ensaios de Pull-out, descobriu-se que o valor de ligação característico em altas temperaturas variou em função de temperatura de serviço subtraído da Tg. Também foi constatado que houve reduções nas tensões de cisalhamento máximas a 80 °C, comparadas a temperatura ambiente. Estas reduções foram de 25% em laminados de CFRP, 72% em mantas de GFRP e 54% em mantas de CFRP. Em temperaturas acima de 100 °C, foi observado um decréscimo da força de ligação entre compósito de CFRP e betão, sendo que num dos estudos, a força de ligação residual foi de 17% após uma hora de exposição a 150 °C. [54].

Foram também analisados elementos de betão armado envoltos por compósitos FRP, reforçados por mecanismos de confinamento. Um dos estudos verificou que, em temperaturas acima da Tg, houve um decréscimo da força axial de elementos reforçados com CFRP e GFRP, sendo mais acentuado acima de 200 °C. A eficiência do confinamento sofreu grandes reduções, entretanto não se extinguiu. Dos resultados analisados, foi constatado que a capacidade de carga de compressão de estruturas envoltas por sistemas FRP sob altas temperaturas depende de fatores como o tipo da fibra e número de camadas aplicadas. Os resultados observados para três camadas de CFRP apresentaram vantagem sobre aqueles em que foi aplicada uma camada, e FRPs com fibras de carbono apresentaram desempenhos superiores aos com fibras de vidro. A orientação das fibras também pode ser considerada um fator a ser estudado para verificação da performance dos sistemas de reforço por esta técnica [54].

Esta revisão [54] permitiu compreender diversos aspetos fundamentais do efeito do fogo em compósitos de FRP. Dentre os efeitos mais agravantes, a redução da capacidade de ligação é a primeira a ocorrer, condicionando o tempo útil do reforço. Os sistemas de FRP a partir de laminados apresentaram degradação mais lenta em comparação às mantas, assim como compósitos com fibras de carbono em relação aos com fibra de vidro. Quando são utilizados para reforço por mecanismo de confinamento, os elementos de FRP apresentam eficiência por mais tempo, suportando maiores temperaturas.

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os compósitos de FRP apresentam comportamento vulnerável ao aumento de temperatura, sendo motivo de preocupação em situações de incêndio. Inicialmente, ocorre perda de propriedades de resistência e rigidez, porém, acima de 200 °C, podem ocorrer processos de decomposição. A matriz polimérica é inflamável, e a sua combustão pode produzir gases e resíduos tóxicos, além de um fumo denso preto, prejudicando a capacidade de pessoas evadirem um edifício em chamas. Para compósitos de fibras não combustíveis, de carbono e vidro, estes aspetos são linearmente associados a taxa de libertação de calor. Em compósitos constituídos de fibras combustíveis, como aramida, elas contribuem para geração destes elementos, ao entrar em combustão em temperaturas acima de 500 °C.

A temperatura de decomposição (T_d) de um compósito de FRP pode ser analisada a partir de ensaios que mensuram a variação da massa de acordo com o aumento de temperatura. Dentre os componentes do compósito FRP, os primeiros a sofrer degradação são a resina ou adesivo epóxi, que sofrem perda de massa a partir de 200 °C. Ensaios demonstraram que a decomposição de fibras de carbono ocorre acima de 600 °C. De qualquer forma, os valores da T_d médios, tanto de um compósito de CFRP, quanto de um adesivo epóxi são similares, próximos a 380 °C. Isso ocorre porque a definição da T_d de um compósito de CFRP é realizada a partir da decomposição da sua matriz polimérica.

A avaliação do comportamento das propriedades mecânicas de um material compósito de FRP exposto ao fogo é geralmente realizada em ensaios em fornos, com temperaturas seguindo curvas de incêndio padrão, sendo as mais utilizadas referentes a ISO 834 e a ASTM E-119. Estes ensaios normalmente verificam como a temperatura afeta características como capacidade carga, força de ligação e modo de rotura de estruturas reforçadas com compósitos FRP.

Em situações de incêndio, a temperatura dos compósitos não protegidos atinge a sua T_g em questão de minutos. Este facto foi observado tanto em ensaios em escala reduzida, quanto em testes em escala real. Isso acarreta o descolamento do sistema de reforço colado externamente, entretanto, para técnicas de colagem NSM, este efeito ocorre em temperaturas mais altas, permitindo maior tempo de funcionamento do sistema. Essa vantagem também foi observada em reforço por confinamento, que apresentou redução de capacidade de carga para temperaturas superiores a T_g .

Dentre os compósitos de FRP mais utilizados, aqueles constituídos de fibra de carbono apresentaram melhor desempenho frente às temperaturas elevadas, em relação aos de fibra de vidro. Da mesma forma, os sistemas pré-fabricados suportaram maior temperatura, em comparação aos curados “in situ”, até que fossem observadas reduções nas suas capacidades mecânicas.

5

SISTEMAS DE PROTEÇÃO PARA COMPÓSITOS FRP

5.1. PRINCIPAIS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

5.1.1. SISTEMAS DE PROTEÇÃO PASSIVA

Os sistemas de proteção passiva são conjuntos de materiais que funcionam de maneira a isolar, termicamente, uma parte da estrutura, reduzindo a propagação do fogo e retardando, ou evitando, o colapso da estrutura. Devido ao desempenho dos compósitos FRP perante o fogo, diversos estudos foram realizados empregando diferentes sistemas de proteção passiva, a fim de observar suas respostas em situações de incêndio, para que possam ser utilizados em aplicações “in situ”.

Estes sistemas de proteção devem apresentar, entre outras características, pouco acréscimo de carga na estrutura e baixa condutividade térmica [52]. No caso dos FRPs, um dos objetivos é manter a temperatura abaixo da temperatura crítica pelo maior tempo possível, e no caso ultrapasse, prevenir o compósito de entrar em combustão, evitando a geração de gases e fumos tóxicos.

5.1.2. REVESTIMENTO INTUMESCENTE

Os revestimentos intumescentes são materiais reativos, formados por componentes que reagem quimicamente sob a ação de um incêndio. Esta reação causa uma expansão em volume, normalmente entre 40 a 50 vezes, formando uma camada protetora de espuma carbonizada de baixa condutividade térmica [55, 56]. Desta forma, esta espuma retarda o aumento da temperatura da superfície do material protegido, além de prevenir que o oxigênio atinja o material que pode entrar em combustão [57]. A Figura 22 ilustra três fases do aspecto de uma ligação de barras revestidas e exposta a uma chama.

Tipicamente, os componentes dos revestimentos intumescentes são o catalisador ou desidratante ácido, uma fonte de carbono e um agente expensor. Uma das reações químicas geradas no processo de intumescência é a decomposição do catalisador, que ocorre inicialmente e a cerca de 150 °C, sendo sucedida pelas demais reações, que ocorrem em temperaturas acima de 200 °C [56, 58, 59]. A temperatura em que as reações que geram o sistema de proteção se iniciam é denominada de temperatura de ativação, e usualmente varia entre 100 °C e 300 °C [60].



Figura 22 - Reação da tinta intumescente, adaptado de [59].

Estes revestimentos, normalmente aplicados em forma de tinta, são amplamente utilizados para proteção de estruturas metálicas, incrementando o tempo de rotura das mesmas de 30 a 120 minutos [60]. Recentemente, foram também realizados estudos sobre a eficácia da sua utilização para proteção de compósitos de FRP, tanto para evitar que os compósitos alcancem altas temperaturas, o que reduziria as suas propriedades mecânicas, quanto para evitar que eles possam entrar em combustão e decomposição [44, 57].

Usualmente, estes revestimentos são aplicados em espessuras de até 5 mm, sendo que estudos em que foram utilizados para proteção de compósitos FRP as espessuras variaram entre 0,1 mm e 2 mm [44, 61]. Algumas das suas vantagens são o menor peso adicional introduzido na estrutura, possibilidade de um melhor acabamento e demandar fácil manutenção durante sua fase de uso. Entretanto, este método necessita de uma mão de obra especializada, que possa garantir a aplicação de espessuras mínimas e uniformidade de aplicação [56].

Em relação ao custo, a aplicação do revestimento intumescente requer um investimento médio de 20 €/m², para induzir resistência ao fogo padrão de R60 – ISO 834, que requer espessuras entre 0,36 mm e 1,1 mm, dependendo do elemento estrutural protegido [62, 63].

5.1.3. PLACAS DE GESSO

O gesso é um dos mais antigos materiais utilizados em construções, apresentando algumas vantagens, como isolamento térmico, acústico e resistência ao fogo. Ele é produzido a partir da gipsita, composto de sulfato de cálcio hemi-hidratado, possuindo em estado seco 20% de água cristalizada, conhecido pela sua facilidade de absorver água. Durante uma situação de incêndio, o gesso absorve o calor de forma a vaporizar a água da sua constituição, criando um mecanismo de proteção térmica [60, 63, 64].

A sua comercialização pode ser feita através de placas a serem fixadas mecanicamente (Figura 23), que apresenta algumas vantagens, como o custo reduzido, boa disponibilidade e facilidade de produção. Outro modo de aplicação é a partir de espalhamento, que implica em acabamentos de piores qualidades e não é tão habitual. Entretanto, o gesso ainda é considerado um material frágil, que pode apresentar fissuras quando sujeito a situações de incêndio [63]. Desta forma, foram recentemente realizados vários estudos associando uso de aditivos para melhorar o seu desempenho e resistência ao fogo [14, 52, 63-68].



Figura 23 - Provetes protegidos com placa de gesso, adaptado de [52].

Dentre as placas de gesso disponíveis no mercado, a espessura encontrada por placa geralmente varia entre 10 mm a 15 mm, mas é possível encontrar placas com espessura de até 30 mm [52]. Nos estudos realizados utilizando placas de gesso como proteção térmica a compósitos FRP, a espessura empregada foi de até 30 mm [44, 69]. Em Portugal, é possível encontrar placas tipo F (classificação antifogo pela EN 520), utilizadas nestes estudos, com espessura de 13 mm, por valores de torno de 5 €/m² [70].

5.1.4. ARGAMASSA CIMENTÍCIA E DE GESSO

A argamassa à base de cimento Portland pode ser utilizada como isolante térmico para temperaturas inferiores a 400° C, e para temperaturas mais altas são adicionados aditivos que a permitem prolongar o seu período de serviço [63]. Para proteção de compósitos FRP, são empregadas argamassas por projeção via húmida, que podem ser mono componentes ou constituídas por agregados leves de perlita e vermiculita, que incorporam excelentes características de isolamento térmico [44, 51, 65], apresentadas na Figura 24. Tanto a argamassa cimentícia, quanto à base de gesso, em alguns casos com adição destes aditivos, tiveram suas propriedades de proteção térmica avaliadas a partir de ensaios, por estudos de diversos autores [15, 44, 61].



a) Vermiculita expandida



b) Perlita expandida

Figura 24 - Vermiculita expandida e perlita expandida [71, 72].

A vermiculita é um mineral proveniente de rochas vulcânicas, que ao ser submetida a temperaturas entre 700 °C e 1000 °C, aumenta o seu volume em até 30 vezes, resultando em vermiculita expandida (Figura 24), um material com baixa condutividade térmica e acústica [63-65]. Por conta da sua natureza altamente porosa, e consequente alta absorção de água, a vermiculita consegue resistir a maiores períodos de situação de incêndio, até que toda a sua humidade seja evaporada [63].

A perlita é uma rocha vulcânica que dá origem à perlita expandida, ao ser aquecida à temperatura de 760° C a 980° C, ampliando o seu volume em até 20 vezes. A perlita expandida, demonstrada na Figura 24, é um material de porosidade elevada, com um alto ponto de fusão, próximo de 1100° C, que lhe permite ser utilizada em altas temperaturas, com bom desempenho de isolamento térmico [63, 65]. Este material pode ser utilizado em associação a vermiculita expandida em argamassas de proteção ao fogo, que são normalmente aplicadas por projecção [14].

A fim de se gerar proteção para compósitos FRP, a espessura de argamassa utilizada varia entre 20 mm e 60 mm, sendo uma das proteções que a qual se possuem mais estudos e dados de ensaio observados [15, 44, 61, 73-75]. Em 2020, Figueiredo [63] realizou um estudo sobre o custo de diferentes argamassas em Portugal, sendo elas compostas por: argamassa comercial (A1), cimento Portland, vermiculita expandida e fibras de polipropileno (A2), gesso de alto rendimento e perlita expandida (A3), gesso de alto rendimento e vermiculita expandida (A4) e cimento refratário com vermiculita expandida e perlita expandida (A5). Os custos, em €/m², foram respetivamente: 9,42, 16,46, 12,62, 5,63 e 29,52.

5.1.5. PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO

As placas de silicato de cálcio (Figura 25) são materiais compostos de cristais hidratados de silicato de cálcio, sulfato de cálcio anidro e fibras de reforço. Estes cristais podem ser obtidos através da cal e do ácido silícico, através de um processo de cura de autoclave [76]. Estas placas apresentam excelente comportamento como isolante térmico, por conta da presença de torno de 5% de água na sua composição, assim como por sofrer diferentes reações endotérmicas que ocorrem em diversos intervalos de temperatura. Estas reações incluem a evaporação de água livre, desidratação do silicato de cálcio e do hidróxido de cálcio, e descarbonização do carbonato de cálcio, em temperaturas que variam entre 100 °C e 1000 °C [7, 60, 77].



Figura 25 - Placa de silicato de cálcio [78].

As placas de silicato de cálcio apresentam algumas semelhanças com as placas de gesso, como a sua aplicação, o seu comportamento e as suas características físicas. Entretanto, comparativamente, elas possuem melhor resistência mecânica e durabilidade que as placas de gesso, apresentando um custo mais elevado [7, 77].

Estas placas foram analisadas como sistema de proteção térmica para compósitos FRP em vários estudos. As espessuras usualmente variaram entre 25 mm e 100 mm [74, 75, 79, 80]. Em Portugal, é possível encontrar placas de silicato de cálcio com 25 mm de espessura por 52,18 €/m², um valor consideravelmente superior às placas de gesso [81].

5.1.6. LÃ DE ROCHA

A lâ de rocha é um material utilizado na construção por conta das suas propriedades isolantes térmicas e acústicas. Elas são produzidas a partir de rocha basáltica, outros minerais e até mesmo de escória metalúrgica [82]. Com a finalidade de proteção térmica, este material pode ser utilizado a partir de mantas ou placas (Figura 26), em que as suas fibras são dispostas de forma aleatória, com adição de resinas termoendurecíveis para a sua aglomeração [60]. Nesta disposição, os painéis são fixados de maneira mecânica.



Figura 26 - Placas de lâ de rocha [83].

A lâ de rocha foi utilizada em estudos para proteção térmica de compósitos FRP, e a espessura utilizada variou entre 30 mm e 50 mm [69, 84]. O custo comercial para aplicação de placa de lâ de rocha, em Portugal, é de 5,28 €/m², para uma espessura de 30 mm [83].

5.1.7. PAINÉIS DE BETÃO LEVE

O betão leve é um material utilizado há muito tempo pela engenharia, e, por existirem várias definições do mesmo, muitas vezes pode acarretar numa imprecisão quando referido. Normalmente, ele é conhecido por ser produzido com a utilização de agregados leves, porém na maioria das vezes é constituído por uma combinação de agregados graúdos leves e areia de peso normal [85, 86].

Para a sua produção, ainda podem ser adicionados outros materiais com boas propriedades térmicas, como a vermiculita e a perlita, mesmo estes ainda serem mais utilizados em argamassa [85]. Recentemente, foram introduzidas ao mercado placas de betão leve reforçadas com fibra de vidro, utilizadas para proteção térmica de betão armado exposto a altas temperaturas, denominadas *Aestuver T* (Figura 27). Esta placa foi utilizada num estudo para determinar a sua eficiência em proteção térmica de compósitos FRP, com uma espessura entre 30 e 40 mm [44, 79]. Comercialmente, este produto pode ser encontrado na Alemanha por um valor de 132,07 €/m², em espessura de 30 mm, valor muito acima dos outros materiais [87].



Figura 27 - Placa de betão leve *Aestuver T* [87].

5.1.8. PINTURA EXTERNA

Diferentemente dos outros sistemas de proteção para compósitos FRP, a pintura externa com tintas convencionais não é utilizada com intuito de proteção a temperaturas muito elevadas, sobretudo ao fogo. Porém, a temperatura superficial de uma estrutura exposta a radiações solares depende diretamente da absorção destas radiações. Como apresentado no Capítulo 3, pela Equação 1, o acréscimo da temperatura na superfície de um elemento, em relação à temperatura ambiente, é diretamente proporcional à sua taxa de absorção da radiação solar global (α_s). Este parâmetro depende da cor da superfície do material, sendo mais baixo para cores claras, e mais altos para cores escuras. A Tabela 10 indica valores de absorção solar observados por alguns autores, e recomendados por normas [42]. Estes valores se aproximam dos recomendados por Sousa et al. [39], apresentados na Figura 13, no Capítulo 3.

Tabela 10 - Valores de absorção solar (α_s) por diferentes autores, adaptado de [42, 88].

Cores	Absortância Solar (α)						
	Rivero (1986)	Szokolay (1987)	Mascaró (1991)	Frota e Schifter (1995)	Lamberts, Dutra e Pereira (1997)	ASHRAE (2001)	ABNT (2005)
Escuras	0,85-0,98	---	0,70-0,85	---	0,70-0,90	0,65-0,80	---
Médias	0,65-0,80	---	0,50-0,70	---	0,50-0,70	---	---
Claras	0,25-0,50	---	0,30-0,50	---	0,20-0,50	---	---
Preta	---	0,96	0,92-0,96	0,90-1,00	---	0,85-0,98	0,97
Vermelha	---	---	0,65-0,90	0,30-0,70	---	0,65-0,80	0,74
Amarela	---	---	0,30-0,70	0,30-0,50	---	0,50-0,70	0,30
Branca	---	0,30	0,05-0,15	0,20-0,30	---	0,23-0,49	0,20

A absorção da radiação solar reflete nos valores de temperatura superficial de maneira significativa, sendo que para uma mesma condição de exposição solar e temperatura ambiente, a temperatura superficial máxima de uma amostra com coloração preta ($\alpha_s = 0,9$) foi de 62 °C, e 36 °C para coloração branca ($\alpha_s = 0,17$) [42]. Entretanto, estes valores correspondem a tintas acrílicas convencionais, e podem ser ainda menores se utilizadas tintas acrílicas de cores frias, composta por pigmentos que refletem radiação infravermelha, denominados de “cool pigments”. No trabalho de Carneiro [42], foram avaliados os valores de absorção solar e temperatura superficial de elementos comparando a utilização de tintas convencionais e tintas com “cool pigments”. Foi observado que, para mesma coloração, houve redução da absorção solar, sendo que a tinta preta com esta tecnologia apresentou valores de absorção menores que tintas convencionais de cores mais claras, como castanho e wengué. Em termos de temperatura superficial, a tinta preta com “cool pigments” apresentou valores próximos de 10 °C a menos que tintas convencionais.

De outro modo, alguns tipos de pinturas podem reduzir as alterações geradas na matriz polimérica dos compósitos FRP expostos à radiação ultravioleta. Geralmente estas alterações são geradas somente na camada superficial do compósito, mas em associação a presença de umidade e variação de temperatura, podem resultar em alterações nas suas propriedades mecânicas. Outro efeito que estes raios podem gerar

é de alteração na coloração superficial do compósito [4]. Para esta categoria de proteção, face aos efeitos UV, são utilizadas tintas à base de epóxi poliuretano.

Além disso, a aplicação de pintura externa pode conferir uma menor absorção de humidade pelos compósitos, facto que deve ser investigado através de ensaios. Entretanto, o NCHRP Report 514 [89] sugere que a proteção não deve totalmente impermeável ao vapor de água, para prevenir que existam possíveis danos causados pela pressão [4].

5.2. CASO DE PROTEÇÃO À EXPOSIÇÃO AMBIENTAL

5.2.1. CASO DE ESTUDO EM PORTUGAL

Para determinar a eficiência dos sistemas de proteção dos compósitos de FRP, são realizados ensaios com exposição a altas temperaturas e ao fogo. Entretanto, como exposto anteriormente, os resultados destes ensaios são fidedignos apenas a situações similares às que foi realizado. Em situações reais, outros aspetos podem interferir na eficiência dos sistemas de proteção, por isso é necessário validá-los a partir de casos reais.

Desta forma, através de análise de um caso de implementação de um sistema de proteção de um reforço com sistemas de FRP, no Porto, Portugal, e informações a respeito do seu estado e desempenho após 20 anos de serviço, pretende-se observar o efeito deste sistema a longo prazo. Para isto, são descritos sucintamente o tipo de reparação e sistema de proteção utilizados, e partir de inspeção visual, é analisada a sua condição atual.

Conforme o documento de Costa et al. [90], as esculturas decorativas localizadas nas duas fachadas de um edifício de gaveto na baixa do Porto, Figura 28-A, apresentavam estado de degradação preocupante, com base na sua inspeção, da qual resultou na recomendação de um conjunto de medidas de reabilitação. Este edifício, construído na década de 20, do séc. XX, talvez o primeiro a ser construído integralmente em betão armado na cidade do Porto, é de autoria do arquiteto Marques da Silva, ilustre arquiteto desta cidade. Os elementos escultóricos, uma figura masculina e uma feminina, exibidos pelas Figura 28-B e 28-C, saem para fora do plano das fachadas cerca de 0,80 m, desenvolvendo-se ao longo de cerca de 4,0 m no topo da fachada, possuindo grande dimensão. Durante a inspeção detetou-se que estas esculturas são ocas, moldadas em argamassa e alinhadas à volta de elementos metálicos nos elementos mais esbeltos (pernas e braços) e possuem material cerâmico incorporado. A espessura da argamassa nas pernas é de cerca de 2 cm a 3 cm, e a do tronco de cerca de 16 cm.

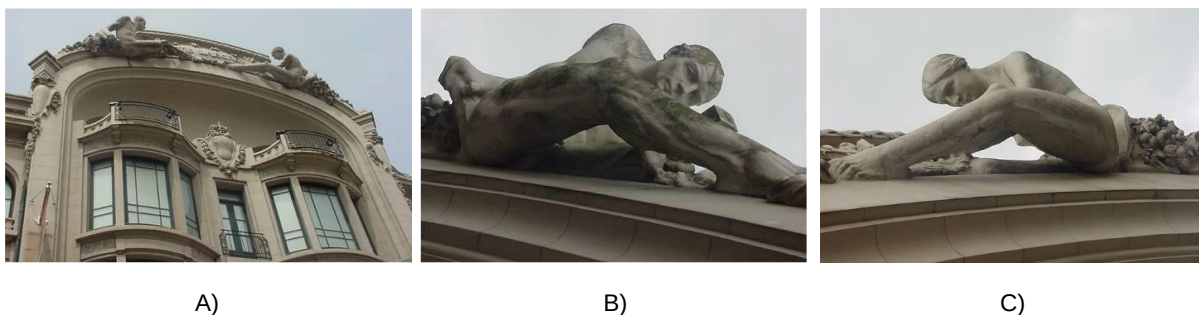


Figura 28 - Elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium, adaptado de [90]

5.2.2. REABILITAÇÃO E REFORÇO

Em 2003, elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium no Porto, com alçados para a Rua de Santa Catarina e Rua Passos Manuel, foram objeto de uma intervenção de reabilitação e reforço segundo os relatos de Juvandes [3] e Costa et al. [90]. Por conta do avançado estado de deterioração, tanto da argamassa que constitui os corpos das estátuas, quanto das armaduras principais de fixação das mesmas às alvenarias exteriores do edifício (Figura 29-A), foi necessário estudar uma solução de reabilitação global dos corpos das estátuas, uma proposta de estabilização estrutural dos elementos principais mais deteriorados, e da fixação destes às fachadas do edifício.

As diversas etapas de reparação preconizadas em projeto pelo grupo de Materiais de Construção da FEUP e pelo Núcleo de Reabilitação do IC-FEUP foram as seguintes:

1. Limpeza adequada das superfícies, suspendendo, se necessário, partes das esculturas
2. Estabilização da fendilhação, com a injeção de uma resina de poliuretano, e tratamento da armadura interna que suspende as estátuas;
3. Restabelecimento do esqueleto exterior do corpo da perna, por aplicação de cintas exteriores com 5 cm de largura, constituídas por duas camadas de tecido de CFRP (Figura 29-B);
4. Reforço da fixação da perna à fachada do edifício (zona do pé), através da colagem de uma faixa constituída por três camadas de manta unidirecional de CFRP, aplicada junto ao pé e encastrada na fachada por selagem da manta num rasgo executado na alvenaria (Figura 29-B);
5. Procedimento idêntico ao nível do tronco das estátuas (Figura 29-B);
6. Restabelecimento global das pernas das estátuas por confinamento contínuo com uma camada de tecido de GFRP (Figura 29-C);
7. Por fim, aplicação de um acabamento de proteção dos materiais compósitos de GFRP e CFRP aos agentes UV, reajustes das formas exteriores e escultura, e pintura final (Figura 29-D);

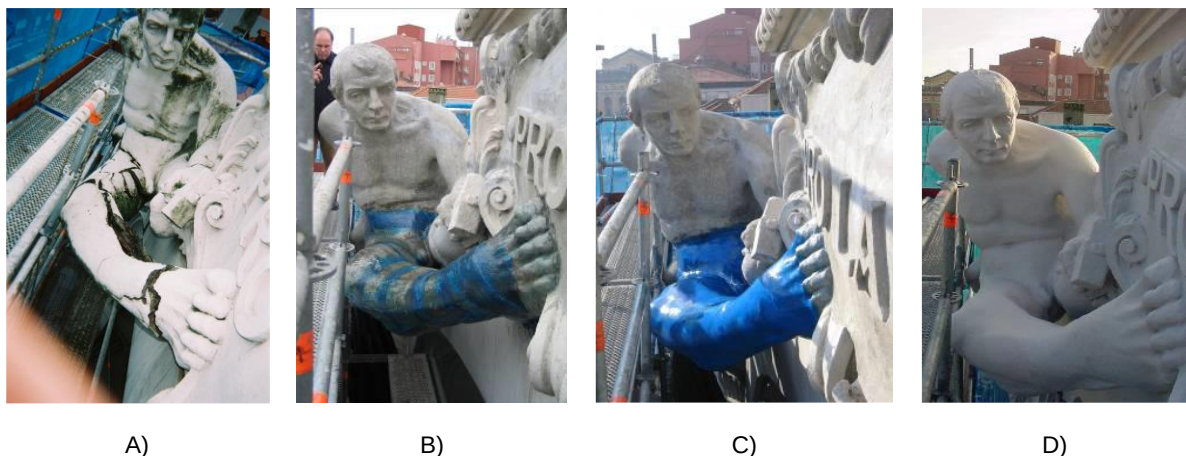


Figura 29 - Etapas de reparação dos elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium, adaptado de [3]

O critério de definição do sistema de proteção utilizado, referido no ponto 7, se deu em função da envolvente higrotérmica expectável nos elementos reforçados. Para isso, foi considerada a localização dos elementos escultóricos, situados no Porto, em ambiente urbano, nas fachadas orientadas a norte (Rua Passos Manuel) e a nascente (Rua Santa Catarina), expectando que a temperatura não ultrapassasse 40 °C, com humidade relativa de até 100% e exposição aos raios ultravioletas. Em razão de não se esperar que a temperatura superficial das esculturas excedesse 40 °C, valor abaixo da Tg da resina

(próximo a 60 °C), foi decidido aplicar um sistema de proteção do tipo tinta acrílica à base de epóxi poliuretano, da série MasterSeal 675 [91].

5.2.3. OBSERVAÇÃO APÓS 19 ANOS (2022)

Em junho de 2022, decorridos 19 anos após a reparação, foi realizada uma inspeção visual dos elementos escultóricos decorativos do Edifício Palladium. Nesta etapa, face à localização das esculturas nas fachadas, a inspeção visual constitui-se de uma sessão de fotografia a partir de um drone DJI AIR 2S [92], e uma máquina fotográfica Canon PowerShot G16 [93], para pormenores localizados.

O objetivo desta inspeção foi de recolher informações sobre os seguintes aspetos:

1. Identificação de patologias dos materiais, nomeadamente do estado atual do sistema de proteção.
2. Inspeção da estabilidade estrutural face ao critério de reforço implementado.

Como se trata de uma fase de diagnóstico, por observação visual, não foram recolhidas amostras para fundamentar as conclusões, que se identificam a seguir, a respeito dos aspetos de inspeção.

Em termos visuais, e recorrendo ao glossário das deteriorações da ICOMOS, nomeada “*Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns - Monuments and Sites*” [94], foram observadas as seguintes patologias:

- Líquenes (sendo os mais evidentes de cor laranja) como são observados nas Figura 30-A, 30-B, 31-A e 31-B. Eles são organismos vegetais, de dimensões na casa dos centímetros ou milímetros, comumente redondos, nas cores cinzentas, amarelas, laranjas, verdes ou negros. Os líquenes são encontrados geralmente nas zonas externas dos edifícios, muito frequentes em pedras exteriores, e se desenvolvem melhor com ar puro, porém algumas categorias crescem com mais facilidade em exposição a agentes poluentes, derivados da poluição urbana e agricultura;
- Algas (manchas verdes e escorrimentos) como se observam nas Figura 30-A, 30-B, 30-C, 31-A e 31-B. Estas são organismos vegetais de escala microscópica, sem presença de caules ou folhas, mais encontradas no exterior, similar a depósitos pulverulentos. Nestas, são formados véus verdes, vermelhos, castanhos ou negros, e elas são encontradas principalmente em zonas que permanecem humedecidas por longos períodos. Em situações secas, elas podem ser confundidas por crostas negras, entretanto, ao contrário destas, as algas são localizadas em áreas com exposição direta a chuva ou a escorrências.
- Fungos e Sujidade, presentes em praticamente todas as Figura 30 e 31, especialmente nas Figura 30-D, 31-D, 31-E e 31-F. A sujidade pode originar-se a partir de poluentes atmosféricos, por partículas transportadas por escorrência de água ou convecção, gerada por aquecimentos. Esta categoria peculiar de sujidade é característica de superfícies pétreas tratadas com hidrófugos. As marcas de escorrências limitam-se a faixas estreitas, onde as algas se desenvolvem preferencialmente;
- Em regiões em que a água da chuva incidiu ou escorreu, a argamassa está branca devido a alguma dissolução do carbonato de cálcio resultante da carbonatação da argamassa (dióxido de carbono do ar reage com o hidróxido de cálcio da argamassa e forma carbonato de cálcio). Este efeito é observado nas Figura 30-B, 30-C, 31-B e 31-C.

Pela aparente incidência superficial das patologias referidas, segundo a literatura relativa à reparação de patologia dos materiais, por Begonha [95], as esculturas podem ser tratadas, por exemplo, por uma lavagem prévia e posterior aplicação de um “biocida” ou uma tinta com resistência à formação de fungos.

Em relação à estabilidade estrutural, a inspeção visual permitiu detetar não existirem, ao menos visíveis, fendas estruturais, laminações do revestimento que comprometam o reforço com GFRP e CFRP, exposição dos compósitos ao ambiente, ou outro tipo de patologia de estabilidade dos elementos esculturais, ilustradas pelas Figura 30 e 31.

A partir destas observações, conclui-se que as esculturas estão estruturalmente estáveis, o sistema de proteção aplicado foi adequado, embora se sugira o tratamento das patologias referidas por aplicação de um biocida e, após o seu período de cura, a aplicação de um produto hidrófugo.



A)



B)



C)



D)

Figura 30 - Fachada de Santa Catarina (nascente), após 19 anos.



A)



B)



C)



D)



E)



F)

Figura 31 - Fachada de Passos Manuel (norte), após 19 anos.

5.3. ENSAIOS AO FOGO

5.3.1. PARÂMETROS OBSERVADOS

De modo a comparar a eficiência dos sistemas de proteção térmica aos compósitos FRP, foram reunidos valores obtidos por trabalhos em que eles foram expostos a curvas de incêndio padrão, ISO 834 [96] ou ASTM E-119 [97] e fogo de cálculo [61]. Na maioria dos casos, estes ensaios ocorrem com reforço de estruturas de betão armado, sendo este o caso de todos os testes aqui avaliados. O critério de classificação da eficiência dos sistemas foi o tempo necessário para que o adesivo ou resina dos compósitos atingisse

a Tg (TTg), avaliada por ensaios ou indicada pelo fornecedor, além do tempo até que ocorresse a falha do sistema FRP (TFalha).

5.3.2. REVESTIMENTO INTUMESCENTE

Alguns autores testaram a eficácia dos revestimentos intumescentes, em associação a outros sistemas de proteção térmica, para os compósitos FRP, o que dificulta perceber qual a contribuição de cada sistema no resultado. Em outros estudos, como de Stratford et al. [53], com fogo real, e Jiangtao et al. [98], com curva de incêndio ISO 834 [96], observou-se que a pintura intumescente se mostrou ineficaz em manter a temperatura no compósito abaixo da Tg, pois a sua temperatura de ativação era mais alta que a Tg dos compósitos. Comparativamente aos casos de elementos reforçados com FRP sem proteção térmica, o tempo de descolamento da interface betão-FRP foi similar, sendo as Tgs dos compósitos atingidas em menos de 6 minutos em ambos os casos.

O revestimento intumescente só seria eficaz para garantir que a temperatura do compósito não atinja valores em que ocorrem os efeitos da decomposição. No estudo de Jiangtao et al. [98], uma camada de 2 mm de tinta intumescente permitiu que a temperatura do adesivo se mantivesse inferior a 350 °C por mais de 80 minutos, comparada a menos de 60 minutos para uma viga reforçada com FRP sem proteção térmica.

5.3.3. ARGAMASSA CIMENTÍCIA

A utilização de argamassa cimentícia (AC), e argamassa com presença de vermiculita na sua composição (AV), teve o seu desempenho avaliado a partir de ensaios a curvas de incêndio padrão, com espessuras que variaram entre 10 mm e 60 mm. Nestes estudos, foi verificado que a eficiência deste sistema de proteção aumenta de acordo com a sua espessura, embora Firmo et al. [74] tenham observado um mesmo tempo para que fosse atingida a Tg na resina (TTg) para duas diferentes espessuras, com o tempo de falha do sistema (TFalha) superior para a proteção mais espessa. O TFalha em todos os ensaios apresentou valores acima de 72 minutos, ainda que este parâmetro seja dependente de outras variáveis, como a carga aplicada no elemento reforçado. As duas técnicas de reforço apresentaram valores do TTg similares para mesmo tamanho de espessura, porém para a NSM, o TFalha foi consideravelmente mais alto, mesmo em espessuras menores. O resumo destas informações é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Ensaios com Argamassa Cimentícia com e sem Vermiculita

Tg (°C)	Técnica	Proteção	Espessura (mm)	TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Estudo
50 - 60	EBR	AC	40	Aprox. 30	> 240	ASTM E 119	[73]
50 - 60	EBR	AC	60	Aprox. 30	> 240	ASTM E 119	[73]
50	NSM	AC	10	Aprox. 5	101	ISO 834	[98]
50	NSM	AC	25	Aprox. 20	> 180	ISO 834	[98]
50	EBR	AC	25	Aprox. 15	72	ISO 834	[98]
54	EBR	AV	25	24	89	ISO 834	[74]
54	EBR	AV	40	24	167	ISO 834	[74]

5.3.4. SISTEMAS COM GESSO E LÃ DE ROCHA

Os sistemas de proteção térmica utilizando placas de gesso (PG), argamassa de gesso com vermiculita (GV), em alguns casos com associação a lã de rocha (LR) e revestimento intumescente (RI), demonstraram boa eficiência em manter a temperatura abaixo da Tg na interface compósito-betão. O tempo TTg dos estudos observados variou entre 16 e 57 minutos, dependendo da espessura da proteção, Tg do compósito, sistema utilizado e a sua disposição. Comparativamente, para espessuras similares, as placas de gesso obtiveram maior tempo TTg do que as argamassas de gesso com vermiculita. A associação de lã de rocha às placas de gesso apresentou resposta inconclusiva em tempos de TTg ou TFalha, e no estudo de Blontrock et al. [69], a alteração da disposição da proteção gerou tempos de TTg diferentes. Nos trabalhos, o tempo de falha de alguns sistemas de reforço superou 240 minutos, mostrando ser possível atingir tempo de serviço satisfatório com estes sistemas de proteção, em situações de incêndio. As principais informações dos estudos analisados são demonstradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Ensaios com Sistemas de Proteção com Gesso

Tg (°C)	Técnica	Proteção	Espessura (mm)	TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Estudo
82	EBR	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	Fogo de cálculo	[61]
82	EBR	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	ASTM E 119	[61]
67	EBR	PG	18	24	40 - 70	ISO 834	[69]
67	EBR	PG	18	34	40 - 70	ISO 834	[69]
67	EBR	PG e LR	18 e 30	34	40 - 70	ISO 834	[69]
67	EBR	PG e LR	18 e 30	38	40 - 70	ISO 834	[69]
67	EBR	PG e LR	25 e 30	55	80	ISO 834	[69]

5.3.5. PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO

Dentre os sistemas de proteção térmica analisados, aqueles que utilizam placas de silicato de cálcio puderam ter a sua eficiência investigada com mais detalhes. Isto por conta de existirem mais estudos com ensaios em condições similares, alterando poucas variáveis e verificando a sua influência nos valores do TTg e do TFalha. Dentre eles, os estudos de Firmo et al. [74, 99], Firmo e Correia [100] e Palmieri et al. [79, 80], com os principais dados apresentados na Tabela 13, demonstraram que parâmetros como espessura da proteção, técnica de reforço, e aumento da espessura em zonas de ancoragem (ZA) influenciam diretamente nos tempos de TTg e TFalha.

O conceito por trás da utilização de espessuras maiores em zonas de ancoragem é de que mesmo que o compósito atinja valores superiores a Tg na zona central (ZC), perdendo aderência ao substrato de betão, as fibras possam funcionar como “cabos” fixados nas extremidades. Os ensaios demonstraram que este aumento de espessura na ZA é eficiente, ampliando valores de TFalha. Outras estratégias, como utilização de adesivos com a Tg mais alta nas ZA, ou utilização de chapas de ancoragem (CA), apresentaram algum incremento em tempos de TFalha.

Tabela 13 - Resumo de Ensaios com Placas de Silicato de Cálcio

Tg (°C)	Técnica	Proteção	Espessura (mm)	TTg (min)	TFalha (min)	Teste	Estudo
54	EBR	-	-	1	23	ISO 834	[74]
54	EBR	SC	25	17	60	ISO 834	[74]
54	EBR	SC	40	38	137	ISO 834	[74]
47	EBR	-	-	-	2 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC	25 ZA - 0 ZC	-	15 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC	25 ZA - 25 ZC	-	18 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC	50 ZA - 25 ZC	-	40 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC	75 ZA - 25 ZC	-	62 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC	75 ZA - 50 ZC	-	70 ¹	ISO 834	[99]
85	EBR	SC	50 ZA - 25 ZC	-	65 ¹	ISO 834	[99]
85 (ZA) 47 (ZC)	EBR	SC	50 ZA - 25 ZC	-	45 ¹	ISO 834	[99]
47	EBR	SC e CA (ZA)	50 ZA - 25 ZC	-	47 ¹	ISO 834	[99]
47	NSM	-	-	-	18 ¹	ISO 834	[100]
47	NSM	SC	25 ZA - 0 ZC	-	34 ¹	ISO 834	[100]
47	NSM	SC	25 ZA - 25 ZC	-	90 ¹	ISO 834	[100]
47	NSM	SC	50 ZA - 25 ZC	-	114 ¹	ISO 834	[100]
62	NSM	SC	40	25	-	ISO 834	[79]
62	NSM	SC	100	60	-	ISO 834	[79]
62	NSM	SC	50 ²	39	-	ISO 834	[80]
65	NSM	SC	60 ²	38	-	ISO 834	[80]

¹ Tempo até houvesse perda da ligação compósito-betão; ² Presença de espessura adicional nas laterais do compósito

No estudo de Firmo e Correia [100], com técnica de colagem NSM, foi observado que as temperaturas nas zonas de ancoragem do compósito, no momento do descolamento, foram substancialmente mais elevadas que a sua Tg. Esta temperatura resultou na falha do sistema estrutural, pois o carregamento aplicado nos elementos correspondia a mais de 100% do carregamento resistido pelo elemento sem reforço. Em comparação, no estudo de Firmo et al. [99], com condições similares, as vigas reforçadas com a técnica EBR sofreram descolamento em temperaturas pouco acima do seu valor da Tg, também resultando em falha do sistema estrutural. A Figura 32 apresenta esta diferença de temperaturas no momento de descolamento do compósito para as duas técnicas de colagem.

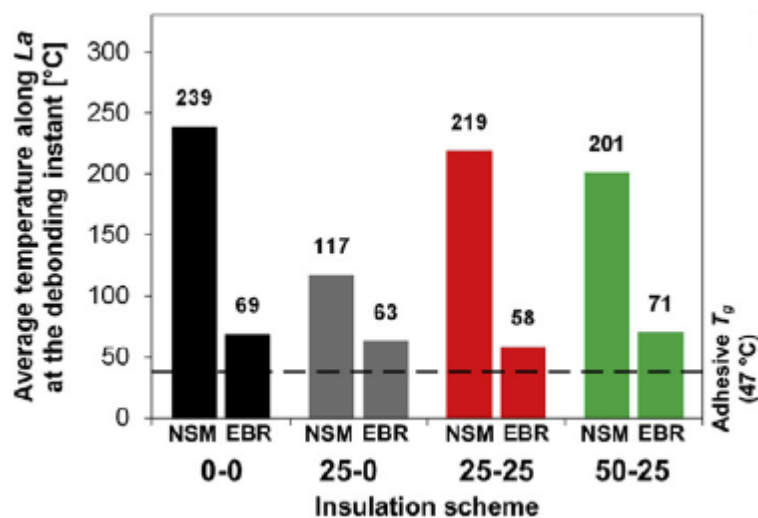


Figura 32 - Temperatura nas zonas de ancoragem (ZA) no instante da descolagem, para EBR e NSM, adaptado de [100].

Os resultados destes estudos permitiram concluir que técnica de colagem NSM se mostrou ser mais eficiente que a EBR para situações similares de ensaio, e mesmo sem proteção térmica, o tempo para descolagem do sistema de reforço FRP atingiu 18 minutos, sendo que o máximo observado para EBR, nesta condição, foi de 2 minutos. Dentre todos os ensaios, o maior tempo observado para descolamento do sistema FRP foi de 114 minutos, e para falha do sistema 137 minutos.

5.3.6. PLACAS DE BETÃO LEVE

Em 2012, Palmieri et al. [79], utilizaram placas de betão leve com nome comercial de “Aestuver T”, e em ensaios com situações similares aos que utilizaram placas de silicato de cálcio, observaram que, para espessuras de 30 mm a 40 mm, o valor do TTg foi no máximo de 21 minutos, inferior ao tempo para espessuras de 40 mm de SC no mesmo estudo. Apesar de apresentar certa proteção, o seu alto custo inviabiliza a utilização deste sistema para esta finalidade.

5.3.7. RESUMO DE ENSAIOS

Com exceção dos revestimentos intumescentes, os demais sistemas de proteção térmica apresentaram bom desempenho em ensaios ao fogo, que, como esperado, depende da espessura da proteção utilizada. Observou-se que a técnica NSM apresenta maiores valores de tempo de serviço dos sistemas de reforço com FRP, e técnicas como aumento da espessura da proteção nas zonas de ancoragem podem retardar a falha do sistema.

Firmino e Correia [100], ao comparar as técnicas de colagem para condições similares, concluíram que devem ser adotados dois critérios diferentes de temperatura crítica em que são perdidos os efeitos de colagem do compósito. Para garantir a ligação dos compósitos FRP colados externamente ao substrato de betão, as temperaturas nas zonas de ancoragem devem ser inferiores à T_g , o que mostra ser um valor adequado e não muito conservativo. Entretanto, para técnicas de colagem NSM, o valor limite de temperatura nestas zonas pode ser superior, propondo-se um valor de “2 x T_g ”. Esta condição foi

reafirmada por Jiangtao et al. [98], que observou que para a técnica NSM manteve-se o desempenho do sistema de reforço mesmo em temperaturas mais altas que a Tg do adesivo.

Apesar de prover bons indicativos sobre a eficiência de um sistema de proteção, o tempo de falha do sistema é diretamente afetado por diversos fatores, como carga aplicada na estrutura, Tg da resina ou adesivo e tipo de ensaio, e só devem ser comparados em ensaios com estes parâmetros fixados.

Para Tgs que variam entre 50 °C e 60 °C, as argamassas cimentícias (AC), e com adição de vermiculita (AV), apresentaram proteções que duraram entre 5 minutos, para espessura de 10 mm de AC e até cerca de 30 minutos, para 60 mm de AC, até que fosse atingida a Tg em ensaios ao fogo a partir de curvas padrão. O tempo até a falha da estrutura superou 240 minutos para a maior espessura, porém não é possível admitir que neste período o reforço mantinha suas propriedades mecânicas iniciais.

Para Tgs mais elevadas, entre 67 °C e 93 °C, os sistemas de reforço de argamassa de gesso com vermiculita (GV) mantiveram a temperatura abaixo da Tg de 16 a 57 minutos, para espessuras que variaram entre 25 mm e 38 mm. A utilização de placas de gesso (PG), com e sem associação a lâ de rocha (LR), induziram a um tempo de descolamento do compósito da estrutura de 24 a 55 minutos, para espessuras entre 18 mm e 25 mm. A utilização de lâ de rocha não apresentou um acréscimo de tempo em situações similares. Todos os ensaios observados com utilização de sistemas de reforço à base de gesso foram realizados em compósitos colados pela técnica EBR.

As placas de silicato de cálcio (SC) representam o sistema de proteção com mais estudos analisados, possuindo mais resultados de ensaios com boa parte dos parâmetros fixados. Para colagens a partir da técnica EBR, uma espessura de SC na zona central (ZC) do reforço, de 50 mm, associados a uma espessura de 75 mm de SC nas zonas de ancoragem (ZA), apresentou um tempo de ligação entre compósito e betão de até 70 minutos, com uma Tg de 47 °C. É importante salientar que, ao aumentar a espessura nas ZA, é observado um acréscimo de tempo de serviço em comparação ao mesmo aumento nas ZC, pelo efeito de “cabo”, discutido anteriormente. Em técnicas de colagem NSM, observou-se que, para Tgs variando entre 62 °C e 65 °C, espessuras de SC de 40 mm permitiram manter a temperatura no compósito inferior a Tg por pelo menos 25 minutos, sendo que este tempo atingiu cerca de 60 minutos para espessuras de 100 mm. O tempo de descolamento do sistema de reforço da estrutura foi superior aos colados pela técnica EBR, atingindo 114 minutos para uma proteção de 50 mm de SC nas ZA e 25 mm na ZC.

Por fim, as placas de betão leve (PBL) geraram uma proteção que manteve a temperatura no compósito abaixo de 62 °C por cerca de 21 minutos, em espessuras de 30 mm a 40 mm.

Em relação à eficiência das proteções frente às temperaturas extremas, que podem causar degradação e combustão das resinas e matrizes dos compósitos, principalmente, foram reunidos valores de temperatura e tempo de ensaio dos estudos mencionados acima. Neles, os autores apresentaram os valores correspondentes a temperatura no compósito, interface betão-compósito ou interface sistema de proteção e compósito, para um determinado período de ensaio, através de valores precisos ou apresentados em gráficos. A Tabela 14 reúne estes valores mencionados, sendo que os aproximados foram obtidos a partir de interpretação gráfica.

Tabela 14 - Resumo de temperaturas alcançadas para diferentes tempos de ensaio e sistemas de proteção

Sistema de proteção		Temperatura atingida (°C)	Tempo de ensaio (min)	Ensaio	Estudo
Proteção	Espessura (mm)				
SC	40	284	120	ISO 834	[79]
SC	100	115	120	ISO 834	[79]
PBL	30	>800 ²	Aprox. 70 ²	ISO 834	[79]
PBL	40	>400 ²	Aprox. 35 ²	ISO 834	[79]
PBL	40 ¹	Aprox. 300 ²	120	ISO 834	[79]
SC	100 ¹	116	60	ISO 834	[80]
SC	60 ¹	111	60	ISO 834	[80]
Nenhuma	-	239 ZA - 315 ZC	18	ISO 834	[100]
SC	25 ZA - 0 ZC	117 ZA - 630 ZC	34	ISO 834	[100]
SC	25 ZA - 25 ZC	219 ZA - 249 ZC	90	ISO 834	[100]
SC	50 ZA - 25 ZC	201 ZA - 282 ZC	114	ISO 834	[100]
Nenhuma	-	Aprox. 300	Aprox. 40	ISO 834	[98]
RI	2	Aprox. 300	Aprox. 80	ISO 834	[98]
RI	2 ¹	Aprox. 150	Aprox. 70	ISO 834	[98]
AC	10	Aprox. 300	Aprox. 50	ISO 834	[98]
AC	25 ¹	Aprox. 250	180	ISO 834	[98]
AC	25 ¹	Aprox. 120	Aprox. 70	ISO 834	[98]
AC	40	Aprox. 280	240	ASTM E 119	[73]
AC	40	Aprox. 250	240	ASTM E 119	[73]
AC	60	Aprox. 210	240	ASTM E 119	[73]
GV e RI	25 e 0,1	Aprox. 300 ²	Aprox. 70	Fogo de cálculo	[61]
GV e RI	25 e 0,1	Aprox. 300 ²	Aprox. 50	Fogo de cálculo	[61]
GV e RI	25 e 0,1	Aprox. 300 ²	Aprox. 50	ASTM E 119	[61]
GV e RI	25 e 0,1	Aprox. 300 ²	Aprox. 60	ASTM E 119	[61]
Nenhuma	-	414	23	ISO 834	[74]
AV	25	176	89	ISO 834	[74]
AV	40	187	167	ISO 834	[74]
SC	25	119	60	ISO 834	[74]
SC	40	146	137	ISO 834	[74]

¹ Espessuras adicionais nas laterais do sistema de reforço; ² Valores referentes a temperatura na interface entre sistema de proteção e compósito FRP.

Para situações em que não são utilizados sistemas de proteção, a temperatura no compósito pode superar 400 °C em 23 minutos de exposição ao fogo, e este possivelmente já estaria em processo de decomposição, visto que a temperatura em que este processo se inicia se aproxima de 200 °C. Porém, este tempo pode variar para ensaios sob as mesmas condições, observando-se valores de até 40 minutos para que esta temperatura seja de 300 °C. Isso indica a impossibilidade de se garantir intervalos de tempo precisos para os sistemas de proteção. Além disso, observaram-se variações significativas de tempo de proteção para sistemas de mesma espessura, em ensaios realizados por diferentes autores. Desta forma, foram considerados como tempos característicos de proteção face a temperaturas extremas, os correspondentes aos menores intervalos de tempo observados em ensaios.

Os sistemas de proteção com argamassa cimentícia (AC) mantiveram a temperatura abaixo de 300 °C por 50 minutos, em espessuras de 10 mm, até 240 minutos, em espessuras de 60 mm. As argamassas com adição de vermiculita (AV) mantiveram a temperatura abaixo de 200 °C por 89 minutos, para espessura de 25 mm, e 167 minutos, para espessura de 40 mm.

Em sistemas com 25 mm de argamassa de gesso com adição de vermiculita (GV), em associação a fina camada (0,1 mm) de revestimento intumescente (RI), foi observado um tempo de pelo menos 50 minutos para que a temperatura no compósito atingisse 300 °C. Quando utilizado somente o RI, em camadas de 2 mm, esta temperatura foi atingida somente após 80 minutos.

As placas de betão leve não geraram grande efeito de proteção neste quesito, em comparação aos demais, somente em casos em que houve espessuras de proteção adicionais nas laterais do compósito, que permitiu manter a temperatura abaixo de 300 °C por 120 minutos.

Os sistemas de proteção com placas de silicato de cálcio (SC) possuem mais dados a se analisar, porém, apresentam grandes variações para espessuras similares. Entretanto, no resultado mais crítico, uma espessura de 25 mm de SC manteve a temperatura abaixo de 250 °C por 90 minutos. Para espessuras de 50 mm, a temperatura aproximou-se de 200 °C após 114 minutos, tempo próximo ao que espessuras de 100 mm mantiveram a temperatura dos compósitos próxima de 115 °C.

Todas as informações e parâmetros avaliados, obtidos a partir dos estudos analisados, são apresentados no Anexo A2.

5.4. PROPOSTAS DE CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO

A proteção de compósitos de FRP pode ser realizada para diferentes finalidades, em exposições a altas temperaturas e ao fogo. Os parâmetros necessários para avaliar a necessidade de proteção são a temperatura e condição de exposição do material, o sistema de reforço, assim como as características dos seus componentes.

5.4.1. CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS

Para a proteção frente às temperaturas elevadas, em exposição ambiental, o objetivo é garantir que a temperatura no compósito não se eleve a ponto de ocorrer perda das suas capacidades mecânicas de reforço. Estas perdas ocorrem a partir da temperatura crítica do material, condicionada pelo adesivo ou resina, resultante de alguns fatores, como condição e tempo de cura, método de avaliação e ensaio utilizado.

Um aspeto importante que irá condicionar a proteção térmica dos compósitos a altas temperaturas é a exposição ambiental a que eles estarão sujeitos. Em caso de exposição solar direta, a localização e disposição do elemento reforçado afetam diretamente a sua temperatura superficial (TS). Neste caso, recomenda-se utilizar equações teóricas, como a Equação 1, apresentada no Capítulo 3, utilizando os

valores de referência para Portugal, se este for o caso, conforme a cor do substrato, localização e disposição da estrutura. Quando não ocorre exposição solar direta, os valores de temperatura superficial podem ser estimados a partir da recomendação da norma EN 1991-1-5 [38], correspondentes às zonas de localização em Portugal. Além disso, podem ser utilizados, como referência, valores observados em obras, em estudos como os de Juvandes et al. [6] e Magalhães [37].

Para este caso de proteção térmica, deve ser estabelecida a máxima temperatura em que o compósito FRP confere propriedades de resistência e rigidez a estrutura reforçada. Este valor de temperatura crítica pode ser alcançado a partir de uma redução do valor da T_g obtido em ensaios DMA, DMTA ou DSC. Esta redução, em reforços com colagem por técnicas EBR, varia de acordo com o método de definição da T_g e tipo de ensaio utilizado, e valores apropriados para T_c giram em torno de “ $T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_g - 15\text{ °C}$ ” para ensaios DMA e DMTA, e “ $T_g - 10\text{ °C}$ ” para ensaios DSC.

Em reforços colados com técnica NSM, apesar de autores como Firmo e Correia [100] indicarem que o efeito de colagem é perdido em temperaturas acima de “ $2 \times T_g$ ”, é prudente definir uma margem de segurança, o que implicaria numa temperatura limite, neste caso, entre “ $2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $2 \times T_g - 15\text{ °C}$ ”, para T_g definida a partir de ensaios DMA e DMTA, e “ $2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ” para a T_g definida em ensaios DSC.

A definição dos critérios para proteção às altas temperaturas, ou exposição ambiental, depende dos valores de temperatura superficial máxima expectável (TS) e temperatura crítica (T_c). As situações em que a TS é menor ou igual à T_c são encaixadas no Critério 1, e consequentemente, as demais situações, em que TS supera a T_c , são representadas pelo Critério 2. A Tabela 15 reúne as especificações dos critérios para proteção às altas temperaturas.

Tabela 15 - Especificações dos critérios para proteção às altas temperaturas.

Critério	Especificação
Critério 1	$TS \leq T_c$
Critério 2	$TS > T_c$

Na hipótese de não ser possível a realização de ensaios para determinação das T_g e T_c , estes valores podem ser estimados segundo a resina utilizada e condição de cura adotada, através de resultados de ensaios realizados por outros autores. Deve-se atentar que, para garantir a fiabilidade do valor adotado, o processo de cura deve ser o mesmo realizado no ensaio em que foi observado. Em casos de ensaios realizados em laboratório, com temperatura e humidade controlados, os resultados servem apenas como referência, pela impossibilidade de garantir a mesma condição em aplicações “in situ”, que atingiriam valores das T_g e T_c inferiores. A Tabela 16 apresenta um resumo de resultados máximos e mínimos para T_g e T_c de resinas comerciais disponíveis em Portugal. O método de definição da T_g , condição de cura e pós-cura e estudo em que foram obtidos são apresentados no Anexo A1. A coluna que indica a “ T_c a partir da redução de T_g ” corresponde a “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_c = T_g - 15\text{ °C}$ ”, para ensaios DMA e DMTA, e “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” para ensaios DSC, indicando os valores mais críticos. A coluna denominada “ T_c por DMA/DMTA (TE’)” indica valores obtidos em ensaio a partir da temperatura característica TE’ e da mesma forma, os valores de T_g indicados foram observados em ensaios.

Tabela 16 - Resumo de valores das Tg e Tc máximos e mínimos observados em estudos.

Sistemas FRP		Tg por DMA/DMTA (Ttan δ) (°C)		Tg por DSC (°C)		Tc por DMA/DMTA (TE') (°C)		Tc a partir da redução de Tg (°C)	
Produto	Resina	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Laminado	Bettor Resin 220	-	-	54,1	54,1	-	-	44,1	44,1
Manta	Bettor Resin 55	57,2	57,2	55,5	55,5	45,5	45,5	47,2	42,2
Laminado	Mapei Adesilex PG1	-	-	43,6	43,6	-	-	33,6	33,6
Laminado	Mapei Adesilex PG2	-	-	43,8	43,8	-	-	33,8	33,8
Manta	Mapei Mape Wrap 21	-	-	50,5	50,5	-	-	40,5	40,5
Manta	Mapei Mape Wrap 31	-	-	53,2	53,2	-	-	43,2	43,2
Laminado	Mbrace Resin 220	57,5	54,5	56,4	56,4	47,1	47,1	47,5	39,5
Laminado	S&P Resin 220	70,4	48,7	37,0	37,0	41,5	35,0	60,4	27,0
Manta	S&P Resin 55	54,8	54,8	44,4	44,4	41,9	41,9	44,8	34,4
Laminado	Sika Sikadur 30	57,1	55,3	51,6	51,6	44,3	44,3	47,1	40,3
Laminado	Sika Sikadur 30 LP	73,5	59,2	-	-	-	-	63,5	44,2
Manta	Sika Sikadur 330	85,0	54,7	49,3	49,3	45,1	45,1	75,0	39,3

5.4.2. CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO AO FOGO

A proteção ao fogo pode ser avaliada de duas formas: manutenção da temperatura do compósito abaixo da temperatura crítica (Tc) por um determinado período durante um incêndio, representada pelo critério 1, ou prevenção da decomposição e combustão dos elementos constituintes do compósito FRP em exposição ao fogo, para impedir a liberação de gases, fumos e resíduos tóxicos e permitir a reutilização dos compósitos em cenários pós-incêndio, representada pelo critério 2.

A temperatura limite da eficácia do sistema de reforço por FRP é condicionada principalmente pela capacidade de ligação entre o compósito e o elemento reforçado, e varia segundo a técnica de colagem utilizada. Da mesma forma apresentada para proteção às altas temperaturas, a temperatura crítica (Tc) nesta situação é obtida pela redução do valor da Tg dos adesivos e resinas. Para compósitos colados externamente (EBR), a temperatura crítica varia entre “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_c = T_g - 15\text{ °C}$ ”, para ensaios DMA e DMTA, e é obtida por “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” para ensaios DSC. Já para compósitos colados utilizando a técnica NSM, o valor de temperatura limite pode ser encontrado por “ $T_c = 2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_c = 2 \times T_g - 15\text{ °C}$ ”, para ensaios DMA e DMTA, e “ $T_c = 2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ”, por ensaios DSC.

A maior parte de normas e documentos regulatórios recomendam que, para combinação de ações de incêndio, sejam desconsiderados os efeitos de reforço estrutural providos pelos compósitos de FRP. Isso indica que a estrutura original, sem reforço, deverá suportar as cargas atuantes em caso de incêndio, a menos que seja elaborada uma condição que permita prolongar o tempo de serviço dos compósitos neste tipo de situação. No momento, ainda não existem recomendações que indicam o dimensionamento de sistemas de proteção de compósitos FRP à exposição ao fogo. Porém, existe um acervo na literatura de ensaios destes materiais em exposição ao fogo, que podem ser utilizados como referência.

Os parâmetros que devem ser considerados para a determinação do sistema de proteção para esta situação são, principalmente, o sistema de reforço a ser utilizado, carregamento aplicado, capacidade de resistência da estrutura sem reforço e características da resina ou adesivo utilizados, como a sua Tg.

A proteção dos compósitos face aos efeitos de combustão e degradação dos seus constituintes, de acordo com o critério 2, deve ser realizada de modo a não permitir que a temperatura no compósito ultrapasse um certo limite, que parece se aproximar dos 200 °C, mas que varia conforme as características do material utilizado. Este efeito pode ser alcançado por diferentes métodos de proteção, mas a sua disposição e espessura devem ser dimensionadas para o tempo de proteção desejado. A Tabela 17 reúne as especificações dos critérios propostos.

Tabela 17 - Especificações dos critérios para proteção ao fogo.

Critério	Especificação
Critério 1	Manutenção da temperatura do compósito abaixo da Tc por um período definido em projeto ($T \leq T_c$)
Critério 2	Proteção frente aos efeitos de combustão e decomposição ($T \leq T_d$)

Ademais, outros fatores devem ser considerados para a definição do sistema de proteção a se utilizar, como o custo de aplicação e acabamento desejado. A Tabela 18 reúne informações a respeito de alguns aspetos relevantes sobre os principais sistemas de proteção térmica utilizados.

Tabela 18 - Informações sobre os sistemas de proteção térmica

Sistema de Proteção	Método de aplicação	Espessura usual (mm)	Custo comercial na Europa			
			Preço (€/m ²)	Espessura (mm)	Data	Fonte
Revestimento Intumescente	Tinta ou pulverização	0,1 a 2	22,51 ¹	1	2022	[101]
Argamassa de Gesso com Vermiculita	Espalhamento	25 a 60	5,63 ¹	20	2020	[63]
Placas de Gesso	Aparafusamento	10 a 30	4,79 ¹	13	2022	[70]
Lã de Rocha	Fixação mecânica	30	5,28 ¹	30	2022	[83]
Argamassa Cimentícia	Espalhamento	40 a 60	9,42 ¹	20	2020	[63]
Argamassa Cimentícia com Vermiculita	Espalhamento	25 a 40	16,46 ¹	20	2020	[63]
Placas de Silicato de Cálcio	Aparafusamento ou colagem	25 a 100	52,18 ¹	25	2022	[81]
Placas de Betão Leve	Aparafusamento	30 a 40	132,07 ²	30	2022	[87]

¹ Valores correspondentes a Portugal; ² Valores correspondentes a Alemanha.

5.5. PROTEÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS

Para se obter um sistema de proteção de compósitos FRP às altas temperaturas, não muito acima dos valores da T_g , devem ser avaliados alguns parâmetros. Entre eles, os mais importantes são a temperatura crítica da resina ou adesivo utilizados, e a condição de exposição ao ambiente do sistema.

Para o critério 1, não existe necessidade de proteção térmica propriamente dita, podendo ser aplicada somente uma proteção contra efeitos ambientais, nomeadamente humidade e agentes UV, como uma pintura superficial com proteção ultravioleta, se necessário. Para isso, são utilizadas tintas à base de epóxi poliuretano, como a utilizada no caso de estudo do Edifício Palladium.

Nos casos em que for concluído que o valor de TS do compósito possa atingir ou ultrapassar a T_c , o primeiro método de proteção a ser avaliado é a pintura externa. A utilização de cores claras, como o branco, ou tintas de cores frias (“cool pigments”), podem gerar um decréscimo considerável no valor de temperatura superficial. Desta forma, além da diminuição da temperatura do substrato, também é gerada uma proteção contra raios ultravioletas, se empregadas tintas à base de epóxi poliuretano, e ao mesmo tempo à variação de humidade.

Caso este método não seja capaz de manter a T_c acima da TS máxima expectável no compósito FRP, devem ser utilizadas técnicas adicionais de proteção, como aplicação de argamassa cimentícia ou à base de gesso. Estas técnicas são recomendadas por não serem totalmente impermeáveis, permitindo o “respiro” do compósito, prevenindo danos produzidos por pressão. Além disso, elas apresentam bom comportamento de isolamento térmico aliados ao baixo custo de aplicação, em comparação aos outros métodos de proteção ao fogo. Estes mecanismos adicionais de proteção térmica deverão ser empregados na camada interna à pintura.

Os estudos observados permitiram concluir que, uma espessura de 25 mm de argamassa cimentícia manteve a temperatura do compósito abaixo de 50 °C por pelo menos 15 minutos, para situações de exposição ao fogo. Esta espessura apresentou um desempenho de proteção muito superior em relação à de 10 mm, o que indica que esta relação não é linear. Como a proteção, nesta hipótese, não considera atuação do fogo, não é necessária a aplicação de sistemas de proteção dispendiosos. A Tabela 19 apresenta propostas de sistemas de proteção indicados para cada critério de proteção às altas temperaturas.

Tabela 19 - Propostas de sistemas de proteção às altas temperaturas.

Critério	Proteção indicada	Proposta de sistemas de proteção
Critério 1	Proteção frente aos efeitos da humidade e agentes UV	Tintas à base de epóxi poliuretano
Critério 2	Aplicação de sistemas de proteção térmica adicionais	Argamassa cimentícia ou à base de gesso e tintas à base de epóxi poliuretano de cores claras

5.6. PROTEÇÃO AO FOGO

Como discutido anteriormente, existem dois critérios de proteção ao fogo. O critério 1 pretende manter o funcionamento de sistemas de reforço de FRP, por um período, durante um incêndio. O critério 2 despreza o efeito de reforço destes sistemas, e procura garantir apenas que estes não atinjam temperaturas extremas, a ponto de entrar em combustão e decomposição, produzindo gases, fumos e resíduos tóxicos.

Para se realizar o dimensionamento da proteção térmica, referente ao critério 1, devem ser avaliadas as condições estruturais do elemento reforçado, assim como o carregamento nele aplicado. Partindo do pressuposto que a carga total aplicada na estrutura reforçada corresponde a mais de 100% do valor de rotura dela, sem reforço, a segurança estrutural está intimamente relacionada à condição da ligação entre compósito e estrutura. Neste caso, ao atingir a temperatura crítica, indicada no *subcapítulo 5.4.2*, não é possível garantir a ligação do reforço, e consequentemente, a segurança da estrutura. Para este tipo de proteção térmica, alguns dos estudos apresentados dispõem de informações que auxiliam na procura de sistemas que resistam durante um determinado intervalo, até que seja atingida a temperatura crítica.

Os tempos de TTg e TFalha, observados nos ensaios e discutidos anteriormente, indicam que para se garantir um maior período de ligação entre compósito e estrutura reforçada, em situações de incêndio, devem ser utilizadas maiores espessuras de sistema de proteção, principalmente nas zonas de ancoragem. É possível obter períodos, em que a ligação é efetiva, superiores a 60 minutos de exposição ao fogo, como observado com proteção a partir de placas de silicato de cálcio (SC). Outros sistemas que mostraram ser eficazes são as argamassas cimentícia (AC), com adição de vermiculita (AV), à base de gesso com vermiculita (GV), as placas de gesso (PG) e com associação à lã de rocha (LR), e as placas de betão leve (PBL).

De qualquer forma, somente é possível obter uma estimativa de tempo de proteção destes sistemas com base na espessura utilizada, pois se faz necessária a realização de ensaios com os demais parâmetros fixados. Além disso, para a validação destes sistemas, são necessários testes de exposição ao fogo em escala real.

Referente à proteção face à decomposição e combustão dos elementos constituintes do FRP, referente ao critério 2, a Tabela 13, apresentada anteriormente, pode ser utilizada como base para estimativa de intervalos de tempo aos quais os sistemas de proteção mantêm a temperatura no compósito abaixo de valores em que ocorrem os processos de decomposição e combustão. Estes valores de temperatura dependem dos materiais empregados, sobretudo da resina ou adesivo de colagem. Portanto, primeiramente devem ser realizados ensaios nestes materiais a fim de ser definida a temperatura em que estes processos se iniciam.

Caso esta temperatura seja próxima de 300 °C, os resultados dos ensaios analisados permitem observar os seguintes tempos de proteção, para diferentes espessuras de sistemas de proteção:

- Revestimento Intumescente: 80 minutos para 2 mm;
- Argamassa Cimentícia: 50 minutos para 10 mm e 240 minutos para 60 mm;
- Argamassa de Gesso com adição de Vermiculita, em associação a 0,1 mm de RI: 50 minutos para 25 mm;
- Placas de Betão Leve: 120 minutos para 40 mm (com espessura adicional nas laterais do reforço);

Em situações em que é determinado que a temperatura deve ser inferior a 300 °C, foram observados os seguintes períodos de proteção para as respectivas espessuras:

- Placas de Silicato de Cálcio (250 °C): 90 minutos para 25 mm;
- Argamassa Cimentícia com adição de Vermiculita (200 °C): 89 minutos para 25 mm, e 167 minutos para 40 mm.
- Placas de Silicato de Cálcio (200 °C): 114 minutos para 50 mm;
- Placas de Silicato de Cálcio (115 °C): 120 minutos para 100 mm;

Os sistemas de proteção avaliados apresentaram bom comportamento para esta finalidade, principalmente as placas de silicato de cálcio. Entretanto, da mesma que para o primeiro critério de proteção ao fogo, estes valores correspondem a ensaios em fornos a partir de curvas de incêndio padrão, e não representam fielmente o comportamento deles em situação real de incêndio, só podendo ser validados caso ensaios em escala real fossem realizados. A Tabela 20 indica propostas de sistemas de proteção ao fogo para os critérios adotados.

Tabela 20 - Propostas de sistemas de proteção ao fogo.

Critério	Proteção indicada	Proposta de sistemas de proteção
Critério 1	Sistema de proteção de acordo com o tempo de proteção definido em projeto	Placas de Silicato de Cálcio (SC) com aumento de espessura nas zonas de ancoragem (ZA)
Critério 2	Sistema de proteção de acordo com a temperatura de decomposição (Td) do material	Placas de Silicato de Cálcio (SC) ou Argamassa Cimentícia com adição de Vermiculita (AV)

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das formas mais eficientes de se combater os efeitos das ações térmicas às estruturas é a partir de sistemas de proteção passiva. Esta é uma técnica que vem sendo estudada para proteção de sistemas de compósitos de FRP, por apresentarem fragilidade sob altas temperaturas, ao perder propriedades mecânicas em valores da sua temperatura crítica e pela possibilidade de entrar em processo de combustão e decomposição.

Os sistemas mais estudados para este propósito são derivados daqueles que apresentam boa performance de proteção térmica para outros elementos estruturais. Foram reunidos valores, correspondentes a ensaios ao fogo e altas temperaturas, de ensaios presentes na literatura para analisar a eficiência de sistemas compostos por revestimento intumescente (RI), argamassa cimentícia (AC) e com adição de vermiculita (AV), argamassa à base de gesso com vermiculita (GV) em associação ou não à lã de rocha (LR), placas de silicato de cálcio (SC) e placas de betão leve (PBL), além de ser verificada a proteção gerada por pintura externa, com proteção face aos agentes UV.

O desempenho da solução de proteção a partir de pintura externa foi avaliado com base num caso de estudo, em que um sistema de reforço realizado com compósitos FRP colados externamente foi protegido a partir da aplicação externa de pintura à base de epóxi poliuretano, face à exposição ambiental e aos raios ultravioletas. Neste caso, passados 19 anos da aplicação do sistema, observou-se, por identificação visual, que a estrutura se manteve estável, sem aparentes fendas ou laminações do

revestimento, sendo que as patologias observadas foram de caráter biológico, podendo ser tratadas com aplicação de “biocidas”.

Em relação aos demais sistemas de proteção térmica, foram utilizados alguns parâmetros obtidos dos ensaios, como tempo até que o compósito atingisse a Tg (TTg), ou tempo até a falha do sistema (TFalha), para avaliar as suas eficiências, em caráter comparativo. Ambos os parâmetros possuem imprecisões, sendo que o TTg é diretamente afetado pela Tg dos compósitos, impossibilitando a comparação de ensaios com Tgs diferentes, e TFalha depende da carga aplicada na estrutura, assim como as características dos compósitos, resinas e adesivos de colagem. A maior parte dos sistemas apresentou eficácia em relação a manter a temperatura abaixo de valores das Tg e Tc, com exceção do revestimento intumescente, que possui temperatura de ativação acima de 150 °C.

Foram identificadas técnicas que viabilizaram melhores desempenhos, como o aumento da espessura de proteção em zonas de ancoragem, gerando um efeito de “cabo” com os compósitos resistindo à tração sem ligação efetiva na secção de meio vão. Os reforços que utilizaram técnicas de colagem NSM apresentaram tempo de ligação muito superior aos colados externamente, o que refletiu em valores diferentes de temperatura crítica, descritos a seguir.

Os critérios de proteção foram divididos com base na proteção que se almeja obter, quer para exposições ambientais, em que a temperatura pode se elevar até um limite, ou em situações extremas, quer em cenários de incêndio. O critério de temperatura crítica (Tc), a qual um compósito apresenta as propriedades próximas às iniciais de resistência, rigidez e a qual uma resina ou adesivo apresenta propriedades de ligação, é obtida a partir da redução dos valores da Tg obtidos em ensaios. Para reforços colados pela técnica EBR, a temperatura crítica varia entre “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_c = T_g - 15\text{ °C}$ ”, para ensaios DMA e DMTA, e é obtida por “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ ” para ensaios DSC. Quando colados utilizando a técnica NSM, o valor de temperatura crítica é obtido por “ $T_c = 2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ” e “ $T_c = 2 \times T_g - 15\text{ °C}$ ”, para ensaios DMA e DMTA, e “ $T_c = 2 \times T_g - 10\text{ °C}$ ”, por ensaios DSC.

Em situações em que se deseja realizar proteção à exposição ambiental, deve-se verificar se a temperatura máxima expectável do compósito FRP excede a sua Tc. Neste caso, correspondente ao critério 2, devem ser aplicados sistemas de proteção térmica passiva, nomeadamente argamassa cimentícia ou à base de gesso, pois apresentam menor custo, e caso seja exposto ao sol, aplicar tintas à base de epóxi poliuretano na camada superficial. Se a temperatura superficial máxima expectável for inferior a Tc, encaixando-se assim no critério 1, pode ser aplicada somente a pintura externa, sem necessidade de proteções adicionais.

Os critérios de proteção às exposições ao fogo dividem-se em: manter a ligação do compósito FRP com a estrutura reforçada por um período definido em projeto, e consequentemente o seu sistema de reforço, situação representada pelo critério 1, e retardar ou evitar os processos de combustão e decomposição dos compósitos, impedindo a libertação de gases, fumos e resíduos tóxicos, além de possibilitar a reutilização dos compósitos em cenários pós-incêndio, retratado como critério 2.

Os resultados dos ensaios analisados demonstram que é possível obter um sistema de reforço que funcione em situações de incêndio com aplicação de sistemas de proteção passiva, sendo sua eficiência proporcional à espessura da proteção utilizada. Neste caso, são válidas as técnicas de aumento da espessura nas zonas de ancoragem e utilização da colagem NSM, que permitem períodos de ligação mais extensos. Quase todos os sistemas de proteção passiva observados permitiram prolongar o tempo de serviço de sistemas de reforço com FRP neste cenário, sendo eles: AC, AV, GV, LR, SC e PBL. Desta forma, são possíveis sistemas de proteção a serem utilizados em situações do critério 1. Entretanto, a validação da utilização destes sistemas está sujeita à realização de ensaios com exposição ao fogo em escala real.

A decomposição e combustão dos materiais constituintes dos compósitos de FRP acontecem em temperaturas mais elevadas, que podem se iniciar a partir de 200 °C. Estas temperaturas características são fundamentais no dimensionamento do sistema de proteção térmica face a estes processos. Para esta finalidade, referente ao critério 2, todos os sistemas avaliados apresentaram eficácia, excluindo, evidentemente, a pintura externa. A elaboração do sistema deve levar em conta a temperatura máxima que pode ser atingida pelo compósito e o tempo de proteção almejado, a fim de se estimar uma espessura de proteção, de acordo com os valores de ensaios reunidos. Porém, existe uma grande variabilidade de tempos de proteção para mesmas espessuras de sistemas, indicando que estes são imprecisos. A sua validação também requer estudos em escala real, em exposição a incêndio.

De qualquer forma, os parâmetros observados permitem apresentar indicativos dos sistemas de proteção que são eficazes e quais características afetam a sua eficiência. Dentre os estudados, as placas de silicato de cálcio apresentaram certa vantagem em relação aos demais, além de possuírem mais estudos à cerca delas. Técnicas como colagem por NSM, aumento da espessura nas zonas de ancoragem e utilização de compósitos com as Tgs mais altas demonstraram ser vantajosas para proteção térmica dos compósitos de FRP.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

A utilização de compósitos de FRP, como sistema de reforço de estruturas, apresenta vantagem na questão da sustentabilidade, em relação à utilização de materiais tradicionais, ao serem empregados para a mesma função, facto este observado a partir de estudos com análise de ciclo de vida (LCA).

Diversos mecanismos do comportamento dos compósitos de FRP sofrem alterações devido ao aumento de temperatura, sobretudo a junta de ligação FRP-substrato de elemento de reforço, que pode ficar comprometida em valores próximos da temperatura de transição vítrea (T_g), que compreende um intervalo de temperaturas em que o material passa de um estado vítreo para elástico. É fundamental definir uma temperatura máxima em que o compósito ainda retém as suas propriedades iniciais designada por temperatura crítica (T_c). Este valor é obtido com base no ensaio realizado e na técnica de colagem adotada. Para a técnica EBR sugere-se “ $T_c = T_g - 10\text{ °C}$ (ou 15 °C)” e para a NSM propõe-se “ $T_c = 2 \times T_g - 10\text{ °C}$ (ou 15 °C)”.

Existe uma grande variabilidade de valores da T_g para resinas comercialmente disponíveis em Portugal, entre valores de 35 °C a 80 °C , fruto de diferentes métodos de cura e ensaios, sendo que em condições de aplicação “in-situ” estes valores de temperaturas podem ser reduzidos. Em Portugal, foram analisados estudos em que houve monitorização de condições higrotérmicas de obras por longos períodos, além de documentos que avaliaram a temperatura superficial de estruturas por meio de outros parâmetros e equações teóricas, observando-se nos materiais temperaturas expectáveis acima dos valores estabelecidos para temperatura crítica (T_c) dos compósitos avaliados, merecendo alguma atenção na definição de sistemas de proteção.

A exposição ao fogo afeta o comportamento dos elementos constituintes dos compósitos FRP de maneira acentuada, ao reduzir as suas propriedades mecânicas em questão de minutos e induzir processos de combustão e decomposição dos elementos a partir de 200 °C , com libertação de fumos, gases e resíduos tóxicos. As principais afetadas são as matrizes poliméricas e a resina de colagem, mas algumas fibras também possuem comportamento combustível. Para esta exposição, a técnica de colagem NSM permitiu maior tempo de funcionamento do sistema FRP do que a técnica EBR, e os compósitos com fibras de carbono apresentaram melhor comportamento que aqueles com fibras de vidro. Contudo, de qualquer forma existe a necessidade de um sistema de proteção ao fogo.

Foram propostos dois critérios para proteção às altas temperaturas, ou exposição ambiental, e dois critérios para proteção ao fogo. Para cada um, foram sugeridos tipos de sistemas de proteção disponíveis no mercado. Três destes critérios dependem do valor de temperatura crítica (T_c), que é obtida com base no ensaio realizado e na técnica de colagem adotada. A eficiência dos sistemas de proteção foi avaliada

a partir de resultados de estudos que realizaram ensaios em fornos seguindo curvas de incêndio padrão e um caso de estudo de proteção realizada em Portugal.

Foram identificados oito tipos de sistemas de proteção térmica disponíveis no mercado, sendo as placas de silicato de cálcio (SC) as que apresentam o melhor comportamento para exposição ao fogo e as pinturas à base de epóxi poliuretano, com cores claras, as mais indicadas para exposição ambiental (temperaturas, humidade e UVs).

Para proteção frente às temperaturas expectáveis dos compósitos FRP em serviço, são indicados sistemas de proteção condizentes com estas temperaturas. Em situações em que não se espera que a T_c seja atingida, encaixadas no critério de proteção 1, podem ser utilizadas tintas à base de epóxi poliuretano, que geram proteção face aos agentes UV. Para os casos em que se verifica que esta temperatura é ultrapassada, representados pelo critério de proteção 2, devem ser aplicados sistemas de proteção adicionais.

A observação do desempenho da proteção ambiental com base numa pintura externa, à base de epóxi poliuretano, de um caso em Portugal, após cerca de 20 anos, permitiu validar a estabilidade estrutural do sistema de reforço de FRP e constatar que as patologias observadas foram de carácter biológico, podendo ser tratadas com aplicação de “biocidas”.

Em situações de exposição ao fogo, na maior parte dos sistemas de proteção avaliados, foi possível observar que a temperatura nos compósitos foi inferior a T_c por algum período, sendo maior conforme com a espessura da proteção, de maneira não linear. Foi concluído que é possível elaborar sistemas de proteção que prolonguem o tempo de serviço dos reforços nestas situações, que se encaixam no critério de proteção 1, especialmente a partir de técnicas de aumento de espessura em zonas de ancoragem e com colagem por NSM. Estes sistemas também permitiram manter a temperatura abaixo de valores em que ocorrem os processos de degradação e combustão dos elementos dos compósitos, eficazes para o critério de proteção 2, por períodos prolongados, dependendo do sistema de proteção e espessura utilizados.

As informações reunidas neste trabalho podem indicar bons parâmetros a se avaliar na conceção de sistemas de proteção térmica para compósitos de FRP, com base na sua finalidade. De entre os sistemas investigados, o que apresenta melhor resposta para proteção ao fogo, além de mais estudos, é o composto por placas de silicato de cálcio. Os demais sistemas também apresentam eficácia.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A elaboração deste trabalho permitiu constatar que sistemas de proteção térmica para compósitos FRP podem ser eficientes para exposições ambientais e ao fogo. Desta forma, sugere-se para futuros trabalhos:

- Avaliar as condições e os valores de temperaturas em que são iniciados processos de decomposição e combustão de resinas, adesivos e compósitos FRP comercialmente disponíveis;
- Identificar e validar critérios e limites, quer para situações de exposição ambiental, quer para situações de exposição ao fogo;
- Examinar os diferentes sistemas de proteção apresentados em ensaios sob mesma condição, com parâmetros fixados;
- Realizar mais ensaios em escala real para calibrar parâmetros e ajustar modelos teóricos;
- Alargar os critérios de estudo a parâmetros como a agressividade química, humidade e raios UVs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Juvandes, L.F.P., *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras na Construção Civil*. Palestra no workshop “Os Materiais na Casa do Futuro”, Projecto AveiroDomus, Aveiro, 15 Março, 2006.
- [2] Juvandes, L.F.P., *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 1999.
- [3] Juvandes, L.F.P., *Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas*. 1as Jornadas de Materiais na Construção, 2011: p. 239-270.
- [4] Marques, N., *Procedimentos de aplicação e controlo de qualidade para reforço com sistemas compósitos de FRP*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [5] Silva, P., *Comportamento de estruturas de betão reforçadas por colagem exterior de sistemas de CFRP*. Tese de Doutoramento, FEUP, 2008.
- [6] Juvandes, L.F.P., et al., *A temperatura e a técnica de reforço por colagem de sistemas de FRP*. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2006.
- [7] Firmo, J.P., *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*. Dissertação de Mestrado, IST, 2010.
- [8] Fortes, A., Barros, J.A.O., and Padaratz, I.J., *Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*. 2002, Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil (DEC).
- [9] Firmo, J.P.L.d.C., *Fire behaviour of reinforced concrete structures strengthened with CFRP strips*. Dissertação de Doutoramento, IST, 2015.
- [10] Bazli, M. and Abolfazli, M., *Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview*. Polymers, 2020. **12**(11): p. 2600.
- [11] Cao, S., Wang, X., and Wu, Z., *Evaluation and prediction of temperature-dependent tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced polymer composites*. Journal of Reinforced Plastics Composites, 2011. **30**(9): p. 799-807.
- [12] Carlos, T.B. and Rodrigues, J.P.C., *Experimental bond behaviour of a CFRP strengthening system for concrete elements at elevated temperatures*. Construction and Building Materials, 2018. **193**: p. 395-404.
- [13] Firmo, J.P., et al., *Influence of elevated temperatures on epoxy adhesive used in CFRP strengthening systems for civil engineering applications*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2019. **93**: p. 102333.
- [14] Correia, J.R., Bai, Y., and Keller, T., *A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications*. Composite Structures, 2015. **127**: p. 267-287.
- [15] Bisby, L.A., Green, M.F. and Kodur, V.K.R., *Response to fire of concrete structures that incorporate FRP*. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005. **7**(3): p. 136-149.
- [16] Firmo, J.P., Arruda, M.R., and Correia, J.R., *Comportamento em situação de incêndio de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP instalados em rasgos: ensaios de resistência ao fogo e simulações numéricas*. 2017.
- [17] Maxineasa, S.G. and Taranu, N., *Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP, in Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. 2018, Elsevier. p. 673-721.
- [18] Hota, G. and Liang, R. *Advanced fiber reinforced polymer composites for sustainable civil infrastructures*. in *Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering*. 2011. Xiamen University.
- [19] Ibrahim, M., Ebead, U., and Al-Ansari, M., *Life Cycle Assessment for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) nComposites Used in Concrete Beams: A State-of-the-Art Review*. 2020.
- [20] Lee, L.S. and Jain, R., *The role of FRP composites in a sustainable world*. Clean Technologies Environmental Policy, 2009. **11**(3): p. 247-249.

- [21] Pearson, M., Donchev, T., and Limbachiya, M. *An investigation into the sustainability of FRP reinforcement bars*. in *Proc. 11th International Symposium FRPRCS11*. 2013.
- [22] Zyjewski, A., Chróścielewski, J., and Pyrzowski, Ł., *The use of fibre-reinforced polymers (FRP) in bridges as a favourable solution for the environment*. E3S Web of Conferences, 2017. **17**: p. 00102.
- [23] Michels, J., et al., *Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications*. Composites Part B: Engineering, 2015. **77**: p. 484-493.
- [24] Startsev, O.V., et al., *Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis*. Mechanics of Composite Materials, 2020. **56**(2): p. 227-240.
- [25] Othman, D., Stratford, T., and Bisby, L., *A Comparison of on-site and elevated temperature cure of an FRP strengthening adhesive*, in *Proceedings of Fibre Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures*. 2013.
- [26] ISO 11357-1. *Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 1: General principles*. International Organisation for Standardization., 1997.
- [27] ISO 6721-1. *Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 1: General principles*. 1994.
- [28] Cruz, R., et al., *Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing*. Materials (Basel), 2021. **14**(6).
- [29] Silva, P., et al., *Effects of different environmental conditions on the mechanical characteristics of a structural epoxy*. Composites Part B: Engineering, 2016. **88**: p. 55-63.
- [30] Hollaway, L.C. and Leeming, M., *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1999: Elsevier.
- [31] Li, G., Lee-Sullivan, P., and Thring, R., *Determination of activation energy for glass transition of an epoxy adhesive using dynamic mechanical analysis*. Journal of thermal analysis calorimetry, 2000. **60**(2): p. 377-390.
- [32] Proia, A. and Matthys, S., *Influence of environmental conditions on the glass transition temperature of epoxy used for strengthening applications*. Polymer Testing, 2019. **79**.
- [33] EN 12614:2004. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures-Test Methods-Determination of Glass Transition Temperatures of Polymers*. 2004.
- [34] EUROCOMP, *Structural design of polymer composites: Eurocomp design code and background document*, ed. E.F.S. John L Clarke. 2003: CRC Press.
- [35] International Federation for Structural Concrete (fib). *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*, fib 90. 2019.
- [36] American Concrete Institute (ACI) Committee 440, ACI 440.2R-17. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*. American Concrete Institute. 2017.
- [37] Magalhães, F., *Observação de comportamento térmico de pontes*. Documento de trabalho, FEUP, 2022.
- [38] EN 1991-1-5. *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas - Parte 1-5: Acções gerais - Acções térmicas*. 2009.
- [39] Sousa, A., Freitas, V., and Silva, J., *Manual de aplicação de revestimentos cerâmicos*. Associação Portuguesa da Indústria da Cerâmica, Coimbra, 2003.
- [40] Groupe de Coordination des Textes Techniques. *Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne*. Cahier des clauses techniques. . 1994.
- [41] Saint Gobain Glass. *Manual do Vidro*. 2000.
- [42] Carneiro, B.D.G., *A Influência da Cor na Temperatura Superficial de Revestimentos Térmicos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2016.

- [43] Radhi, H., Assem, E., and Sharples, S., *On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions*. Building Environment, 2014. **72**: p. 162-172.
- [44] Firmo, J.P., Correia, J.R., and Bisby, L.A., *Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review*. Composites Part B: Engineering, 2015. **80**: p. 198-216.
- [45] Bakhtiyari, S., Akbari, L.T., and Ashtiani, M.J., *An investigation on fire hazard and smoke toxicity of epoxy FRP composites*. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2017.
- [46] Mouritz, A.P., Mathys, Z., and Gibson, A.G., *Heat release of polymer composites in fire*. Composites Part A: Applied science manufacturing, 2006. **37**(7): p. 1040-1054.
- [47] Lau, D., et al., *Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures*. Construction building materials, 2016. **126**: p. 573-585.
- [48] ISO 834. *Fire-resistance tests: elements of building construction-part 1.1: general requirements for fire resistance testing*. 1999, ISO834-1: 1999, Geneva.
- [49] Lopes, A.J.S., *Avaliação do risco de incêndio em edifícios*. 2004, Lisboa.
- [50] Soudki, K. and Alkhrdaji, T. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2 R-02)*. in *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*. 2005.
- [51] Grilo, I., Branco, F., and Júlio, E., *Utilização de Argamassas na Protecção de Elementos Reforçados com FRP face a Acção Térmica*. 2011.
- [52] Silva, L., et al. *Sistemas passivos de protecção ao fogo dos CFRP*. in *XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation-CINPAR*. 2016. FEUP.
- [53] Stratford, T.J., et al., *Bonded fibre reinforced polymer strengthening in a real fire*. Advances in Structural Engineering, 2009. **12**(6): p. 867-878.
- [54] Sharifianjazi, F., et al., *Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance*. Polymers, 2022. **14**(3): p. 472.
- [55] Dowling, J., *Designing for fire protection*. Construton news suplement, 2003: p. 14-15.
- [56] Mesquita, L.M.R., et al. *Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente*. in *Actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista*. 2005.
- [57] Khaneghahi, M.H., et al., *Effect of intumescent paint coating on mechanical properties of FRP bars at elevated temperature*. Polymer Testing, 2018. **71**: p. 72-86.
- [58] Ramos, F.A.F.M. and Gonçalves, C.M., *Os revestimentos intumescentes na protecção passiva ao fogo de aço estrutural*. Corrosão e Protecção de Materiais, 2000. **19**(4): p. 11-16.
- [59] Pinto, T.M.C.G., *Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- [60] Silva, J., *Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)*. Dissertação de Doutoramento, IST, 2013.
- [61] Ahmed, A. and Kodur, V., *The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure*. Engineering Structures, 2011. **33**(7): p. 2201-2211.
- [62] Gonçalves, N.M.C., *Análise comparativa de soluções estruturais em aço em pavilhões industriais*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2021.
- [63] Figueiredo, M.L., *Comportamento termofísico de argamassas de protecção passiva contra o fogo de base cimentícia e gesso*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2020.
- [64] Oliveira, M.P., *Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (Etileno Acetato de Vinila) e Vermiculita: Otimização de misturas e propriedades termomecânicas*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- [65] Abidi, S., et al., *Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches*. Composites Part B: Engineering, 2015. **68**: p. 392-400.

- [66] Xi, Y.G., et al. *Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards*. in *Advanced Materials Research*. 2011. Trans Tech Publ.
- [67] Gencel, O., et al., *Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results*. *Energy Buildings* 2014. **70**: p. 135-144.
- [68] Martias, C., Joliff, Y., and Favotto, C., *Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test*. *Composites Part B: Engineering*, 2014. **62**: p. 37-53.
- [69] Blontrock, H., Taerwe, L., and Vandeveld, P. *Fire testing of concrete slabs strengthened with fibre composite laminates*. in *FRPRCS-5: Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures Volume 1: Proceedings of the fifth international conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, Cambridge, UK, 16–18 July 2001*. 2001. Thomas Telford Publishing.
- [70] Placa de gesso resistente ao fogo FIBROPLAC FIRE BA13 2500MM. Disponível em: <https://www.leroymerlin.pt>. Abril de 2022.
- [71] Vermiculite Expandida 0,5-3mm (grau 2). Disponível em: <https://www.mestrebras.pt/>. Abril de 2022.
- [72] Perlite expandida perol. Disponível em: <https://www.archiproductions.com/>. Abril de 2022.
- [73] Adelzadeh, M., Green, M.F., and Bénichou, N., *Behaviour of fibre reinforced polymer-strengthened T-beams and slabs in fire*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures Buildings* 2012. **165**(7): p. 361-371.
- [74] Firmo, J.P., et al., *Fire protection systems for reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2011.
- [75] Firmo, J.P., et al., *Comportamento a temperatura elevada e em situação de incêndio de elementos de betão armado reforçados com laminados de CFRP aplicados através da técnica EBR*. 2014.
- [76] Faria, R.F.J., *Construção com painéis sanduíche de silicato de cálcio, cimento e EPS*. Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, 2014.
- [77] Tinoco, H.d.L., *Comportamento termomecânico das placas de silicato de cálcio*. Dissertação de Doutoramento, UTFPR, 2021.
- [78] Placa silicato cálcio PROMATECT-L500. Disponível em: <https://www.mestrebras.pt/>. Abril de 2022.
- [79] Palmieri, A., Matthys, S., and Taerwe, L., *Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bar reinforcement*. *Composites Part B: Engineering*, 2012. **43**(3): p. 885-895.
- [80] Palmieri, A., Matthys, S., and Taerwe, L., *Fire endurance and residual strength of insulated concrete beams strengthened with near-surface mounted reinforcement*. *Journal of Composites for Construction*, 2013. **17**(4): p. 454-462.
- [81] Placa Silicato de Cálcio 1100°C 25mm espessura PROMASIL 1100. Disponível em: <https://www.mestrebras.pt/>. Abril de 2022.
- [82] Souza, C.R., *Avaliação do desempenho térmico de vedações em blocos de concreto produzidos com lã de rocha*.
- [83] TERMOLAN ROCTERM PN70 30MM 0.81M². Disponível em: <https://www.leroymerlin.pt/>. Maio de 2022.
- [84] Huang, J.-Q., et al., *Structural behavior of FRP connector enabled precast geopolymer concrete sandwich panels subjected to one-side fire exposure*. *Fire Safety Journal*, 2022: p. 103524.
- [85] Thienel, K.-C., Haller, T., and Beuntner, N., *Lightweight concrete—From basics to innovations*. *Materials*, 2020. **13**(5): p. 1120.
- [86] Ünal, O., Uygunoğlu, T., and Yildiz, A., *Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation*. *Building Environment*, 2007. **42**(2): p. 584-590.

- [87] Fermacell Aestuver T Brandschutzplatte 2600x625x30 mm 38 St. Disponível em: <https://www.hagebau-ott.de/>. Maio de 2022.
- [88] Dornelles, K.A., *Solar absorptance of opaque surfaces: a determination methods and data base for latex acrylic and PVA coatings*. Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [89] NCHRP Report 514. Bonded repair and retrofit of concrete structures using FRP composites: recommended construction specifications and process control manual. 2004.
- [90] Costa, A., et al., *Elementos escultóricos de edifício no Porto (2003)*. capítulo da publicação “Reabilitação Estrutural – Casos práticos de intervenção em estruturas patrimoniais”, editores Costa, A., Arêde, A., Paupério, E., Romão, X., Instituto da Construção, FEUP, Porto, Novembro, Depósito Legal 384736/14, ISBN 978-972-752-172-2, pp. 26 - 31., 2014.
- [91] Master Builders Solutions. *MasterSeal 675: Impermeabilizante acrílico flexível de alto desempenho para lajes e paredes sujeitas à batida de chuva*.
- [92] DJI AIR 2S. Disponível em: <https://www.dji.com/pt/air-2s>. Junho de 2022.
- [93] Canon PowerShot G16. Disponível em: https://www.canon.pt/for_home/product_finder/cameras/digital_camera/powershot/powershot_g16/specification.html. Junho de 2022.
- [94] ICOMOS. Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns - Monuments and Sites. versão inglês-francês de 2008 por José Delgado Rodrigues e Maria João Revez, Edição e coordenação por ICOMOS ISCS., 2016.
- [95] Begonha A., *Patologia da pedra 2020/2021. Parte 4 - tratamentos e intervenções*. Apontamentos da disciplina de Patologia dos materiais em power point, FEUP, 2021.
- [96] ISO 834. Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. International Organization for Standardization. 1999.
- [97] ASTM E119-01. Standard methods of fire tests of building construction and materials., American Society for Testing and Materials. 2001.
- [98] Jiangtao, Y., et al., *The performance of near-surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire*. Fire Safety Journal, 2017. **90**: p. 86-94.
- [99] Firmo, J.P., Arruda, M.R.T., and Correia, J.R., *Contribution to the understanding of the mechanical behaviour of CFRP-strengthened RC beams subjected to fire: Experimental and numerical assessment*. Composites Part B: Engineering, 2014. **66**: p. 15-24.
- [100] Firmo, J.P. and Correia, J.R., *Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with NSM-CFRP strips: Experimental study*. Composites Part B: Engineering, 2015. **76**: p. 112-121.
- [101] Tinta Intumescente PROMAT PROMAPAINTE SC3. Disponível em: <https://www.mestrebras.pt/>. Abril de 2022.

ANEXOS

ANEXO A1 - VALORES DA Tg DE RESINAS COMERCIAIS DISPONÍVEIS EM PORTUGAL

Sistemas FRP		Resultados dos ensaios - Tg (°C)					Ambiente de cura	Ambiente de pós-cura ou exposição	Tc (°C)	Estudo
Produto	Resina	DSC	DMTA	DMA						
			Ttanδ	TE'	Ttanδ	TE''			DMTA	
Laminado	Mbrace Resin 220	54,5	57,5	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	47,1	[6]
Laminado	Sika Sikadur 30	45,6	57,1	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	46,5	[6]
Laminado	Mapei Adesilex PG1	43,6	-	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	-	[6]
Laminado	Mapei Adesilex PG2	43,8	-	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	-	[6]
Manta	Bettor Resin 55	55,5	57,2	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	45,5	[6]
Manta	Sika Sikadur 330	49,3	55,6	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	45,1	[6]
Manta	Mapei Mape Wrap 21	50,5	-	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	-	[6]
Manta	Mapei Mape Wrap 31	53,2	-	-	-	-	Ambiente - Lab.	-	-	[6]
Laminado	S&P Resin 220	37,0	48,7	-	-	-	Ambiente - Obra	-	35	[6]
Manta	S&P Resin 55	44,4	54,8	-	-	-	Ambiente - Obra	-	41,9	[6]
Laminado	Mbrace Resin 220	56,4	-				80°C	-	-	[6]
Laminado	Sika Sikadur 30	51,6	-				80°C	-	-	[6]
Laminado	Bettor Resin 220	54,1	-				Ambiente - Lab.	80°C	-	[6]
Manta	Bettor Resin 55	54,0	-				Ambiente - Lab.	80°C	-	[6]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	55,9	-	3 dias / 24°C / 0% HR	-	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	58,9	-	7 dias / 24°C / 0% HR	-	-	[25]

Sistemas FRP		Resultados dos ensaios - Tg (°C)					Ambiente de cura	Ambiente de pós cura ou exposição	Estudo
		DSC	DMTA		DMA				
Produto	Resina			Ttanδ	TE'	Ttanδ	TE''		
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	61,5	-	14 dias / 24°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	63,1	-	28 dias / 24°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	54,7	-	3 dias / 24°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	57,7	-	7 dias / 24°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	57,2	-	14 dias / 24°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	57,4	-	28 dias / 24°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	80,1	-	3 dias / 50°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	83,0	-	7 dias / 50°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	84,1	-	14 dias / 50°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	85,0	-	28 dias / 50°C / 0% HR	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	67,8	-	3 dias / 50°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	68,9	-	7 dias / 50°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	68,9	-	14 dias / 50°C / Imerso	-	[25]
Manta	Sika Sikadur 330	-	-	-	68,6	-	28 dias / 50°C / Imerso	-	[25]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	47,2	60,1	51,3	Ambiente - Lab.	-	[13]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	43,6	66,1	55,7	Ambiente - Lab.	2 horas / 120°C	[13]

Sistemas FRP		Resultados dos ensaios - Tg (°C)					Ambiente de cura	Ambiente de pós cura ou exposição	Estudo
		DSC	DMTA		DMA				
Produto	Resina			Ttanδ	TE'	Ttanδ	TE''		
Laminado	S&P Resin 220	-	-	-	53,1	-	3 dias / Ambiente - Lab.	-	[23]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	-	67,9	-	28 dias / Ambiente - Lab.	-	[23]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	-	64,8	-	25 minutos / 90°C	3 dias / Amb. Lab.	[23]
Laminado	Sika Sikadur 30 LP	-	-	-	59,2	-	3 dias / Ambiente - Lab.	-	[23]
Laminado	Sika Sikadur 30 LP	-	-	-	73,5	-	25 minutos / 90°C	3 dias / Amb. Lab.	[23]
Laminado	Sika Sikadur 30	-	-	44,3	55,3	-	7 dias / 23°C	-	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	46,2	57	-	7 dias / 23°C	-	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	50,4	62	-	7 dias / 23°C	1 ano / 20°C / 50% HR	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	46,6	57,9	-	7 dias / 23°C	1 ano / 20°C / Imerso	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	51,8	64,5	-	7 dias / 23°C	1 ano / Obra (1)	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	51,5	62,7	-	7 dias / 23°C	1 ano / Obra (2)	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	51,2	65,9	-	7 dias / 23°C	1 ano / Obra (3)	[28]
Laminado	S&P Resin 220			49,9	61,1	-	7 dias / 23°C	1 ano / Obra (4)	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	50,5	62,8	-	7 dias / 23°C	2 anos / 20°C / 50% HR	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	43,2	54,9	-	7 dias / 23°C	2 anos / 20°C / Imerso	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	54,1	67,6	-	7 dias / 23°C	2 anos / Obra (1)	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	54,9	65,8	-	7 dias / 23°C	2 anos / Obra (2)	[28]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	56,2	70,4	-	7 dias / 23°C	2 anos / Obra (3)	[28]

Sistemas FRP		Resultados dos ensaios - Tg (°C)					Ambiente de cura	Ambiente de pós cura ou exposição	Estudo
Produto	Resina	DSC	DMTA	DMA					
			Ttanδ	TE'	Ttanδ	TE''			
Laminado	S&P Resin 220	-	-	47,2	-	59,6	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / Amb. Lab.	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	53,6	-	60,3	1 ano / 22°C / 55% HR	480 dias / Amb. Lab.	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	49,1	-	59,6	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / 20°C / Imerso	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	46,2	-	60,5	1 ano / 22°C / 55% HR	480 dias / 20°C / Imerso	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	42,4	-	57,1	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / 20°C / Imerso	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	45,2	-	60,9	1 ano / 22°C / 55% HR	480 dias / 20°C / Imerso	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	50,2	-	59,2	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / 20°C / Ciclos húmido-seco	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	50,4	-	62	1 ano / 22°C / 55% HR	480 dias / 20°C / Ciclos húmido-seco	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	43,8	-	59,3	1 ano / 22°C / 55% HR	120 dias / 20°C / Ciclos térmicos	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	48,6	-	63,1	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / 20°C / Ciclos térmicos	[29]
Laminado	S&P Resin 220	-	-	41,5	-	56,7	1 ano / 22°C / 55% HR	240 dias / 20°C / Ciclos gelo-degelo	[29]

Em que: (1) Lisboa, clima subtropical com invernos curtos e amenos e verão morno a quente; (2) Próximo a Serra da Estrela, sujeito a ciclos gelo-degelo; (3) Fábrica da S&P Clever and Reinforcement, altas temperaturas de serviço e baixa humidade relativa; (4) Próximo ao oceano atlântico, altas concentrações de cloretos e humidade relativa; Nos casos em que não foi apresentado o valor de Tc, estes valores não foram avaliados por ensaios.

ANEXO A2 - RESULTADOS DE ENSAIOS AO FOGO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO PASSIVA

Sistemas FRP		Tg (°C)	Método	Sistema de reforço		Sistema de proteção		TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Carga (Rotura) [%]	Estudo
Produto	Resina			Técnica	Elemento reforçado	Proteção	Espessura (mm)					
Laminado	Sikadur Sika 30	50 - 60	D.P.F.	EBR	Viga T - B.A.	AC	40	Aprox. 30	> 240	ASTM E 119	71	[73]
Manta	Sikadur-300	50 - 60	D.P.F.	EBR	Laje - B.A.	AC	60	Aprox. 30	> 240	ASTM E 119	71	[73]
Manta	Tyfo S Epoxy	82	DMA	EBR	Viga - B.A.	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	Fogo de cálculo (EC1)	50	[61]
Manta	Tyfo S Epoxy	82	DMA	EBR	Viga - B.A.	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	Fogo de cálculo (EC1)	50	[61]
Manta	Tyfo S Epoxy	82	DMA	EBR	Viga - B.A.	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	ASTM E 119	50	[61]
Manta	Tyfo S Epoxy	82	DMA	EBR	Viga - B.A.	GV e RI	25 e 0,1	20 - 25	> 180	ASTM E 119	50	[61]
Laminado	Resiplast N.V. Multipox	67	DSCA	EBR	Laje - B.A.	PG	18	24	40 - 70	ISO 834	-	[69]
Laminado	Resiplast N.V. Multipox	67	DSCA	EBR	Laje - B.A.	PG	18	34	40 - 70	ISO 834	-	[69]

Sistemas FRP		T _g (°C)	Método	Sistema de reforço		Sistema de proteção		TT _g (min)	TFalha (min)	Ensaio	Carga (Rotura) [%]	Estudo
Produto	Resina			Técnica	Elemento reforçado	Proteção	Espessura (mm)					
Laminado	Resiplast N.V. Multipox	67	DSCA	EBR	Laje - B.A.	PG e LR	18 e 30	38	40 - 70	ISO 834	-	[69]
Laminado	Resiplast N.V. Multipox	67	DSCA	EBR	Laje - B.A.	PG e LR	25 e 30	55	80	ISO 834	-	[69]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	NSM	Viga - B.A.	SC	25 ZA - 0 ZC	-	34 ¹	ISO 834	37 (144)	[100]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	NSM	Viga - B.A.	SC	25 ZA - 25 ZC	-	90 ¹	ISO 834	37 (144)	[100]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	NSM	Viga - B.A.	SC	50 ZA - 25 ZC	-	114 ¹	ISO 834	37 (144)	[100]
Laminado	S&P Resin 220	54	DMTA	EBR	Laje - B.A.	AV	25	24	89	ISO 834	47	[74]
Laminado	S&P Resin 220	54	DMTA	EBR	Laje - B.A.	AV	40	24	167	ISO 834	47	[70]
Laminado	S&P Resin 220	54	DMA	EBR	Laje - B.A.	SC	25	17	60	ISO 834	47	[70]

Sistemas FRP		Tg (°C)	Método	Sistema de reforço		Sistema de proteção		TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Carga (Rotura) [%]	Estudo
Produto	Resina			Técnica	Elemento reforçado	Proteção	Espessura (mm)					
Laminado	S&P Resin 220	54	DMA	EBR	Laje - B.A.	SC	40	38	137	ISO 834	47	[70]
Laminado	S&P Resin 220	54	DMA	EBR	Laje - B.A.	S. P.	-	1	23	ISO 834	58	[70]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	25 ZA - 0 ZC	-	15 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	25 ZA - 25 ZC	-	18 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	50 ZA - 25 ZC	-	40 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	75 ZA - 25 ZC	-	62 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	75 ZA - 50 ZC	-	70 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	Araldite 2014-1	85	D.P.F.	EBR	Viga - B.A.	SC	50 ZA - 25 ZC	-	65 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	Araldite 2014-1 (ZA) e S&P 220 (ZC)	85 e 47	D.P.F. e DMA	EBR	Viga - B.A.	SC	50 ZA - 25 ZC	-	45 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]

Sistemas FRP		Tg (°C)	Método	Sistema de reforço		Sistema de proteção		TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Carga (Rotura) [%]	Estudo
Produto	Resina			Técnica	Elemento reforçado	Proteção	Espessura (mm)					
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	SC e CA (ZA)	50 ZA - 25 ZC	-	47 ¹	ISO 834	36 (114)	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	EBR	Viga - B.A.	S. P.	-	-	2 ¹	ISO 834	70	[99]
Laminado	S&P Resin 220	47	DMA	NSM	Viga - B.A.	S. P.	-	-	18 ¹	ISO 834	70	[99]
Laminado	Resina Epoxy	50	DMTA	NSM	Viga - B.A.	AC	10	Aprox. 5	101	ISO 834	51 (85)	[98]
Laminado	Resina Epoxy	50	DMTA	NSM	Viga - B.A.	AC	25 ²	Aprox. 20	> 180	ISO 834	69 (115)	[98]
Laminado	Resina Epoxy	50	DMTA	EBR	Viga - B.A.	AC	25 ²	Aprox. 15	72	ISO 834	79 (115)	[98]
Laminado	Resina Epoxy	50	DMTA	NSM	Viga - B.A.	RI	2 ²	Aprox. 5	106	ISO 834	51 (85)	[98]
Laminado	Resina Epoxy	50	DMTA	NSM	Viga - B.A.	RI	2	Aprox. 5	72	ISO 834	69 (115)	[98]
Laminado	Fortius Fortresin CFL	65	DSC	NSM	Viga - B.A.	PBL	30	21	-	ISO 834	40 (71)	[79]
Laminado	Fortius Fortresin CFL	65	DSC	NSM	Viga - B.A.	PBL	40	21	-	ISO 834	40 (71)	[79]

Sistemas FRP		Tg (°C)	Método	Sistema de reforço		Sistema de proteção		TTg (min)	TFalha (min)	Ensaio	Carga (Rotura) [%]	Estudo
Produto	Resina			Técnica	Elemento reforçado	Proteção	Espessura (mm)					
Laminado	Fortius Fortresin CFL	65	DSC	NSM	Viga - B.A.	PBL	40	22	-	ISO 834	40 (71)	[79]
Laminado	Sikadur Sika 30	62	DSC	NSM	Viga - B.A.	SC	40 ²	25	-	ISO 834	37 (63)	[79]
Laminado	Sikadur Sika 30	62	DSC	NSM	Viga - B.A.	SC	100 ²	60	-	ISO 834	40 (71)	[79]
Laminado	Sikadur Sika 30	62	DSC	NSM	Viga - B.A.	SC	50 ²	39	-	ISO 834	37 (63)	[80]
Laminado	Fortius Fortresin CFL	65	DSC	NSM	Viga - B.A.	SC	60 ²	38	-	ISO 834	40 (71)	[80]

Em que: S.P. indica sem proteção; D.P.F. representa que os valores foram disponibilizados pelo fornecedor; B.A. corresponde a betão armado; A coluna “carga (rotura) [%]” indica os valores referentes ao carregamento aplicado em relação a capacidade da estrutura reforçada, e entre parenteses o valor deste carregamento em relação a estrutura não reforçada; ¹ Tempo em que houve perda da interação laminado-betão; ² Presença de espessura adicional nas laterais do sistema de proteção.