



**SISTEMAS DE PROTEÇÃO AO FOGO DE ELEMENTOS DE BETÃO
REFORÇADOS COM CFRP**

Luís Duarte Pereira da Silva

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Politécnico de Bragança

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção à

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do

Instituto Politécnico de Bragança

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Luís Manuel Ribeiro de Mesquita

Dezembro de 2016

"Success isn't owned. It's leased, and rent is due every day."

- J.J. Watt

Agradecimentos

Agora que estou prestes a acabar mais uma parte importante da minha vida, queria deixar alguns agradecimentos a quem foi responsável pela ajuda na realização deste trabalho.

Em primeiro lugar à Professora Débora Ferreira, por todos os ensinamentos, pelo seu auxílio, incentivo e paciência demonstrado ao longo desta tese, o meu muito obrigado.

Em segundo lugar ao Professor Luís Mesquita, também pelo seus ensinamentos e ajuda na realização dos ensaios.

Depois ao Professor Manuel Minhoto pelo incentivo e motivação.

Aos técnicos, o Sr. João Pires e o Sr. Otávio Pereira pela ajuda na preparação dos provetes e cedência do espaço.

À Engenheira Luísa pela ajuda com os termopares, cedência de instalações e diverso material disponibilizado no laboratório.

E por fim à minha família que estiveram sempre comigo, principalmente os meus pais e o meu irmão.

E também deixar um agradecimento aos meus amigos, eles sabem quem são e à minha querida Mónica.

Resumo

Com o aumento da utilização dos materiais compósitos (FRP) são inevitavelmente encontrados novos problemas. De entre esses problemas, existem preocupações em relação ao seu comportamento quando expostos ao fogo. No caso de exposição direta ao fogo, é recomendável que os FRP sejam aplicados com medidas adicionais de prevenção.

É objetivo deste trabalho estudar o comportamento dos materiais compósitos à base de fibras de carbono (CFRP) ao fogo. Os materiais utilizados são a manta e o laminado de fibra de carbono. Para tal é apresentada uma campanha de ensaios (10 ensaios com manta e 10 ensaios com laminado) com amostras de provetes de betão de dimensão 100×100×40 [mm]. O CFRP é colado na superfície dos provetes com resina epoxídica exposta à ação térmica.

As medidas passivas estudadas neste trabalho são destinadas a impedir a ignição e a diminuir o impacto dos incêndios através de mecanismos que não necessitam de intervenção humana. Os materiais de proteção ao fogo utilizados para se atingir o tempo de resistência ao fogo pretendido são a placa de gesso e as tintas intumescentes.

A superfície reforçada é exposta à ação de dois fluxos de calor por radiação, 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], provenientes de um calorímetro de perda de massa. A evolução da temperatura é avaliada através de termopares colocados entre as superfícies de ambos os materiais permitindo uma análise da influência destes materiais de proteção na capacidade de reforço estrutural dos CFRP quando submetidos a temperaturas elevadas. Os resultados apresentados mostram que, nos ensaios realizados, a placa de gesso tem um melhor desempenho do que a tinta intumescente.

Palavras-Chave: CFRP; sistemas passivos; calorímetro; resistência ao fogo.

Abstract

With the increase of composite materials (FRP) applications new safety problems arise. Among these issues, there are concerns regarding their behaviour when exposed to fire. In case of direct exposure to fire, it is recommended that the FRP be applied using additional fire protection measures.

An experimental programme was performed in order to evaluate the behaviour of composite materials when exposed to fire, in particular composite materials based on carbon fibres (CFRP). The materials used were the sheet and the carbon laminate fibre. Therefore a campaign of tests (10 tests with sheet and 10 tests with laminate) on concrete specimens with 100×100×40 mm was developed. The CFRP sheet is glued on the surface of the specimens using epoxy resin and exposed to a thermal action.

The surface of the reinforcement system is exposed to the action of different radiant heat fluxes (HF) equal to 35 [kW/m²] and 75 [kW/m²], from a cone calorimeter and the temperature variation measured by thermocouples placed between the surface of concrete and the CFRP.

The influence of passive protection systems on the burning behaviour of CFRP is analysed using different fire protection materials, such as gypsum board (PB) and intumescent paint (IP). The temperature evolution between the different material layers is determined for the two heat fluxes, allowing to analyse the influence of these protective materials in the structural reinforcement capabilities of the CFRP when subjected to high temperatures.

The temperature evolution results show that, for the tested cases, the gypsum board has a better performance than the intumescent coating.

Keywords: CFRP; passive systems, calorimeter, fire resistance.

Índice

1- Introdução.....	1
1.1- Enquadramento	1
1.2- Objetivos.....	2
1.3- Estrutura da tese	2
2- Estado do conhecimento.....	5
2.1- Introdução	5
2.2- Estado do conhecimento	5
2.3- Formas comerciais dos FRP	6
Laminados	7
2.4- Vantagens e desvantagens dos CFRP	8
2.5- Comportamento dos CFRP ao fogo	9
2.6- Sistemas de proteção dos CFRP ao fogo	10
2.6.1- Sistemas ativos	10
2.6.2- Sistemas passivos.....	10
2.7- Resinas	18
3- Programa Experimental	21
3.1- Preparação dos provetes.....	21
3.2- Colagem da manta de CFRP.....	22
3.3- Colagem do laminado de CFRP	24
3.4 – Sistemas de proteção.....	25
3.4.1 – Tinta Intumescente	25
3.4.2 – Placa de gesso laminado	26
4- Testes experimentais do comportamento dos CFRP a temperaturas elevadas..	29
4.1- Calorímetro de perda de massa	29

4.2- Provetes sem proteção.....	32
4.3- Provetes protegidos com placa de gesso	33
4.4- Provetes protegidos com tinta intumescente	35
5- Resultados dos Testes Experimentais	37
5.1- Ensaios dos provetes sem proteção (U)	37
5.2- Ensaios dos provetes protegidos com placa de gesso (PB)	39
5.3- Ensaios provetes com tinta intumescente (IP).....	41
5.4- Comparação entre os provetes reforçados com manta (S)	43
5.5- Comparação entre os ensaios com Laminado (L).....	45
5.6- Comparações gerais (manta e laminado).....	47
5.4- Taxa de libertação de calor (HRR) e perda de massa	49
6- Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	55
7- Referências Bibliográficas	57
8- Anexos	61

Índice de Figuras

Figura 1 - Laminado CFRP	7
Figura 2 - Manta CFRP	8
Figura 3 - Varões CFRP [14]	8
Figura 4 - Tinta intumescente sob ação do fogo [18].....	11
Figura 5 - Placas de vermiculite e aplicação de vermiculite por projeção [20]	12
Figura 6 - Projeção de fibras cerâmicas [21].....	16
Figura 7 - Moldes de betão	21
Figura 8 - Provetes de betão	21
Figura 9 - Polimento da superfície de betão	22
Figura 10 - Resina epoxídica.....	22
Figura 11 - 1ª demão de resina no provete	23
Figura 12 – Aplicação da resina na manta de CFRP	23
Figura 13 - Colagem da manta	23
Figura 14 - Última demão na manta	23
Figura 15 - Manta de CFRP.....	24
Figura 16 - Provetes de betão com manta CFRP.....	24
Figura 17 - Tinta Intumescente Interchar 1160	25
Figura 18 - Aplicação da tinta com trincha	25
Figura 19 - Espessura da tinta intumescente	26
Figura 20 - Placa de gesso aplicada no provete.....	27
Figura 21 - Calorímetro de perda de massa.....	29
Figura 22 - Termopar do tipo K introduzido na base inferior do provete de betão.....	30
Figura 23 - Ignição da resina epoxídica	32
Figura 24 - Extinção da chama e libertação de fumo	32

Figura 25 - Provetes reforçados com mantas de CFRP, para um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	33
Figura 26 – Provetes reforçados com laminado de CFRP, para um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	33
Figura 27 - Provetes reforçados com mantas de CFRP, para um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	33
Figura 28 - Provetes reforçados com laminado de CFRP, para um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	33
Figura 29 - Termopar na face inferior da placa de gesso	34
Figura 30 - Proвете reforçado com mantas de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	34
Figura 31 - Proвете reforçado com laminado de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	34
Figura 32 - Proвете reforçado com mantas de CFRP, e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	34
Figura 33 - Proвете reforçado com laminado de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	34
Figura 34 - Colocação do termopar	35
Figura 35 - Pintura com a tinta intumescente	35
Figura 36 - Provetes reforçados com manta de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	35
Figura 37 - Provetes reforçados com laminado de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 35 [kW/m ²]	36
Figura 38 - Provetes reforçados com manta de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	36
Figura 39 - Provetes reforçados com laminado de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 75 [kW/m ²]	36

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades das argamassas de vermiculite e perlite (Adaptado de [19])..	13
Tabela 2 - Propriedades das placas de gesso (Adaptado de [19]).....	14
Tabela 3 - Propriedades das placas de silicato de cálcio (Adaptado de [19]).....	15
Tabela 4 - Propriedades das fibras minerais (Adaptado de [19])	16
Tabela 5 - Propriedades das mantas de fibras cerâmicas e placas de lã de rocha (Adaptado de [19], [22])	17
Tabela 6 - Propriedades gerais de adesivos epoxy	20
Tabela 7 - Séries de provetes ensaiados [26].....	31

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Comparação entre os ensaios sem proteção da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	38
Gráfico 2 - Comparação entre os ensaios sem proteção da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	39
Gráfico 3 - Comparação entre os ensaios com placa de gesso da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	40
Gráfico 4 - Comparação entre os ensaios com placa de gesso da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	41
Gráfico 5 - Comparação entre os ensaios com tinta intumescente da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	42
Gráfico 6 - Comparação entre os ensaios com tinta intumescente da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	43
Gráfico 7 - Comparação entre os ensaios com manta para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	44
Gráfico 8 - Comparação entre os ensaios com manta para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	45
Gráfico 9 - Comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	46
Gráfico 10 - Comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	47
Gráfico 11 - Evolução da temperatura ao longo do tempo para um fluxo de calor de 35 [kw/m ²]	48
Gráfico 12 - Evolução da temperatura ao longo do tempo para um fluxo de calor de 75 [kw/m ²]	49
Gráfico 13 - Taxa de libertação de calor [kw/m ²]	50
Gráfico 14 - Perda de massa [%]	51
Gráfico 15 - Taxa de libertação de calor provetes com placa de gesso [kw/m ²]	52

Gráfico 16 – Taxa de libertação de calor provetes com tinta intumescente [kw/m²] ... 53

1- Introdução

1.1- Enquadramento

A técnica de reforço de estruturas de betão por meio de colagem de compósitos à base de polímeros reforçados com fibras (FRP) tem vindo a ser aplicada na indústria da construção. São vários os exemplos de aplicação destes materiais quer em pontes quer em edifícios, tanto em novas construções como em reabilitação e/ou reforço de estruturas degradadas. A aplicação de FRP no reforço é atraente para os técnicos de construção e são várias as vantagens que estes materiais apresentam, nomeadamente, a facilidade de colocação em obra, a resistência a agentes agressivos, a sua leveza, e a introdução do confinamento desejado sem aumentar a secção transversal dos elementos estruturais.

Dos vários materiais FRP disponíveis no mercado, o que é mais utilizado na construção é aquele cujas fibras de reforço são fibras de carbono, tendo a designação de CFRP (do inglês, Carbon Fiber Reinforced Polymer). Estes são os mais utilizados uma vez que são os que apresentam melhores características para as várias situações de reforço, principalmente pelo elevado módulo de elasticidade que apresentam, sendo semelhante ao do aço. No entanto, o seu custo elevado bem como certas características do seu comportamento fazem com que ainda não seja uma alternativa indiscutível às técnicas e materiais correntemente utilizados na construção. Com o aumento da utilização dos FRP são inevitavelmente encontrados novos problemas e desafios. De entre esses problemas, existem preocupações legítimas em relação ao comportamento dos materiais FRP quando expostos ao fogo. A maioria dos compósitos não é diretamente inflamável e apresenta um comportamento satisfatório a elevadas temperaturas, contudo a resina utilizada na composição pode comprometer o desempenho do elemento estrutural quando sujeito a um incêndio durante um certo período de tempo. No caso de exposição direta ao fogo é recomendável que os FRP sejam aplicados com medidas adicionais de prevenção. Dependendo do tempo desejado para a resistência ao fogo, podem aplicar-se diversos materiais de proteção tais como: gesso cartonado, painéis de sílica e tintas retardadoras de fogo, [1, 2, 3, 4, 5].

Contudo, têm sido realizados diversos estudos nos últimos anos sobre o reforço de estruturas de betão armado com sistemas CFRP com o intuito de minorar as roturas

prematuras do sistema e a diminuição de ductilidade das mesmas, bem como avaliar soluções de proteção dos FRP ao fogo.

1.2- Objetivos

Constitui um objetivo deste trabalho estudar o comportamento dos materiais compósitos quando sujeitos à ação do fogo, em particular os materiais compósitos à base de fibras de carbono (CFRP). Para tal, é apresentada uma campanha de ensaios com amostras de provetes de betão, utilizando o método de ensaio preconizado na norma EN ISO 13927 (2003). A manta e o laminado de CFRP é colada com resina epoxídica na superfície dos provetes exposta à ação térmica.

A superfície do sistema de reforço é exposta à ação de diferentes fluxos de calor por radiação: 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], provenientes de um calorímetro de perda de massa e a evolução da temperatura é determinada através de termopares colocados entre as superfícies de ambos os materiais.

A influência dos sistemas passivos de proteção no comportamento ao fogo dos CFRP é analisada considerando como materiais de proteção as placas de gesso e a tinta intumescente. A evolução da temperatura das superfícies de contacto dos diferentes materiais é determinada para os dois fluxos de calor considerados permitindo uma análise da influência destes materiais de proteção na capacidade do reforço estrutural dos CFRP quando submetidos a elevadas temperaturas, [5].

1.3- Estrutura da tese

O trabalho realizado está estruturado em 6 capítulos.

No capítulo 1, é descrito o enquadramento do tema, os seus objetivos e a sua estrutura. No capítulo 2, é feita a introdução do tema, onde se fala dos sistemas de proteção ao fogo existentes (passivos e ativos), o comportamento ao fogo dos CFRP e dos sistemas passivo adotado neste trabalho.

No capítulo 3 é descrito o programa experimental, cuja assunto remete para a preparação das amostras mais os termopares, e a preparação dos sistemas de proteção (placa de gesso laminado e tinta intumescente).

No capítulo 4 é referente os ensaios experimentais e ao equipamento utilizado, calorímetro de perda de massa, na análise do comportamento ao fogo das amostras e dos ensaios realizados.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados experimentais.

Por fim no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e a possibilidade de desenvolvimentos futuros em relação ao tema abordado neste trabalho.

2- Estado do conhecimento

2.1- Introdução

Este capítulo apresenta o estado do conhecimento sobre os CFRP's e as suas formas comerciais. São apresentadas as vantagens e desvantagens do CFRP e do comportamento destes ao fogo, assim como uma descrição dos sistemas de proteção ao fogo que existem, sistemas ativos e sistemas passivos, tal como o método de aplicação, custo, dificuldade, vantagens e desvantagens desses sistemas.

São referidos os sistemas passivos adotados neste trabalho e realizada uma descrição das resinas existentes e a que melhor se adapta para a aplicação dos FRP's.

2.2- Estado do conhecimento

O FRP (*fibre reinforced polymer*) é constituído por uma matriz polimérica. Existem 3 grupos principais de FRP, que são: CFRP, GFRP e AFRP, respetivamente referente ao carbono, vidro e aramida.

Uma das primeiras aplicações de FRP foi o reforço de um casco de um barco, [7], sendo posteriormente utilizado em cobertura de radares, visto que tanto a indústria de defesa naval e indústria aeroespacial foram as primeiras industriais a se interessarem pelos materiais FRP, [8].

As fibras de carbono começaram a ser produzidas na década de 60, contudo o seu elevado preço restringe a sua aplicabilidade a várias áreas além da espacial e aviação militar. Um dos principais utilizadores e da aplicação dos FRP foi a indústria petrolífera, no final da década de 40, [3].

A utilização de FRP por parte da indústria da construção surgiu nas décadas de 50 e 60, em que durante esse período de tempo surgiram 70 edifícios protótipos que incorporavam FRP na sua constituição, [3].

Os primeiros edifícios construídos usando FRP foram por exemplo, a Futuro House, a Monsanto House of the Future e a Icoshedron Classroom. Razões económicas, a

insuficiente informação técnica e a rejeição dos projetistas na aplicação destes materiais estiveram na base de que os edifícios construídos a seguir não tivessem uma grande utilização destes materiais, [9].

No início da década de 50 a indústria automóvel introduziu os materiais compósitos e na década de 70 passou a ser a principal utilizadora de materiais CFRP, [7], à frente da indústria naval.

Os primeiros materiais compósitos avançados (como o carbono e a aramida que são constituídos por fibras com elevado módulo de elasticidade e elevada resistência) surgiram cerca de 10 anos depois do início da utilização dos materiais FRP na indústria automóvel. Estes compósitos avançados foram criados devido às exigências da exploração espacial e do transporte aéreo. O seu custo elevado remetia a que a sua aplicação ficasse apenas na indústria aeroespacial e à militar, [9].

Devido à crise energética na década de 70, os materiais ficaram mais económicos e fez com que a sua aplicabilidade se expandisse a mais indústrias. Na década de 80 os custos de produção das fibras de carbono foram reduzidos graças aos novos processos de fabrico entretanto desenvolvidos. O desenvolvimento tecnológico ocorrido entre os finais da década de 80 e princípios da década de 90 permitiu com que os custos de produção do FRP fossem menores. Esse desenvolvimento aconteceu sobretudo no processo de fabrico (processo de pultrusão) e no nível tecnológico empregado no FRP.

Com base nessa redução de custos esses materiais compósitos puderam ser utilizados na renovação das infra-estruturas (rodoviárias) que nessa altura já tinham uma grande necessidade de melhoramento.

O desenvolvimento de alguns projetos-piloto e o aumento do estudo a nível de investigação desses materiais fez com que ao nível da construção houvesse um aumento significativo na sua utilização.

2.3- Formas comerciais dos FRP

No setor da construção os materiais FRP estão divididos em dois grupos. Existe o grupo dos elementos à flexão e os elementos à tração.

Os elementos à flexão são os painéis alveolares e os perfis, enquanto os elementos à tração são por exemplo os cabos, as mantas, os laminados e as barras/varões, [10].

Laminados

Os laminados FRP, Figura 1, têm uma grande resistência e normalmente são utilizados como elementos de reforço que funcionam à tração, sendo que possuem uma maior capacidade resistente que o aço [11, 12]. Os laminados também podem ser utilizados para reforço à flexão e/ou ao corte de elementos estruturais.

Os laminados de FRP são um dos exemplos de reforço à flexão pois ao serem colados à face interior de uma viga a capacidade resistente dessa viga aumenta consideravelmente. Os laminados de FRP permitem reduzir o aparecimento de fissuras e a redução de flechas, tal como aumentar a resistência à flexão e ao corte.

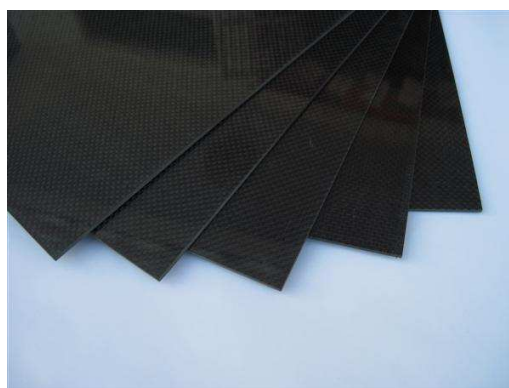


Figura 1- Laminado CFRP.

Mantas

As mantas de FRP, Figura 2, têm sido usadas para o reforço e reparação de pontes em madeira, betão armado e metálicas. Tal como os laminados, as mantas são utilizadas no reforço exterior de elementos estruturais.

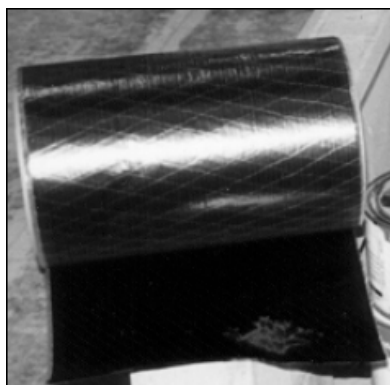


Figura 2- Manta CFRP.

Barras/Varões

Os varões de FRP, Figura 3, são constituídos por fibras contínuas envolvidas por uma matriz polimérica (viniléster ou epoxida) e dispostos longitudinalmente. Normalmente as fibras que constituem os varões FRP são de aramida, de vidro ou de carbono.

Na construção os varões que são mais utilizados têm na sua constituição resina de viniléster e fibras de vidro. O diâmetro usualmente comercializado varia entre os 4 mm até 80 mm.



Figura 3- Varões CFRP, [13].

2.4- Vantagens e desvantagens dos CFRP

As principais vantagens dos sistemas FRP são o aumento de resistência à flexão, ao corte, confinamento do betão comprimido, redução da deformação, controlo da abertura de fendas, elevada razão resistência/peso, geometricamente flexível, espessura reduzida e imune à corrosão, [14].

As principais desvantagens dos sistemas FRP são materiais sem patamar de cedência, ou seja têm uma rotura frágil, o custo do material é elevado, tem resistência ao fogo muito deficiente, sofre envelhecimento exposto aos raios ultravioleta e em Portugal ainda é um material pouco conhecido, as propriedades variam muito em função do volume de fibras, tipo de resina, tipo e orientação das fibras, processo de fabrico e cura e requer mão-de-obra e conhecimentos técnicos específicos, [14].

2.5- Comportamento dos CFRP ao fogo

O comportamento destes materiais a temperaturas elevadas continua a ser um dos grandes entraves à sua total afirmação como material de reforço. Quando a temperatura atinge a temperatura de transição vítrea, o material do sistema de reforço mais suscetível de falhar é a resina de colagem. Esta passa de um estado vítreo para um estado viscoso, comprometendo toda a resistência do sistema de reforço e colocando em causa a segurança do elemento a reforçar, bem como da estrutura em que se engloba. Estas características levam a uma preocupação legítima do comportamento destes sistemas em situação de incêndio. No entanto, até à data, ainda não foram produzidos estudos suficientes que expliquem o comportamento destes sistemas em situação de incêndio, [15].

Este facto é comprovável pelas verificações de segurança ao incêndio dos diversos regulamentos e normas, que aconselham a desprezar o reforço estrutural em CFRP na resistência total do elemento, exceto nos casos em que se elaborem estudos que comprovem que com a aplicação de sistemas de proteção ao fogo a temperatura de transição vítrea do material mais suscetível não é atingida, [15].

O comportamento ao fogo de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP e o desenvolvimento de sistemas de proteção tem vindo a ser identificado pela comunidade científica internacional como temas que necessitam de ser estudados com maior detalhe, [15].

2.6- Sistemas de proteção dos CFRP ao fogo

Todos os componentes presentes num sistema de reforço CFRP são altamente sensíveis à temperatura. Estando o seu funcionamento condicionado pela temperatura de transição vítrea do adesivo de colagem (aproximadamente 50 [°C]) e, uma vez que essas temperaturas são atingidas em poucos instantes durante um incêndio, de modo a prolongar o funcionamento do sistema de reforço é essencial a proteção destes elementos. Para tal, podem-se aplicar dois tipos de sistemas de proteção ao fogo, os sistemas ativos e os sistemas passivos, [15].

2.6.1- Sistemas ativos

Os sistemas ativos de proteção ao fogo são sistemas que requerem a intervenção humana ou de um mecanismo automatizado que responda ao incêndio ou aos fenómenos causados por este. Estes sistemas têm a função de extinguir o fogo e ajudar na dissipação de calor, isto permite com que as pessoas que estejam no edifício possam ter mais tempo para evacuarem o edifício em segurança.

Estes sistemas não se limitam só a equipamentos de ventilação e extinção de fogo, sendo os sistemas de sinalização e alarme de emergência também considerados sistemas de proteção ativos. O sistema de proteção ativo mais utilizado no combate a incêndios é o sistema de aspersão (sprinklers), em que uma tubagem em carga no teto do piso é acionada pela alta temperatura que permite a aspersão de água de pequenos bocais e a consequente extinção do incêndio, [2, 15, 16].

2.6.2- Sistemas passivos

Ao contrário dos sistemas ativos, os sistemas de proteção passivos, não necessitam de um mecanismo automatizado nem de uma intervenção humana para estarem funcionais. Este tipo de proteção baseia-se na prevenção da ignição do material combustível, limitando o desenvolvimento do fogo. Este tipo de proteção baseia-se no isolamento dos elementos estruturais de um edifício bem como na criação de compartimentos antifogo, na aplicação de portas e revestimentos antifogo, [2, 15, 16].

Embora estes sistemas tenham designações e funções diferentes, podem ser utilizados em conjunto, sendo que a aplicação de um não invalida a aplicação do outro. No entanto, na aplicação de sistemas de proteção para sistemas de reforço de estruturas com CFRP, os sistemas mais utilizados são os passivos. Isto deve-se ao facto destes permitirem uma proteção mais localizada, aplicada apenas nos elementos reforçados, ao contrário dos sistemas ativos (sprinklers) que são aplicados em grande extensão ou na totalidade de um piso, [15].

2.6.2.1- Revestimentos Intumescentes

Os revestimentos intumescentes já estão estabelecidos como meio de proteção a estruturas metálicas há alguns anos, permitindo incrementos no tempo de rotura de 30 a 120 minutos. No entanto, nos últimos anos, tem-se estudado a viabilidade destes revestimentos como material de proteção ao fogo também em elementos estruturais FRP [2].

Estes revestimentos são aplicados, normalmente, sobre a forma de tinta, podendo atingir uma espessura máxima de 5 [mm]. Se for necessário aplicar espessuras superiores de material intumescente, poderá utilizar-se revestimentos intumescente na forma de gel, mantas ou tecidos (até 15 [mm]), [2]. Estes revestimentos são formados com diversos componentes ativos que, quando expostos a elevadas temperaturas, reagem, expandindo. Esta expansão, que pode ir até 50 vezes o volume inicial, cria uma estrutura multicelular de origem carbonosa, cuja função é diminuir a velocidade com que o calor chega ao substrato, do elemento a proteger, [2, 15, 17]. Na figura seguinte é possível observar o processo de expansão da tinta quando sujeita ao fogo, [15].



Figura 4- Tinta intumescente sob ação do fogo.

A aplicação dos revestimentos intumescentes está condicionada pelo facto de, regra geral, estes serem ativados (começarem a expandir-se) para valores de temperatura entre 100 [°C] e 300 [°C], enquanto o elemento mais frágil do sistema de reforço CFRP, o adesivo, apresenta valores de temperatura de transição vítrea entre 50 [°C] e 80 [°C]. Embora não sejam um método, só por si, muito útil para o fim em vista, a sua aplicação em simultâneo com outros revestimentos poderá ser benéfica, [15].

2.6.2.2- Revestimentos à base de Vermiculite e Perlite

Devido ao comportamento que as rochas de vermiculite e perlite apresentam quando sujeitas a temperaturas elevadas, elas tornam os revestimentos à base de agregados de vermiculite e perlite muito úteis.

Estes agregados têm propriedades que os permitem expandir, aumentando de volume, sendo o produto derivado da sua exposição ao fogo, um produto de baixa condutividade térmica.

A vermiculite é uma rocha vulcânica constituída por finas lâminas separadas por partículas de água microscópica. A partir destas partículas são criadas argamassas que podem ser aplicadas por projeção ou por espátula. No entanto, a primeira técnica é a mais comum, uma vez que proporciona melhor aderência ao substrato. É ainda possível a criação de placas de vermiculite, embora dada a sua dificuldade de produção, as mesmas quase nunca sejam utilizadas, [15, 17, 18].



Figura 5- Placas de vermiculite e aplicação de vermiculite por projeção, [19].

Numa primeira fase de exposição ao incêndio, a proteção deste material é conferida pela evaporação da água livre presente na argamassa, que é uma reação endotérmica. Após este fenómeno, para temperaturas entre 700 [°C] e 1000 [°C], a água de constituição é transformada em vapor através de reações endotérmicas que separam as lâminas de vermiculite, causando a expansão do material até 30 vezes o seu volume inicial num processo denominado por “esfoliação”. Após a evaporação de toda a água de constituição, a proteção é conferida pelas propriedades de isolamento intrínsecas à própria argamassa, [2, 15, 17].

A perlite é uma rocha siliciosa amorfa que incorpora na sua constituição uma quantidade considerável de água (2 a 6 [%]) e que também pode ser utilizada para produzir argamassas de proteção ao fogo. O seu comportamento é bastante semelhante ao da vermiculite. Quando atinge temperaturas elevadas, da ordem de 850 [°C] a 900 [°C], a água de constituição evapora, provocando a expansão do material até 20 vezes o volume inicial. A perlite pode ser misturada com a vermiculite para produzir argamassas de proteção ao fogo, que geralmente também são aplicadas por projeção [15, 17, 18].

As principais características das argamassas à base de vermiculite e perlite podem ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 1- Propriedades das argamassas de vermiculite e perlite (Adaptado de [18]).

Propriedades	Argamassa Vermiculite	Argamassa Perlite
Massa Volúmica (kg/m ³)	300 – 900	300 – 500
Calor específico (J/(kg °C))	Aprox. 920	Aprox. 700
Condutibilidade térmica (W/(m °C))	0.06 - 0.17	0.06 - 0.17

2.6.2.3- Placas de gesso

O gesso é uma substância à base de sulfato de cálcio, que no estado seco contém cerca de 20 [%] de água cristalizada, produzida a partir do mineral gipsita, composto de sulfato de cálcio hidratado. Devido à sua facilidade em absorver água, mantém a humidade do ar em áreas fechadas, além de apresentar isolamento térmico e um modesto

isolamento acústico. A comercialização pode ser feita em placas, às quais é adicionada fibra de vidro, e, em alguns casos, vermiculite, como suporte na utilização, evitando a sua desagregação. O gesso da placa perde moléculas de água de hidratação durante o aquecimento, mantendo baixa a do substrato, [15, 19].

Quando as placas de gesso são aquecidas, ocorrem duas reações de desidratação: a primeira, para temperaturas entre 100 [°C] e 120 [°C], com o sulfato de cálcio di-hidratado a ser convertido em sulfato de cálcio hemi-hidratado; e a segunda, entre 210 [°C] e 300 [°C], em que o sulfato de cálcio hemi-hidratado é transformado em sulfato de cálcio anidro. Estas reações de carácter endotérmico utilizam a energia transmitida pelo incêndio e retardam o aumento de temperatura do elemento estrutural onde está aplicado o gesso. Refira-se que após estas reações as propriedades mecânicas do gesso sofrem uma degradação assinalável, pelo que a incorporação de fibras que melhorem esse comportamento é essencial para garantir a sua integridade, [15, 17, 18].

O tipo de fixação das placas é, geralmente, mecânico com recurso a aparafusamento. Estas fixações deverão apresentar elevada resistência a temperaturas altas para que a rotura do sistema de proteção se dê pelo próprio sistema (placas de gesso) ao invés do sistema de fixação. Outro método de aplicação do material gesso como material protetor ao fogo do sistema de reforço FRP é o de espalhamento, não sendo tão habitual, por implicar um manuseamento mais difícil e com acabamentos piores em relação às placas. Na tabela seguinte apresentam-se as principais propriedades deste material, [15].

Tabela 2- Propriedades das placas de gesso (Adaptado de [18])

Propriedades	Placas de gesso
Massa Volúmica (kg/m ³)	800
Calor específico (J/(kg °C))	Aprox. 1700
Condutibilidade térmica (W/(m °C))	0.19 – 0.24

2.6.2.4- Placas de silicato de cálcio

As placas de silicato de cálcio apresentam muitas semelhanças físicas e comportamentais com as placas de gesso. Nestas placas, a aplicação também é feita com recurso a fixação mecânica, por aparafusamento ou por colagem. Embora sejam mais caras que as placas de gesso, o seu poder isolante é superior. No entanto, para aplicações onde seja necessário um sistema de proteção com alguma resistência mecânica, estas são as adotadas uma vez que têm resistência mecânica superior às placas de gesso, embora ambas apresentem um comportamento rígido com rotura frágil. O facto de serem submetidas a um processo de autoclave com incorporação de fibras no interior das placas garante uma estabilidade dimensional quando sujeitas a temperaturas elevadas [15, 17, 18].

A proteção ao fogo conferida pelas placas de silicato de cálcio, que tipicamente incorporam 3 [%] a 5 [%] de água, deve-se à sua capacidade de isolamento térmico, mas também a uma série de reações endotérmicas que ocorrem em vários intervalos de temperaturas. Numa primeira fase, quando se atinge 100 [°C], ocorre a evaporação de água livre; seguidamente, entre 100 [°C] e 400 [°C], dá-se a desidratação do silicato de cálcio; entre 400 [°C] e 600 [°C] ocorrem as reações de desidratação do hidróxido de cálcio; e, finalmente, para temperaturas entre 600 [°C] e 1000 [°C], ocorre a descarbonização do carbonato de cálcio, [15, 17].

Na tabela 3 identificam-se as principais propriedades das placas de silicato de cálcio sendo estas propriedades médias das placas de silicato de cálcio presentes no mercado.

Tabela 3- Propriedades das placas de silicato de cálcio (Adaptado de [18]).

Propriedades	Placas de silicato de cálcio
Massa Volúmica (kg/m ³)	500 – 800
Calor específico (J/(kg °C))	690
Condutibilidade térmica (W/(m °C))	0.16

2.6.2.5- Projeção de fibras minerais

As fibras minerais podem ser utilizadas como principal constituinte de argamassas para proteção de elementos estruturais ao fogo. As fibras são normalmente obtidas a partir de rocha basáltica, sendo corrente a junção de escória de alto-forno (20 a 30 [%] do peso total) com o objetivo de diminuir a massa volúmica da argamassa. A proteção é conferida pelas propriedades isolantes das próprias fibras, pois, ao contrário dos materiais referidos nos pontos anteriores, a quantidade de água de constituição das fibras projetadas é praticamente desprezável no comportamento deste isolamento a temperaturas elevadas, [15, 19].

A projeção de fibras minerais é habitualmente aplicada por projeção a baixa pressão (Figura 6). Embora seja de fácil aplicação, de custos reduzidos e permita a proteção de elementos de geometria irregular, produz bastante desperdício e a superfície de acabamento é irregular. Deste modo, não é aconselhável a aplicação deste método em elementos à vista, [15, 17].



Figura 6- Projeção de fibras cerâmicas [20].

Na tabela seguinte identificam-se as principais propriedades deste revestimento.

Tabela 4- Propriedades das fibras minerais (Adaptado de [18]).

Propriedades	Fibras minerais
Massa Volúmica (kg/m ³)	180 – 350
Calor específico (J/(kg °C))	1000
Condutibilidade térmica (W/(m °C))	0.08 – 0.10

2.6.2.6- Mantas de fibras cerâmicas e Placas de lã de rocha

As mantas de fibras cerâmicas são compostas por fibras de sílica e alumina. Estas fibras são dispostas em várias direções, sendo entrelaçadas entre si. O facto de estarem dispostas nas condições referidas confere-lhes uma grande flexibilidade e resistência mecânica nas várias direções em que se apliquem. Embora sejam incombustíveis, não resistem a temperaturas superiores a 1300 [°C], sendo que para valores superiores de temperatura as suas propriedades isolantes degradam-se rapidamente e as próprias fibras começam a desintegrar-se [15, 17, 18] .

Estas mantas apresentam-se sobre a forma de rolos com espessuras que podem variar de 10 [mm] a 50 [mm]. A sua fixação ao suporte é realizada com o auxílio de fixações mecânicas, parafusos, agrafos ou pontos de cola. Pelo facto de estas apresentarem alguma fragilidade à humidade, que as pode degradar, é necessário aplicar-lhes um tratamento superficial que sirva de barreira à água e humidade [15].

As placas de lã de rocha são produzidas a partir de rocha basáltica. As fibras que as constituem são dispostas de forma aleatória, procedendo-se depois à sua aglomeração através de resinas termoendurecíveis. Tal como as mantas de fibras cerâmicas e outros revestimentos já referidos, são aplicadas com recurso a fixações mecânicas. Na tabela seguinte indicam-se as propriedades termo-físicas destes revestimentos [15].

Tabela 5- Propriedades das mantas de fibras cerâmicas e placas de lã de rocha (Adaptado de [18], [21]).

Propriedades	Mantas de fibras cerâmicas	Placas de lã de rocha
Massa Volúmica (kg/m ³)	64 – 192	300
Calor específico (J/(kg °C))	Aprox. 1000	1200
Condutibilidade térmica (W/(m °C))	0.10 – 0.25	0.12

2.7- Resinas

As resinas dividem-se em dois grandes grupos, de acordo com o tipo de ligação entre as cadeias poliméricas quando o polímero se encontra no estado sólido: as resinas termoendurecíveis e as resinas termoplásticas.

As resinas termoendurecíveis, nas quais se incluem o poliéster, o viniléster, as epoxídicas e as fenólicas, possuem uma estrutura molecular de polimerização irreversível, formada através de reticulação. Como consequência do seu processo de cura irreversível, estas resinas não podem ser fundidas novamente, como acontece com os termoplásticos. As principais vantagens associadas a estas resinas são a reduzida viscosidade, a boa capacidade de impregnação das fibras e as boas propriedades de adesão [19, 22].

As resinas termoplásticas, nomeadamente o poliuretano, a poliamida, o polietileno e o polibutileno, não sofrem qualquer transformação química e não apresentam ligações cruzadas entre as suas cadeias poliméricas, estando apenas ligadas por forças de *Van der Waals* ou por pontes de hidrogénio. Estas resinas, quando sujeitas a temperaturas elevadas, fundem-se assumindo formas específicas neste estado, o que torna possível o seu reprocessamento sem que ocorra uma perda significativa das suas propriedades [9, 23]. As principais vantagens destas resinas são a facilidade de armazenamento, não necessitando de refrigeração, e a possibilidade de reciclagem e reprocessamento por não formarem uma estrutura irreversível. Apesar das vantagens já descritas das resinas termoplásticas, estas apresentam fracas capacidades de impregnação das fibras e de adesão às mesmas, assim como um processamento dificultado pela elevada viscosidade da resina [22].

As resinas termoendurecíveis de poliéster insaturado são as mais usuais no fabrico dos materiais FRP pelo facto de apresentarem um custo relativamente reduzido, uma boa capacidade de impregnação das fibras e uma viscosidade inferior à das resinas termoplásticas, o que facilita o seu processamento [9, 22].

As resinas do tipo epóxido são as mais utilizadas no reforço de estruturas em engenharia civil, quer como matriz do compósito FRP, quer como adesivo de colagem. Estas apresentam diversas vantagens em relação às restantes resinas disponíveis no mercado destacando-se as seguintes:

- Boas propriedades de aderência a uma grande variedade de substratos com elevada resistência coesiva;
- Podem ser endurecidas pela inclusão de borracha;
- Menor retração, quando comparadas com resinas de poliéster, acrílicas e vinílicas, permitindo a ligação de grandes áreas apenas com pressão de contacto entre o compósito e o elemento a reforçar;
- Menor fluência e conservação da resistência sob cargas permanentes;
- Boa adaptação a superfícies irregulares;
- Podem ser consideradas tixotrópicas para a aplicação em superfícies verticais.

Na tabela seguinte apresentam-se algumas características e propriedades das resinas epóxicas correntemente comercializadas.

Tabela 6- Propriedades gerais de adesivos epoxy.

Propriedades	Unidades	Intervalo de valores
Resistência à tração	MPa	9 – 55
Resistência à compressão	MPa	55 – 120
Resistência ao corte	MPa	10 – 30
Tensão de aderência ao betão por tração	MPa	2 – 8
Módulo de elasticidade	GPa	0.5 – 20.0
Módulo de distorção	GPa	0.2 – 8.0
Coefficiente de Poisson	-	0.3
Extensão na rotura	%	0.5 – 5.0
Massa volúmica	g/cm ³	1.1 – 1.7
Temperatura de transição vítreá	°C	40 - 80

3- Programa Experimental

3.1- Preparação dos provetes

Neste capítulo é descrito o programa experimental elaborado para o presente trabalho onde se pretende analisar e estudar o comportamento dos CFRP quando submetidos a uma fonte de calor (fogo). Previamente foram construídos provetes de betão de dimensões 100×100×40 [mm]. Os provetes foram reforçados quer com manta quer com laminado de CFRP. Para os ensaios com manta foram feitos 10 provetes de betão e para os ensaios com o laminado também foram feitos 10 provetes.

Os provetes de betão foram realizados em moldes de madeira, Figura 7. A Figura 8 apresenta os provetes de betão depois de secos.



Figura 7 – Moldes de betão.



Figura 8 – Provetes de betão.

3.2- Colagem da manta de CFRP

A superfície dos provetes foi tratada para se poder colar a manta e o laminado, para tal foi utilizada uma lixadeira elétrica para polir a superfície e assim eliminar algumas saliências ou rugosidades que se encontrassem no provete, Figura 9. Seguidamente o pó depositado nos provetes foi retirado com ar comprimido.



Figura 9 – Polimento da superfície de betão.

A manta e o laminado foram fixados aos provetes de betão por intermédio de uma cola epoxídica, fornecida pela empresa S&P (Figura 10) em dois componentes A+B, na razão de 2/1 segundo a nota técnica do fabricante, sendo o componente A constituído por resina epoxídica e o componente B pelo acelerador de endurecimento da resina.



Figura 10 – Resina epoxídica.

Em primeiro lugar começou-se com uma demão de resina na superfície do provete, Figura 11, em seguida aplicou-se resina na manta, Figura 12, depois a manta foi colada no provete, Figura 13 e por último termina-se com outra demão de resina no CFRP, Figura 14. Após a aplicação da resina nos provetes, Figura 15, deixaram-se repousar os provetes durante 7 dias de maneira a conseguir uma secagem apropriada e resistente, Figura 16.



Figura 11 – 1ª demão de resina no provete.



Figura 12 – Aplicação da resina na manta de CFRP.



Figura 13 – Colagem da manta.



Figura 14 – Última demão na manta.



Figura 15 – Manta de CFRP.

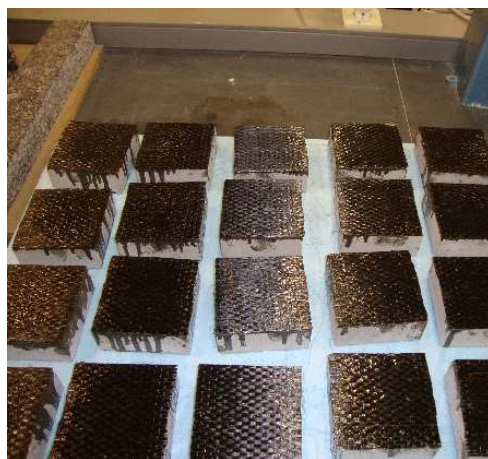


Figura 16 – Provete de betão com manta CFRP.

3.3- Colagem do laminado de CFRP

A colagem do laminado de CFRP é em tudo semelhante à colagem da manta de CFRP, apesar das suas estruturas serem diferentes, visto o laminado CFRP ser um material rígido ao contrário da manta de CFRP.

O laminado de CFRP foi fornecido em rolo rígido em que a sua largura era de 12 cm e o comprimento de 6 [m]. Tal como para a manta foram recortados 10 pedaços de laminado com 100×100 [mm].

Para a colagem do laminado de CFRP o provete de betão tem de ser igualmente polido e tratado, para uma melhor aderência do material.

Depois de polida a superfície a colar e de ter as peças de laminado cortadas, fez-se a colagem e tal como para a colagem da manta de CFRP, em primeiro lugar passou-se uma demão de resina epoxídica na superfície do betão, em seguida a resina epoxídica foi passada no laminado de CFRP e colocado no provete de betão.

A única diferença entre a colagem da manta de CFRP e a do laminado de CFRP é que em relação à manta de CFRP após a colagem no provete de betão foi passada mais uma demão na parte superior da manta, no laminado não é necessária este passo.

Os provetes com o laminado de CFRP foram deixados a repousar por 7 dias de maneira a garantir uma boa secagem da resina epoxídica.

3.4 – Sistemas de proteção

Os sistemas de proteção que foram aplicados neste trabalho são sistemas passivos de segurança ao fogo. Os sistemas de proteção para segurança ao fogo devem possuir baixa condutividade térmica, elevado calor específico e ter um peso volúmico baixo, de maneira a não apresentarem um acréscimo de carga significativo no elemento. Os sistemas passivos de segurança ao fogo têm como objetivo prevenir a ignição do material ao fogo mediante a redução de calor, fumo e gases tóxicos libertados pelo FRP. Este trabalho remete essencialmente para estudo da eficácia de dois materiais de proteção contra o fogo: tinta intumescente e placas de gesso.

3.4.1 – Tinta Intumescente

A tinta intumescente utilizada foi uma tinta para proteção ao fogo (Interchar 1160), [24], com cor branca e acabamento mate, Figura 17. Este tipo de tinta intumescente é aplicado para proteção de estruturas metálicas. A tinta Interchar é uma tinta de base aquosa que permite tempos de proteção na ordem dos 60 min, apresentando uma massa específica de aproximadamente $1400 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. A tinta pode ser aplicada de diversas maneiras tais como airless, rolo, pistola convencional ou trincha, neste trabalho a tinta foi aplicada usando uma trincha, Figura 18. Para uma melhor avaliação da proteção ao fogo por parte da tinta intumescente foram realizados ensaios com 3 espessuras: 0.5 [mm], 1 [mm] e 2 [mm], Figura 19. A medição da espessura é feita com o auxílio de uma régua. A tinta utilizada na realização deste trabalho foi fornecida pela empresa *International*.



Figura 17 – Tinta Intumescente Interchar 1160.



Figura 18 – Aplicação da tinta com trincha.



Figura 19 – Espessura da tinta intumescente.

As principais vantagens da tinta intumescente são: facilidade na manutenção/limpeza, arquitetura permanece aparente, é leve e fino, tem uma boa otimização do espaço da construção, permite um acabamento da cor desejado, não retém sujeira e tem um TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo) até 120 minutos. As principais desvantagens da tinta são: requer aplicadores qualificados, necessita de uma verificação da qualidade de aplicação e tem um tempo maior de secagem.

3.4.2 – Placa de gesso laminado

As placas de gesso utilizadas para este trabalho são constituídas por duas lâminas de papel de gesso de alta qualidade no interior, reforçada com fibra de vidro para melhorar a reação ao fogo da alma de gesso. Estas placas de gesso são adequadas para zonas que necessitem de uma alta resistência ao fogo. As placas de gesso foram fornecidas pela empresa *Reconco* em Bragança, e são fabricadas pela empresa *Gyptec Ibérica* [25]. A placa de gesso é aplicada na superfície superior do provete de betão que tem a manta de CFRP, Figura 20. A placa de gesso é posicionada por cima do laminado/manta e depois é protegido por uma caixa de metal.



Figura 20 – Placa de gesso aplicada no provete.

As principais vantagens da placa de gesso são: rapidez na preparação e instalação, tem uma economia importante na sua utilização, tem um acabamento final perfeito e permite paredes mais finas. As principais desvantagens são: não é tão sólido como o tradicional tijolo e o cimento e necessita de maior cuidado na fixação de objetos.

4- Testes experimentais do comportamento dos CFRP a temperaturas elevadas

4.1- Calorímetro de perda de massa

Os ensaios experimentais foram realizados num calorímetro de perda de massa (Figura 21). Este aparelho possui uma balança de alta precisão permitindo o registo da perda de massa da amostra ao longo do tempo, quando submetida a um determinado fluxo de calor por radiação.



Figura 21- Calorímetro de perda de massa.

Os testes realizados no calorímetro de perda de massa foram efetuados, com fluxos de calor de $35 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ e $75 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, em prismas de betão reforçados com manta e com laminado de CFRP colado na superfície sem proteção e com proteção (placa de gesso ou a tinta intumescente). O calorímetro de perda de massa foi calibrado para uma distância, entre a base inferior do cone e a superfície superior da amostra, de 25 [mm] . Para a análise da evolução da temperatura no CFRP com o tempo de exposição ao fluxo de radiação, foi utilizado um termopar, do tipo K, introduzido no provete de betão em contacto com a face inferior do CFRP colada à superfície do betão, [5], como apresentado na Figura 22.



Figura 22- Termopar do tipo K introduzido na base inferior do provete de betão.

Na Tabela 7 são apresentadas as diferentes séries de ensaio conduzidas e os diferentes sistemas de proteção bem como as designações adotadas. Foram ensaiados provetes colados com manta de CFRP, designados por S, enquanto os provetes colados com laminados de CFRP são designados por L. Os provetes sem proteção correspondem à série U; os provetes protegidos com a placa de gesso, com 4 [mm] de espessura, correspondem à série PB; a série IP corresponde aos provetes protegidos com tinta intumescente para as três espessuras ensaiadas: 0.5 [mm], 1.0 [mm] e 2.0 [mm]. Os valores 35 e 75 são referentes aos dois fluxos de calor considerados, [26].

Tabela 7- Séries de provetes ensaiados [26]

Séries experimentais	Designação dos provetes	Proteção ao fogo	Fluxo de calor (kW/m ²)
Série U	U-S-35	s/proteção	35
	U-S-75		75
	U-L-35		35
	U-L-75		75
Série PB	PB-S-35	placa de gesso	35
	PB-S-75		75
	PB-L-35		35
	PB-L-75		75
Série IP	IP-S-35-0.5	tinta intumescente	35
	IP-S-35-1.0		
	IP-S-35-2.0		
	IP-S-75-0.5		75
	IP-S-75-1.0		
	IP-S-75-2.0		
	IP-L-35-0.5		35
	IP-L-35-1.0		
	IP-L-35-2.0		
	IP-L-75-0.5		75
	IP-L-75-1.0		
	IP-L-75-2.0		

4.1.1 – Calibração do calorímetro

Antes de iniciar os ensaios, é necessário calibrar o calorímetro perda de massa, para garantir que não ocorra qualquer variação entre os ensaios e que estes sejam o mais homogêneos possíveis, ver anexo.

4.2- Provetes sem proteção

Os provetes reforçados com manta e com laminado de CFRP, sem qualquer proteção, tiveram um comportamento similar, ou seja, em ambos os provetes ocorreu ignição da resina epoxídica aplicada na colagem do CFRP, Figura 23. O tempo decorrido até à ignição foi de aproximadamente 4 min para o fluxo de calor de 35 [kW/m²], e de aproximadamente 1 min para o fluxo de calor de 75 [kW/m²]. Até à extinção da chama ocorreu libertação de fumo, Figura 24.

O aspeto final dos provetes reforçados com manta e com laminado de CFRP é apresentado nas Figuras 25 e 26, respetivamente, para um fluxo de calor de 35 [kW/m²]. Nas Figuras 27 e 28 apresenta-se o aspeto final dos provetes para um fluxo de calor de 75 [kW/m²]. Os provetes sujeitos ao maior fluxo de calor apresentam um aspeto mais deteriorado comparativamente aos provetes ensaiados para um menor fluxo de calor [5, 26, 27].

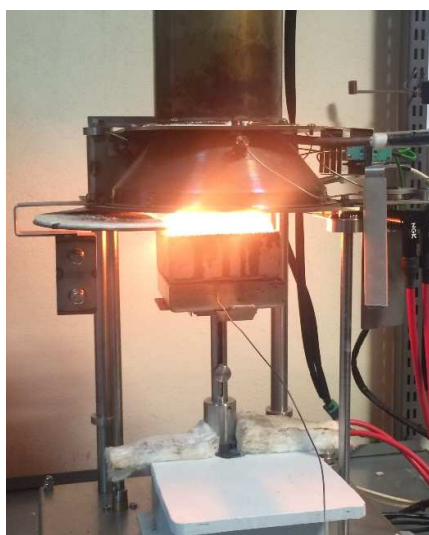


Figura 23 – Ignição da resina epoxídica.



Figura 24 – Extinção da chama e libertação de fumo.



Figura 25 – Provetes reforçados com mantas de CFRP, para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

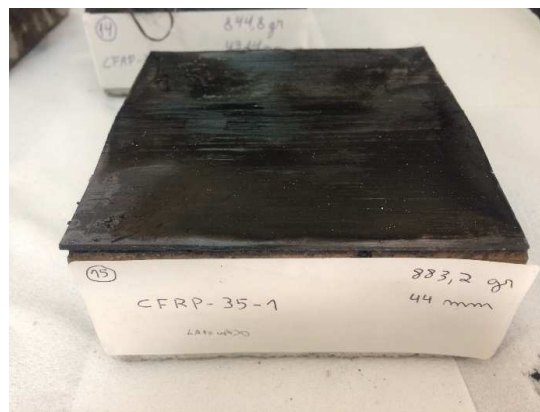


Figura 26 – Provetes reforçados com laminado de CFRP, para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].



Figura 27 – Provetes reforçados com mantas de CFRP, para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].



Figura 28 – Provetes reforçados com laminado de CFRP, para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

4.3- Provetes protegidos com placa de gesso

Os provetes de betão com manta e com laminado de CFRP colado na superfície e protegidos com placa de gesso laminado, de 4 [mm] de espessura, foram igualmente submetidos aos dois fluxos de calor considerados. Nestes ensaios, as temperaturas foram registadas através de dois termopares, do tipo K, sendo um deles inserido na face inferior do CFRP (T1), ver Figura 23 e o outro na face inferior da placa de gesso (T2), Figura 29. Não houve registo de ignição no decurso dos ensaios. O aspeto final dos provetes reforçados com manta e com laminado de CFRP e protegidos com placa de gesso é apresentado nas Figuras 30 e 31, para um fluxo de calor de 35 [kW/m²]. Nas Figuras 32 e 33 apresenta-se o aspeto final dos provetes para um fluxo de calor de 75 [kW/m²] [5, 26, 27].



Figura 29- Termopar na face inferior da placa de gesso.



Figura 30 – Provete reforçado com mantas de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 35 [kW/m²].



Figura 31 – Provete reforçado com laminado de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a fluxo de calor de 35 [kW/m²].



Figura 32 – Provete reforçado com mantas de CFRP, e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 75 [kW/m²].



Figura 33 – Provete reforçado com laminado de CFRP e protegido com placa de gesso, sujeito a um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

4.4- Provetes protegidos com tinta intumescente

Os provetes protegidos com tinta intumescente foram igualmente monitorizados com dois termopares do tipo K, sendo um deles inserido na face inferior do CFRP (T1), ver Figura 22 e o outro entre o CFRP e a tinta intumescente (T2) Figura 34 e 35, [26].



Figura 34 – Colocação do termopar.



Figura 35 – Pintura com a tinta intumescente.

Em todos os provetes houve registo de ignição no decurso do ensaio.

O aspeto final dos provetes reforçados com manta e protegidos com tinta intumescente, para as três espessuras e para um fluxo de calor de 35 [kW/m²] é apresentado na Figura 36. Na Figura 37 apresenta-se o aspeto final dos provetes com laminado de CFRP, para o mesmo fluxo de calor. Para um fluxo de calor de 75 [kW/m²] e para os provetes com manta e com laminado de CFRP. O aspeto final é apresentado nas Figuras 38 e 39, [26].



Figura 36 – Provetes reforçados com manta de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 35 [kW/m²].



Figura 37 – Provetes reforçados com laminado de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 35 [kW/m²].



Figura 38 – Provetes reforçados com manta de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 75 [kW/m²].



Figura 39 – Provetes reforçados com laminado de CFRP e protegidos com tinta intumescente, sujeitos a um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

As figuras apresentam um comportamento característico da decomposição oxidativa da camada intumescente, de cor branca, para esta intensidade do fluxo de calor e que não se verifica para o fluxo de calor mais reduzido. O aspeto final dos provetes reforçados com manta e com laminado é similar [26].

5- Resultados dos Testes Experimentais

Os resultados obtidos nos ensaios realizados no calorímetro de perda de massa são seguidamente apresentados, quer para os provetes sem proteção (U) como para os provetes protegidos com placa de gesso (PB) e com tinta intumescente (IP) de espessura 0.5 [mm] (IP-0.5), 1.0 [mm] (IP-1) e 2 [mm] (IP-2). A designação 35 e 75 refere-se aos provetes sujeitos a fluxos de calor de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], respetivamente. Os resultados dizem respeito aos valores registados no termopar colocado na superfície inferior do CFRP (T1). É feita igualmente a comparação entre os provetes reforçados com manta (S) e com laminado (L) de CFRP [26]. A leitura da evolução da temperatura para os gráficos analisados referem-se ao termopar T1.

5.1- Ensaio dos provetes sem proteção (U)

O gráfico 1 mostra a diferença entre os ensaios sem proteção com manta e os ensaios sem proteção com laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

Como se mostra no gráfico, o ensaio sem proteção com o laminado atingiu-se valores de temperatura mais baixo, cerca de 250 [°C] do que o ensaio sem proteção com a manta que atingiu uma temperatura final de cerca de 425 [°C].

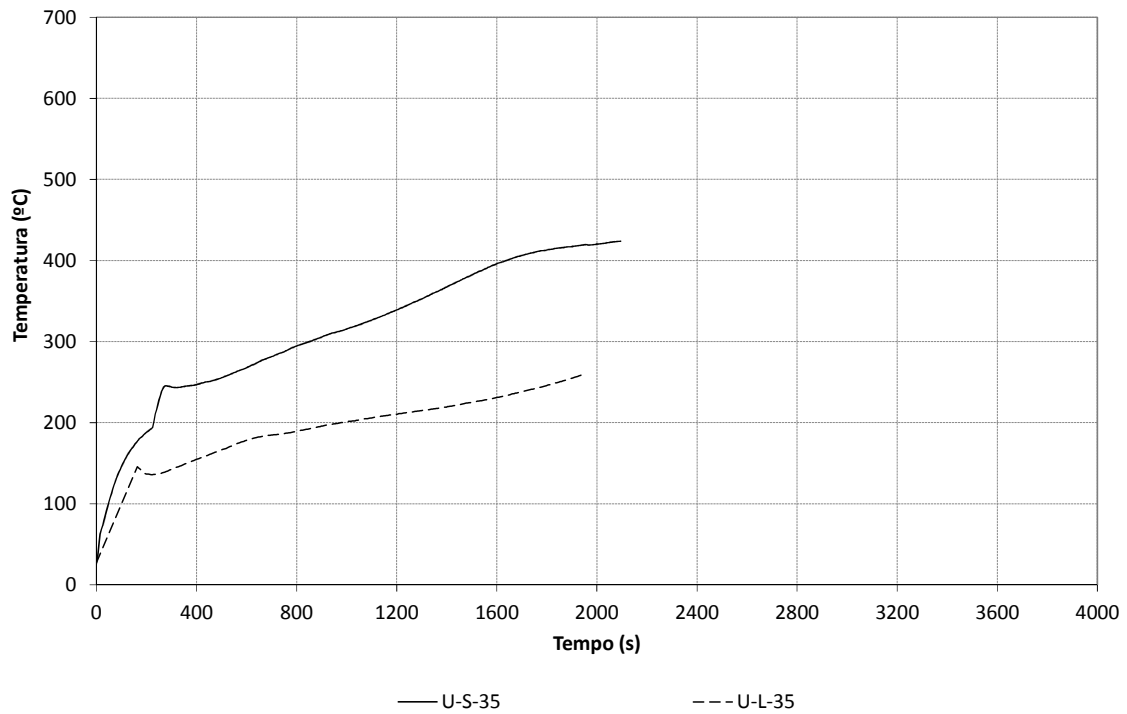


Gráfico 1- Comparação entre os ensaios sem proteção da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

No gráfico 2, mostra-se a comparação entre os ensaios sem proteção da manta e do laminado mas para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Como se pode ver no gráfico, o ensaio sem proteção com laminado atingi temperaturas mais baixas (550 [°C]) do que o ensaio sem proteção com manta (605 [°C]).

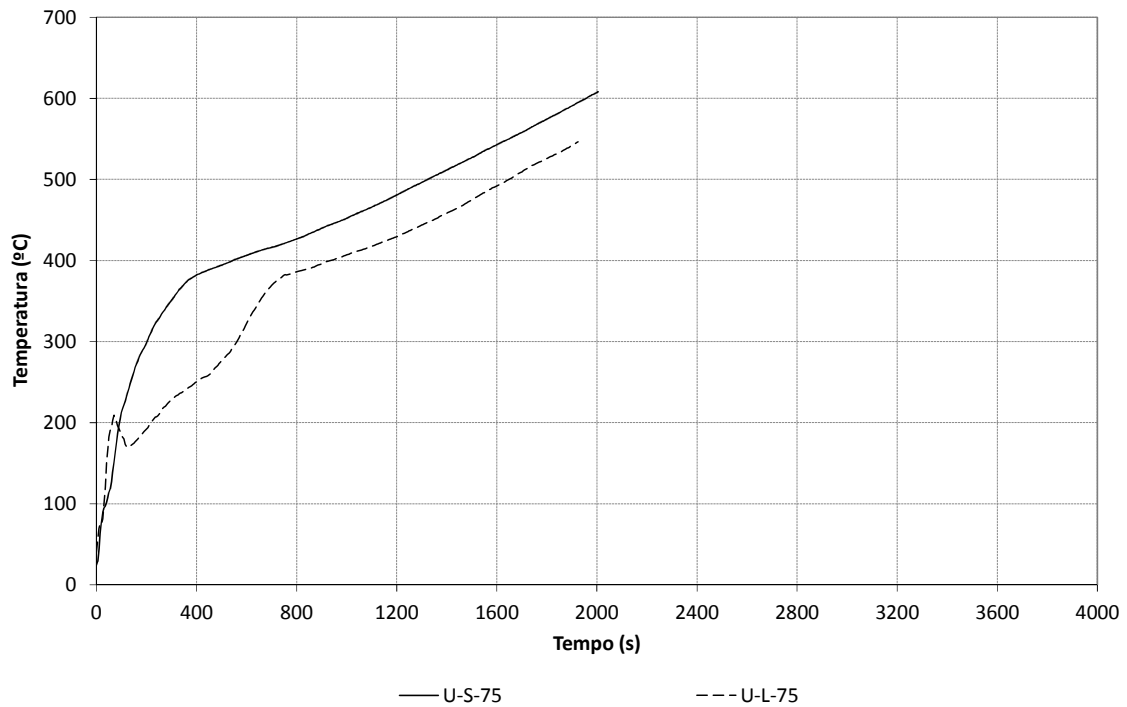


Gráfico 2- Comparação entre os ensaios sem proteção da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Os laminados tem maior capacidade de isolamento ao fogo em comparação à manta de CFRP.

5.2- Ensaios dos provetes protegidos com placa de gesso (PB)

Para os ensaios dos provetes protegidos com placa de gesso, reforçados com manta e laminado, são apresentados nos Gráfico 3 e 4 para os fluxos de calor de 35 [kW/m²] e de 75 [kW/m²], respetivamente.

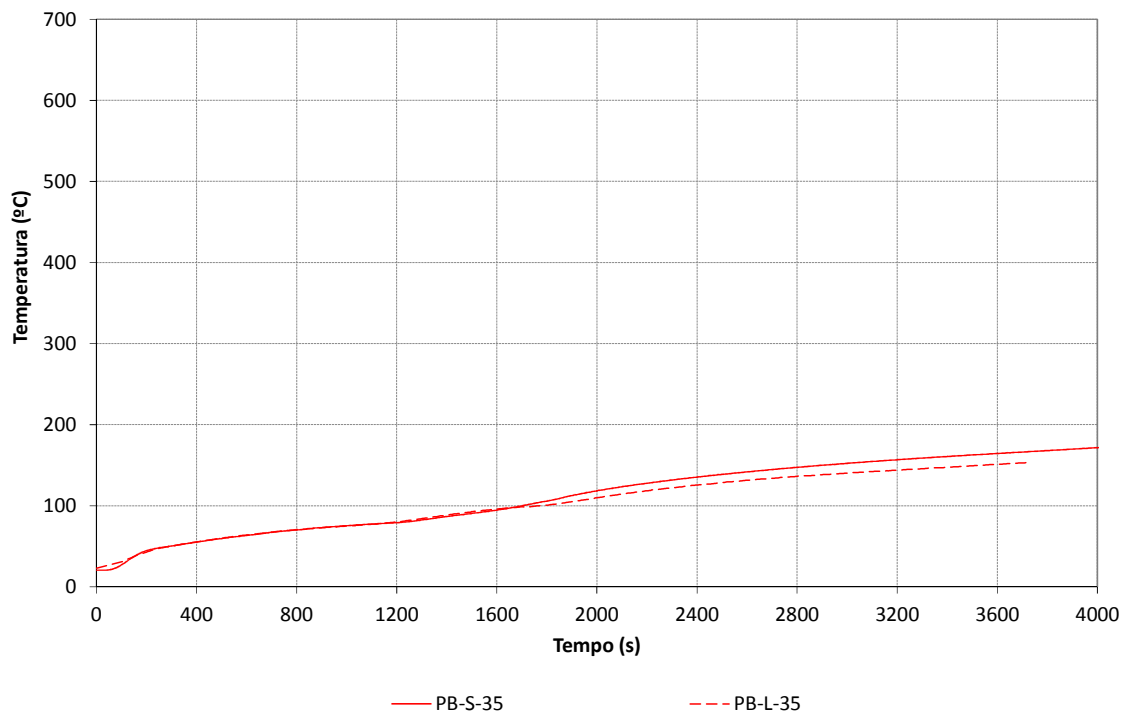


Gráfico 3- Comparação entre os ensaios com placa de gesso da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

O ensaio dos provete reforçados com laminado tiveram um comportamento melhor, atingiram temperaturas mais baixas (150 [°C]) que o ensaio de provetes reforçados com manta (175 [°C]), apesar de a diferença não ser relativamente grande.

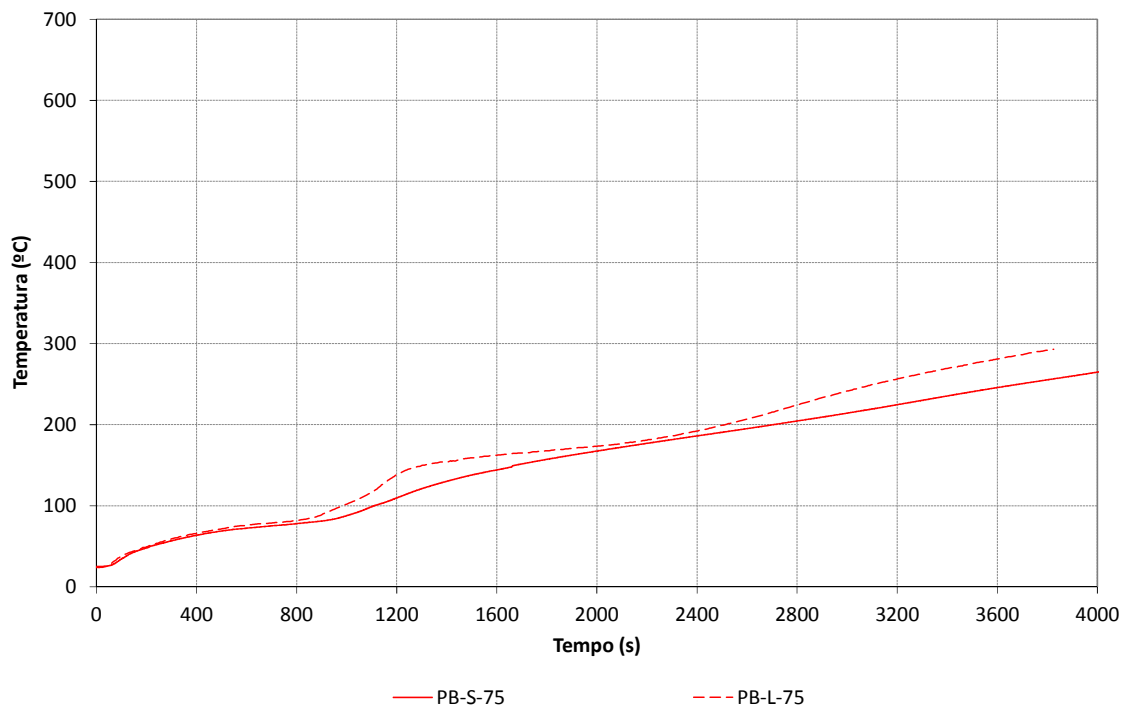


Gráfico 4- Comparação entre os ensaios com placa de gesso da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Como se pode verificar no ensaio dos provetes reforçados com manta atingiram menores temperaturas (250 [°C]) que para o laminado (280 [°C]), tendência inversa do que se tem registado.

5.3- Ensaios provetes com tinta intumescente (IP)

Para os ensaios com tinta intumescente para laminado e para a manta, o Gráfico 5 mostra a comparação entre os diferentes ensaios com as várias espessuras de tinta intumescente, para o fluxo de calor de 35 [kW/m²].

O gráfico 5 mostra que os ensaios com tinta intumescente com 2 [mm] de espessura quer para o laminado quer para a manta foram aqueles que tiveram as temperaturas mais baixas, atingindo os dois sensivelmente a mesma temperatura no fim dos ensaios (215 [°C]). Para os ensaios com tinta intumescente com 1 [mm] de espessura a manta foi aquela que obteve uma temperatura mais baixa (280 [°C]) em comparação com o laminado (300 [°C]). Os ensaios com tinta intumescente com 0.5 [mm] atingiram temperaturas muito semelhante quer para manta quer para o laminado (305 [°C]).

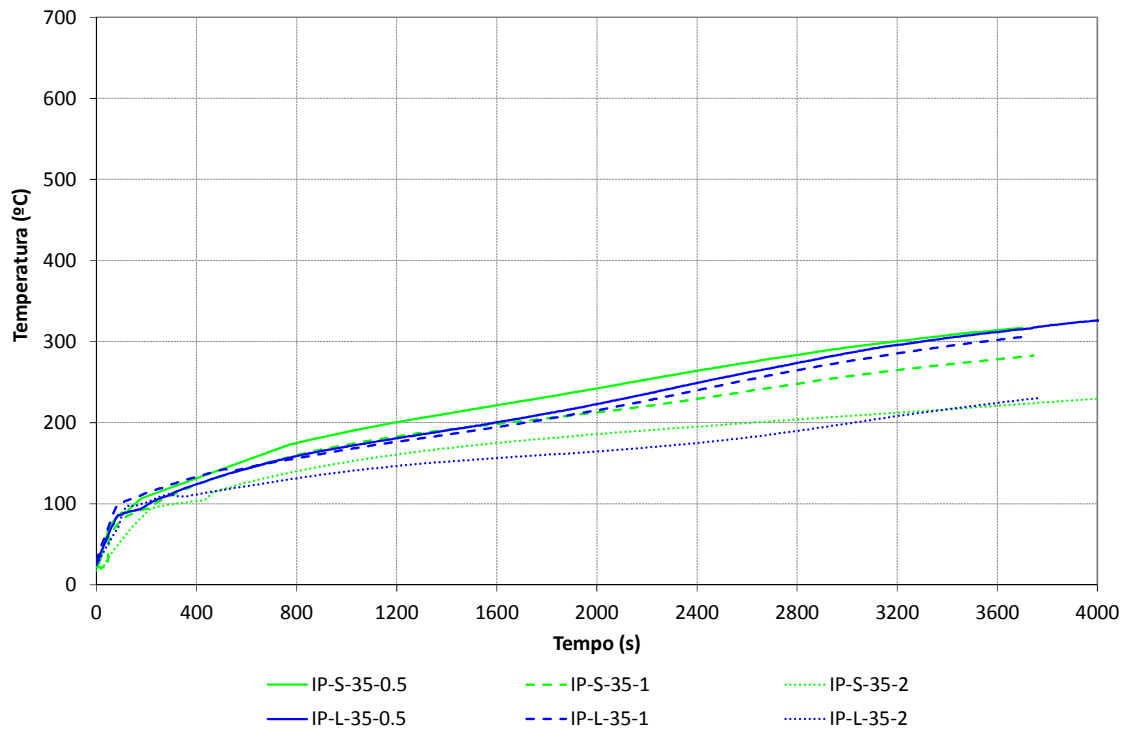


Gráfico 5- Comparação entre os ensaios com tinta intumescente da manta e do laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

O Gráfico 6 faz a comparação para o fluxo de 75 [kW/m²] dos ensaios com tinta intumescente com as várias espessuras para o laminado e para a manta.

Tal como anteriormente, os ensaios com tinta intumescente com espessura 2 [mm] atingiram temperaturas mais baixas, sendo que os ensaios com manta atingiram as temperaturas na ordem dos 370 [°C] e os ensaios com laminado atingiram 390 [°C].

Para uma espessura de 0.5 [mm] os ensaios com manta foram os que tiveram temperaturas mais altas ao longo do ensaio, apesar de que no final do ensaio os ensaios com manta com 0.5 [mm] de espessura e os ensaios com laminado com 1.0 [mm] tiveram uma temperatura semelhante (480 [°C]).

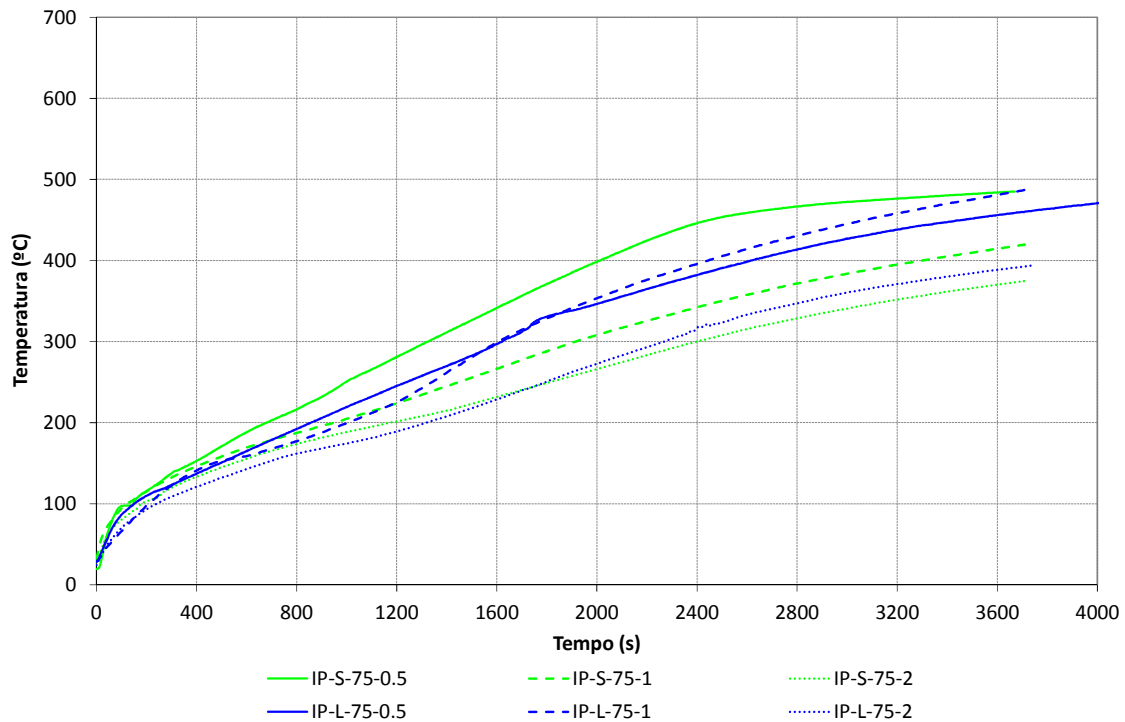


Gráfico 6- Comparação entre os ensaios com tinta intumescente da manta e do laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

5.4- Comparação entre os provetes reforçados com manta (S)

O Gráfico 7 faz a comparação entre os vários provetes reforçados com manta para um fluxo de calor de 35 [kW/m²]. As conclusões que se pode tirar da observação do gráfico, é que o ensaio com placa de gesso foi aquele que teve um melhor desempenho, isto quer dizer, que o ensaio com placa de gesso com manta atingiu a menor temperatura (170 [°C]) do que o outro sistema passivo de proteção (tinta intumescente com 3 diferentes temperaturas).

O ensaio sem proteção com manta foi aquele que registou maiores temperaturas ao longo do ensaio, e por isso tem um pior comportamento (420 [°C]). Tal como foi visto no Gráfico 5, o ensaio com tinta intumescente com 2 [mm] de espessura foi aquele que melhor desempenho teve de entre os ensaios com tinta intumescente.

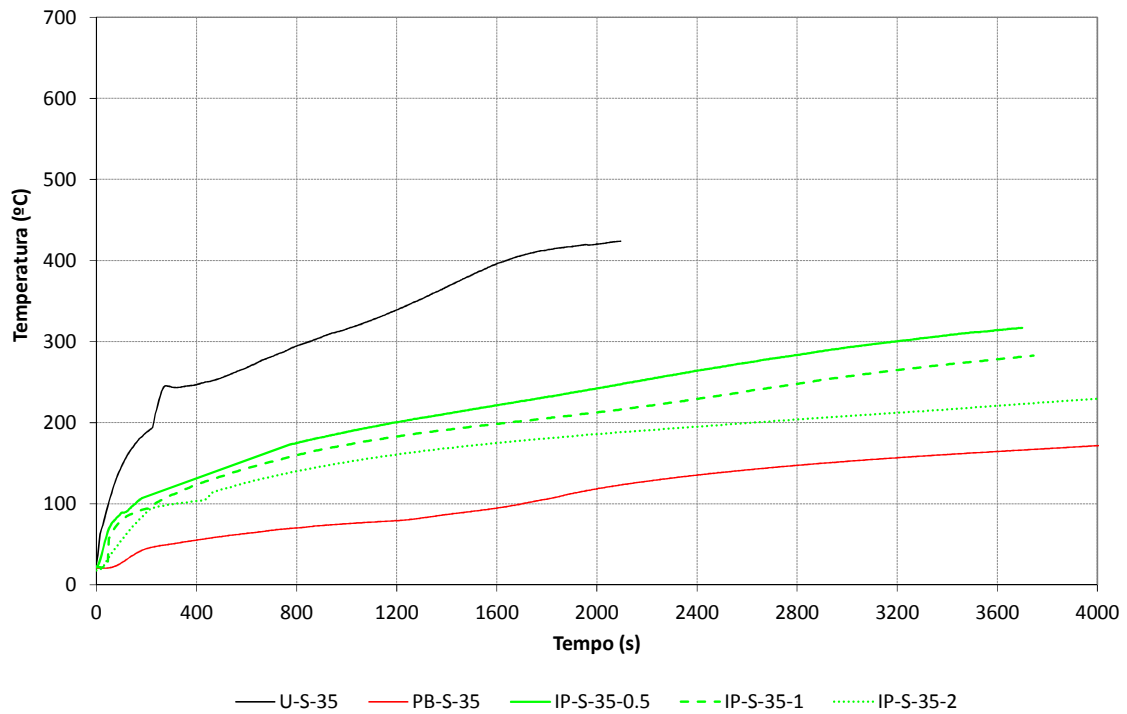


Gráfico 7- Comparação entre os ensaios com manta para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

No Gráfico 8, faz-se a comparação entre os ensaios com manta para um fluxo de calor de 75 [kW/m²]. A conclusão que se tira do Gráfico 8 é que o ensaio com placa de gesso é o que melhor desempenho tem, visto que atinge menores temperaturas (250 [°C]). E tal como no gráfico anterior, também neste vê-se que o ensaio sem proteção é aquele que atinge temperaturas mais elevadas ao longo da duração do ensaio. De entre os ensaios com tinta intumescente, o ensaio com 2 [mm] de espessura volta a ser aquele que menor temperatura atinge.

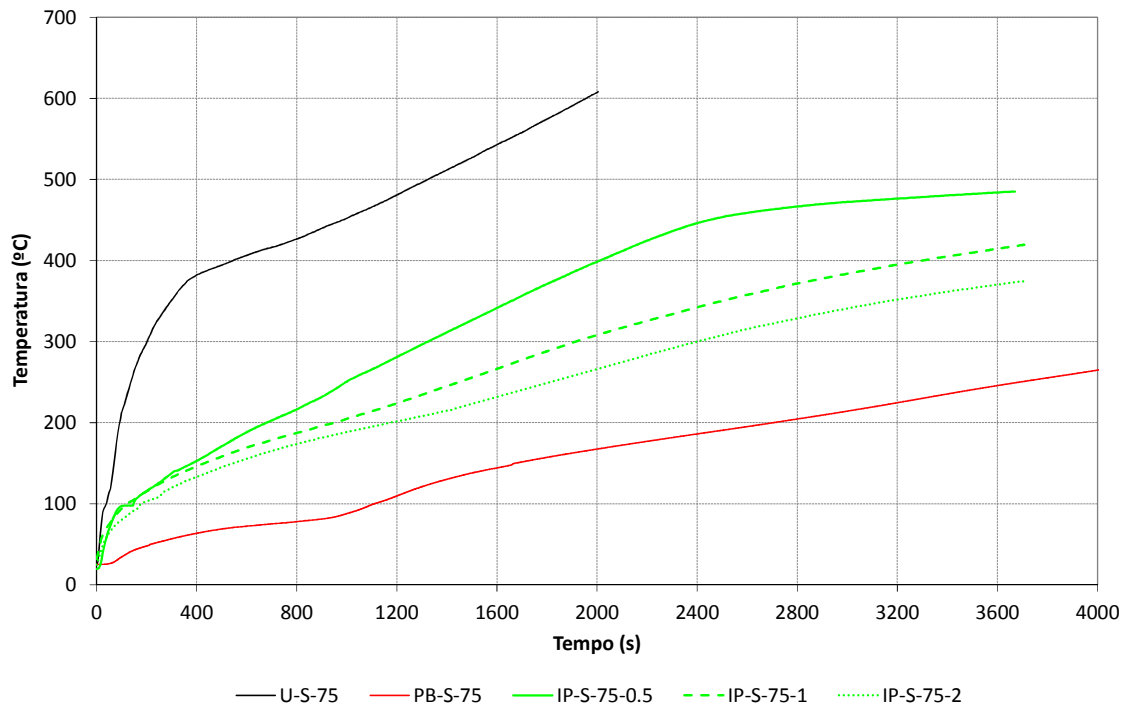


Gráfico 8- Comparação entre os ensaios com manta para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

5.5- Comparação entre os ensaios com Laminado (L)

O Gráfico 9, faz a comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²]. Como se pode ver no gráfico seguinte, o ensaio com placa de gesso é aquele que tem um melhor desempenho. O ensaio com placa de gesso laminado atinge menores temperaturas (150 [°C]) que os restantes ensaios. Tal como no gráfico 7 e 8, o ensaio sem proteção tem um pior desempenho visto que atinge temperaturas mais altas que os outros ensaios. Em relação à tinta intumescente volta a ser o ensaio com valores intermédios.

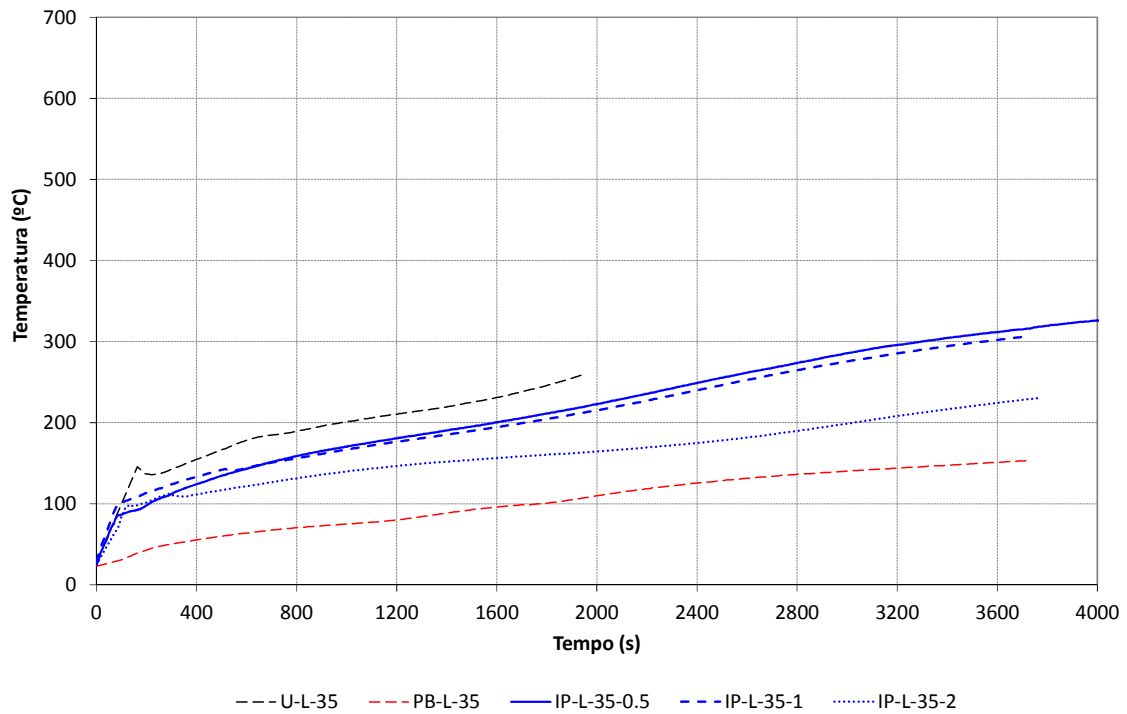


Gráfico 9- Comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

No Gráfico 10, temos a comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Os provetes protegidos com a placa de gesso foram os que tiveram melhor comportamento, ou seja os valores atingidos foram os mais baixos dos ensaios realizados com laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²]. O ensaio sem proteção é aquele que atinge temperaturas mais altas. Em relação aos ensaios com tinta intumescente, o ensaio com 2 [mm] é o que melhor comportamento tem.

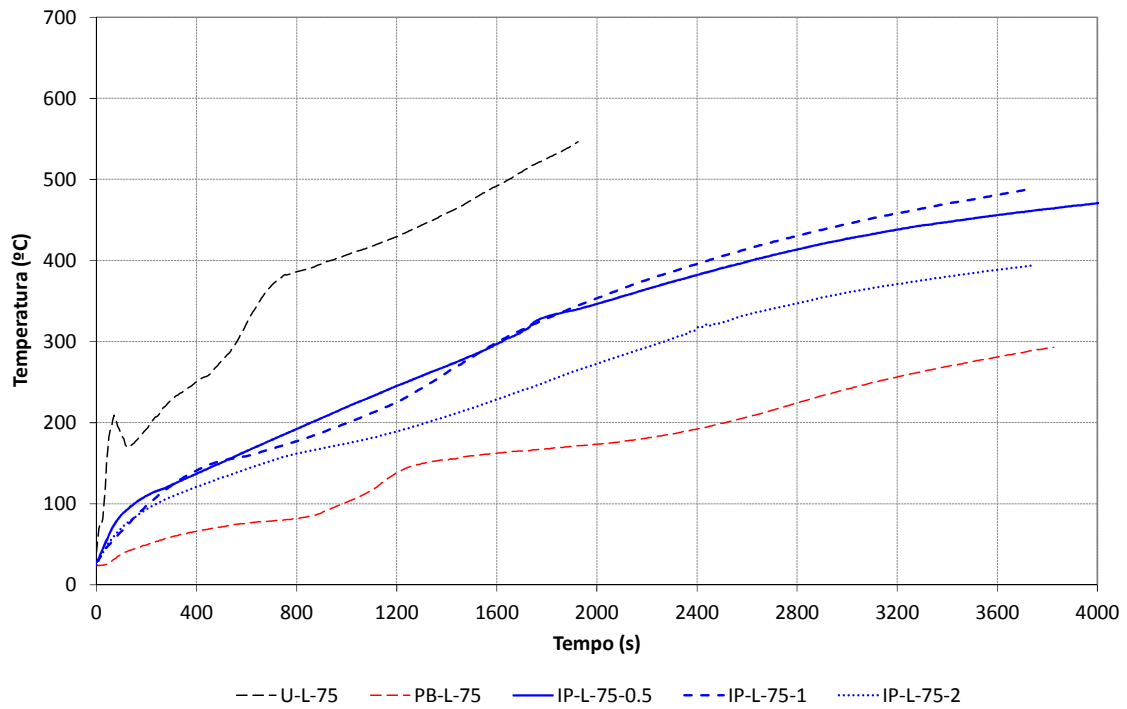


Gráfico 10- Comparação entre os ensaios com laminado para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

5.6- Comparações gerais (manta e laminado)

Nos gráficos seguintes (Gráfico 11 e 12) é feita a comparação entre todos os ensaios realizados, ou seja, para cada um dos fluxos de calor são comparados os dois sistemas de proteção em estudo.

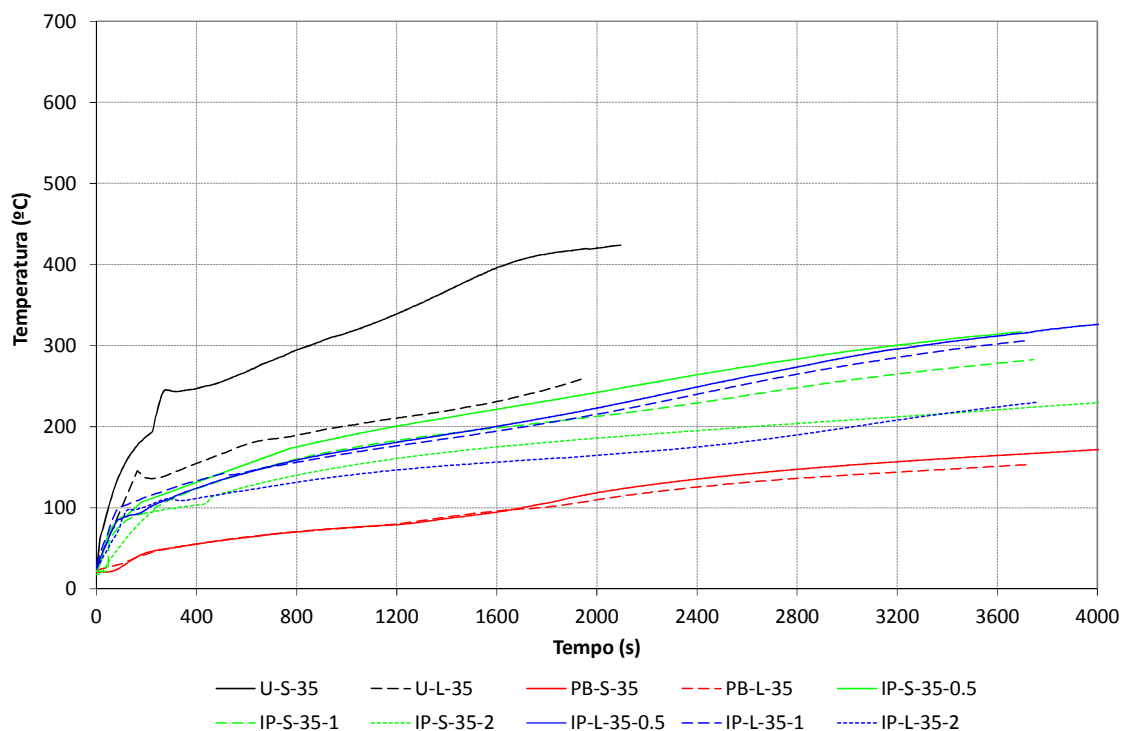


Gráfico 11- Evolução da temperatura ao longo do tempo para um fluxo de calor de 35 [kW/m²].

Para um fluxo de calor de 35 [kW/m²], Gráfico 11, os provetes reforçados com manta sem proteção atingiram valores de temperatura consideravelmente mais elevados (420 [°C]) em comparação com os provetes reforçados com laminados de CFRP (260 [°C]). Esta tendência manteve-se nos restantes ensaios para os diferentes sistemas de proteção. No caso dos provetes protegidos com placa de gesso a diferença registada foi de 164 [°C] e de 150 [°C] para os provetes reforçados com manta e com laminado, respetivamente. Nos provetes protegidos com tinta intumescente, as temperaturas mais elevadas foram registadas nos provetes com 0.5 [mm] de tinta, 310 [°C] e para espessuras de 2 [mm] foram da ordem dos 220 [°C]. Neste caso não se verificou diferenças significativas entre as temperaturas atingidas nos provetes reforçados com manta e com laminados [26].

Em ambos os sistemas de reforço o melhor sistema de proteção foi verificado para a placa de gesso, com um registo de menos 70 [°C] em relação aos provetes protegidos com 2 [mm] de tinta intumescente [26].

Para um fluxo de 75 [kW/m²], nos provetes sem proteção os valores mais elevados de temperatura são alcançados para os provetes reforçados com manta, 610 [°C] e de 545 [°C] nos provetes reforçados com laminados de CFRP. Tal como observado no menor

fluxo de calor, os provetes reforçados com manta atingem temperaturas mais elevadas do que os provetes reforçados com laminado, embora esta diferença não seja tão acentuada, cerca de 65 [°C] de diferença sendo no caso anterior de 160 [°C], Gráfico 12 [26].

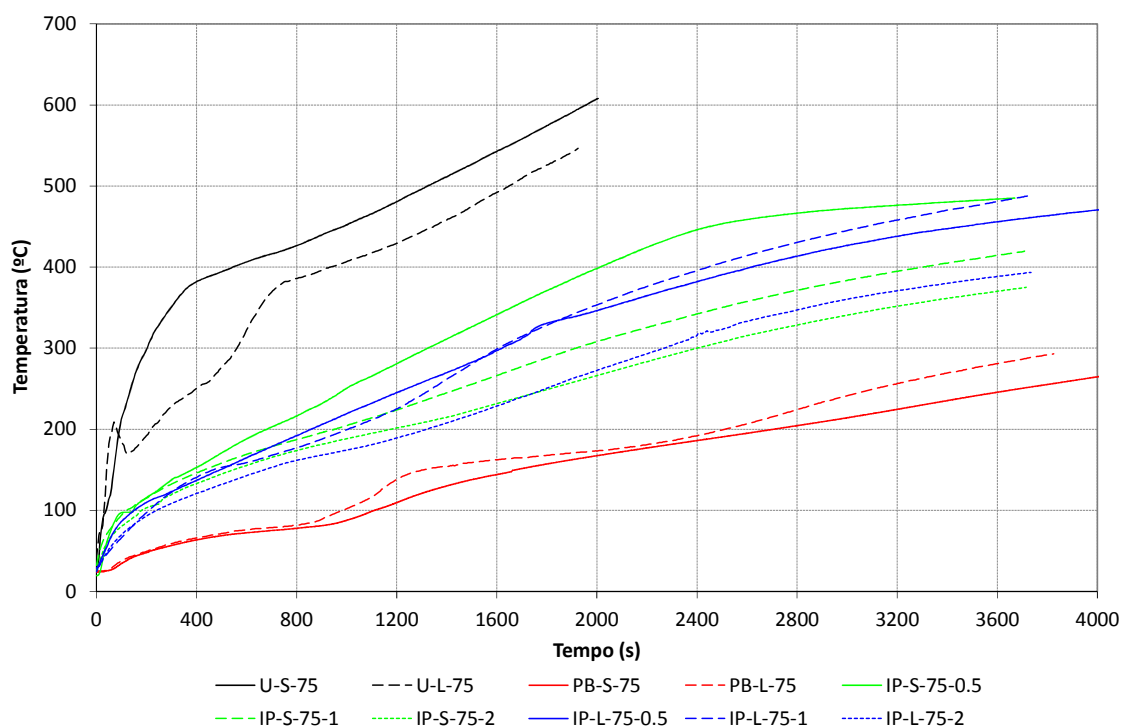


Gráfico 12- Evolução da temperatura ao longo do tempo para um fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Nos provetes com proteção, também neste caso, se obteve melhor desempenho nos provetes protegidos com a placa de gesso, cerca de 250 [°C] em comparação com os provetes protegidos com tinta intumescente em que o valor mais baixo foi de 370 [°C] obtido nos provetes protegidos com 2 [mm] de espessura de tinta [26].

5.4- Taxa de libertação de calor (HRR) e perda de massa

Durante os ensaios, a taxa de libertação de calor e a perda de massa foram medidas. Estas propriedades são apresentadas nos Gráficos 13 e 14, para os provetes sem qualquer sistema de proteção ao fogo [26].

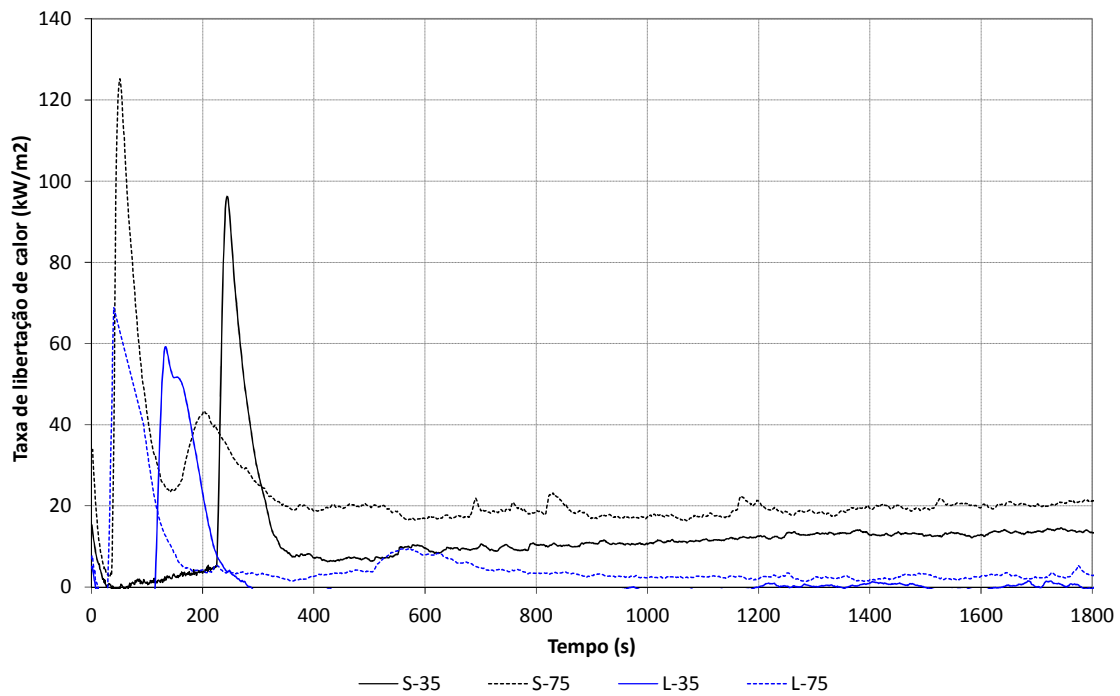


Gráfico 13 – Taxa de libertação de calor [kW/m²].

No que diz respeito à taxa de libertação de calor, para ambos os fluxos de calor e para ambos os sistemas de reforço, há um período inicial onde os provetes sem proteção não libertam calor, dado que a temperatura nos provetes é inferior à temperatura de pirólise da resina polimérica. Findo este período inicial, cuja duração diminuiu com o fluxo de calor, a taxa de libertação de calor sofre um rápido aumento devido à combustão da resina que rapidamente atinge o seu valor de pico. Seguidamente, a taxa de libertação de calor diminui gradualmente com o tempo devido ao início da extinção da chama e do processo de combustão. Após a decomposição de toda a resina verifica-se um valor residual da taxa de libertação de calor [26].

Os valores máximos registados para a taxa de libertação de calor foram de 125 [kW/m²] para um fluxo de calor de 75 [kW/m²] e de 94 [kW/m²] para um fluxo de calor de 35 [kW/m²], no caso dos provetes reforçados com manta de CFRP. No caso dos provetes reforçados com laminado de CFRP os valores de pico foram mais baixos: 69 [kW/m²] e 58 [kW/m²] para um fluxo de calor de 35 [kW/m²] e de 75 [kW/m²], respetivamente [26].

As curvas apresentadas no Gráfico 14 são referentes à perda de massa registada nos provetes reforçados quer com manta quer com laminado de CFRP para os provetes sem qualquer tipo de proteção. Estas curvas seguem a tendência das curvas referentes à taxa

de libertação de calor mostrando um patamar inicial sem perda de massa seguido de quebra acentuada de perda de massa referente ao instante em que a resina epoxídica entra em combustão. Após este pico as amostras continuam a perder massa de forma mais lenta devida à continua decomposição térmica da massa residual. A perda de massa total do provete de betão reforçado com manta foi de 4 [%] e 6 [%] para os fluxos de calor de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], respetivamente. Para as amostras de betão reforçadas com laminado a perda de massa total foi de 5 [%] e 7 [%] para os fluxos de calor de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], respetivamente [26].

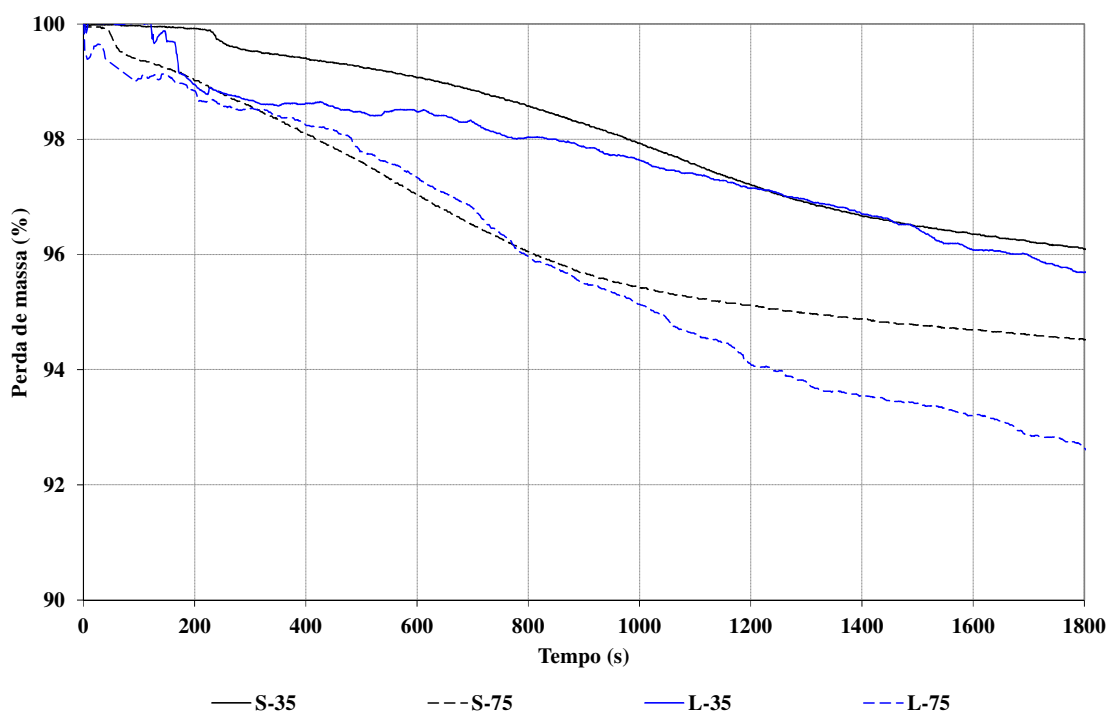


Gráfico 14 – Perda de massa [%]

O Gráfico 15, refere-se à taxa de libertação de calor para os ensaios com placa de gesso, quer para a manta quer para o laminado.

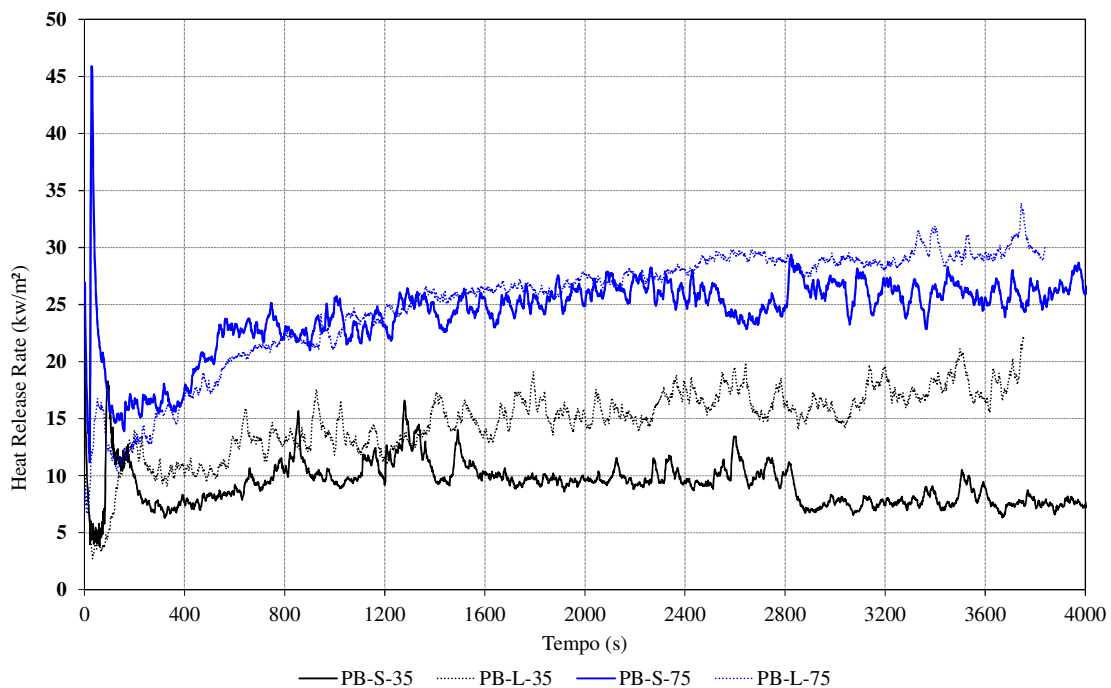


Gráfico 15 – Taxa de libertação de calor provetes com placa de gesso [kW/m²].

Como se pode ver no gráfico anterior, os ensaios com placa de gesso laminado quer para o fluxo com 35 [kW/m²] quer para 75 [kW/m²] foram aqueles em que a taxa de libertação de calor atingiu valores mais altos, atingido respectivamente no final do ensaio (3600 s) valores de 23 [kW/m²] e 30 [kW/m²], enquanto que os ensaios com placa de gesso com manta os valores para o fluxo de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²] foram de 9 [kW/m²] e 25 [kW/m²] respetivamente.

No Gráfico 16, refere-se à taxa de libertação de calor para os ensaios com tinta intumescente, para a manta, quer para o fluxo com 35 [kW/m²] quer para 75 [kW/m²].

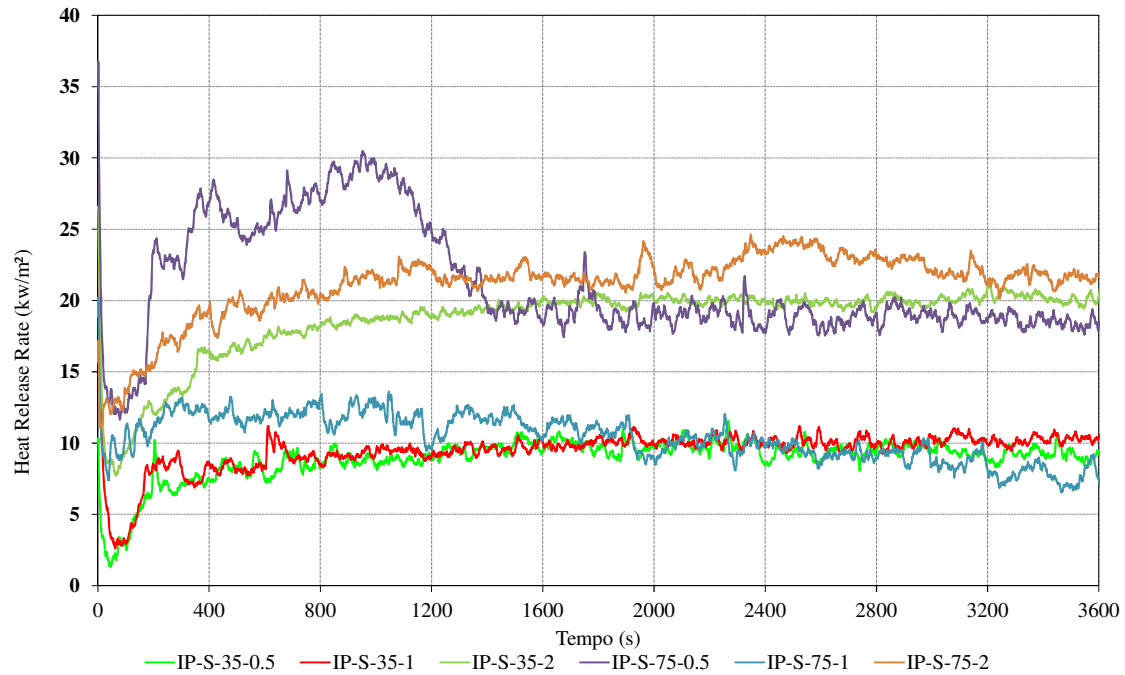


Gráfico 16 – Taxa de libertação de calor provetes com tinta intumescente para manta [kW/m²].

Como se pode ver no gráfico 16, a taxa de libertação de calor para a manta com 35 [kW/m²] é inferior à taxa de libertação de calor com o fluxo de calor de 75 [kW/m²].

Para a taxa de libertação de calor provetes com tinta intumescente para laminado, não é apresentado nenhum gráfico, devido a alguma erro na coleção desses dados.

6- Conclusões e desenvolvimentos futuros

O comportamento ao fogo de manta e de laminado de CFRP foi avaliado recorrendo a ensaios no calorímetro de perda de massa. Os ensaios foram realizados em provetes sem qualquer sistema de proteção (referência) e protegidos com dois sistemas passivos de proteção: placa de gesso laminado e tinta intumescente com três espessuras diferentes. Os ensaios realizaram-se para dois fluxos de calor 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²]. As temperaturas na face inferior do CFRP foram medidas recorrendo a um termopar do tipo K.

Dos ensaios realizados verificou-se que:

- as temperaturas medidas mostraram que ambos os materiais de proteção contra incêndio originaram uma significativa redução das temperaturas no CFRP;
- nos provetes reforçados com manta de CFRP, protegidos com tinta intumescente, e para um fluxo de calor de 35 [kW/m²], registaram-se reduções de temperatura no CFRP de 43 [%], 49 [%] e 56 [%] para as espessuras de 0.5 [mm], 1.0 [mm] e 2.0 [mm], respetivamente, ao fim de 30 min de exposição ao fogo. Com estes resultados verifica-se que a eficácia da proteção com tinta intumescente tende a aumentar com o aumento da sua espessura;
- para fluxos de calor de 75 [kW/m²] as reduções de temperatura foram de 35 [%], 49 [%] e 55 [%] para 0.5 [mm], 1.0 [mm] e 2.0 [mm], de espessura de tinta, respetivamente e para o mesmo tempo de exposição ao fogo;
- o desempenho da placa de gesso na redução da temperatura alcançada no provete reforçado com manta CFRP foi de 72 [%] e 71 [%] para os dois fluxos de calor de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], respetivamente. Os valores obtidos são semelhantes o que leva a concluir que a placa de gesso não altera a sua eficiência com o aumento do fluxo de calor;
- nos provetes, reforçados com laminado de CFRP, protegidos com tinta intumescente, e para um fluxo de calor de 35 [kW/m²], registaram-se reduções de temperatura no CFRP de 14 [%], 16 [%] e 34 [%] para as espessuras de 0.5 [mm], 1.0 [mm] e 2.0 [mm], respetivamente, ao fim de 30 min de exposição ao fogo. Com estes resultados verifica-se que a eficácia da proteção com tinta intumescente tende a aumentar com o aumento da sua espessura. Para fluxos de calor de 75 [kW/m²] as reduções de temperatura foram de 36 [%], 35 [%] e 50 [%] para 0.5

[mm], 1.0 [mm] e 2.0 [mm], de espessura de tinta, respetivamente, e para o mesmo tempo de exposição ao fogo;

- O desempenho da placa de gesso na redução da temperatura alcançada no provete reforçado com manta CFRP foi de 57 [%] e 68 [%] para os dois fluxos de calor de 35 [kW/m²] e 75 [kW/m²], respetivamente. A eficácia deste sistema de proteção foi superior à registada nos provetes protegidos com a tinta intumescente para as espessuras de tinta consideradas [27]. Este facto pode estar relacionado com aplicação dos revestimentos intumescentes estar condicionada pelo facto de, regra geral, estes serem ativados (começarem a expandir-se) para valores de temperatura entre 100 [°C] e 300 [°C], enquanto o elemento mais frágil do sistema de reforço CFRP, o adesivo, apresenta valores de temperatura de transição vítrea entre 50 [°C] e 80 [°C].

Para uma melhor avaliação dos CFRP's, um possível desenvolvimento futuro é a análise a outros sistemas passivos descritos anteriormente como o revestimento à base de vermiculite e de perlite, de modo a se poder fazer uma melhor avaliação aos melhores materiais de proteção ao fogo. Outro sistema passivo que seria interessante analisar é as mantas de fibras cerâmicas e as placas de lã de rocha.

Outro estudo possível é a elaboração de modelos analíticos e numéricos que simulem o comportamento ao fogo de secções maiores com CFRP, que permitam estimar as temperaturas em várias zonas e o tempo de resistência.

7- Referências Bibliográficas

- [1] Green, M., Benichou, N., Kodur, V., Bisby, L. (2007). Design guidelines for fire resistance of FRP strengthened concrete structures. Eighth International Conference on FRP in Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Greece, 1-10.
- [2] Correia, J. (2008). GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour. PhD thesis, Technical University of Lisbon.
- [3] Morgado, T. (2012). Comportamento ao fogo de vigas de compósito de GFRP. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [4] Firmo, J. Arruda, M., Correia, J. (2016). Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com laminados de cfrp instalados em rasgos: ensaios de resistência ao fogo e simulação numérica. 5ª Jornadas de segurança aos incêndios urbanos, LNEC, Lisboa.
- [5] Ferreira, D., Duarte, L., Mesquita, L., Piloto, P. (2016). CFRP fire behaviour – passive protection system. Proceedings of the 7th International Conference on Safety and Durability of Structures-ICOSADOS, UTAD, Portugal.
- [6] Correia, J.; Branco, F.; Ferreira, J. (2000). The effect of different passive fire protection systems on the fire reaction properties of GFRP pultruded profiles for civil construction. Composites, Part A: applied science and manufacturing, Elsevier, Volume 41 A, Issue 3.
- [7] J.P. Busel, J.D Lockwood, “Product select guide: FRP composite products for bridge application”, The market development alliance of the FRP composites industry, Harrison, NY, 2000.
- [8] B. Tang, “Fiber reinforced polymer composites application in USA”, In Proceedings of the First Korea/USA road workshop, 1997.
- [9] J.R. Correia, “Compósitos de Matriz Polimérica”, Ciência e Engenharia de Materiais de Construção (Editoras: F.Margarido e M.C. Gonçalves), capítulo 11, IST Press, Lisboa, 2012.
- [10] T.Keller, “Fibre reinforced polymer materials in bridge construction”, In IABSE Symposium, Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology, Melbourne, 2002.

- [11] A.M.R. Balseiro, “Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [12] Martin, Zeno A., Stith, Joe K., Tingley, Dan A., “Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology”, World Conference on Timber Engineering, Canada, 2000 (citado em [11]).
- [13] ACI 2006. ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440.
- [14] Rodrigues, C., 2012, Apontamentos das disciplinas de Inspeção e Reforço de Estruturas, Instituto de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.
- [15] Silva, João, Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP), Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2013.
- [16] Ministério da Administração Interna, Diário da República, 1.ª série, N.º 250, Portaria n.º 1532/2008 de 29 de Dezembro.
- [17] J. P. Firmo, “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 para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Dezembro, 2010.
- [18] M. M. Martins, “Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.
- [19] T. M. C. G. Pinto, “Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- [20] H. Blontrock, "Analyse en modèllering van de brandweerstand van betonelementen uitwendig versterkt met opgelijmde composietlaminaten.", Ghent University, 2003

- [21] A. Santiago, “Análise e dimensionamento ao fogo”, Documentos de apoio às aulas de Doutoramento em Construção Metálica e Mista, Faculdade de Ciência e Engenharia da Universidade de Coimbra, 2010.
- [22] Marinho, Ana, Durabilidade de ligações coladas com adesivo epoxídico entre perfis de GFRP utilizados em reabilitação.
- [23] S. Cabral-Fonseca, "Utilização de materiais compósitos na reabilitação de estruturas de betão", Seminário sobre materiais em ambiente marítimo, Funchal, Outubro de 2007.
- [24] Interchar 1160 (2015). Ficha técnica, Pintura intumescente de base aquosa – International, Ref: 4585.
- [25] Gyptec, Ibérica (2012). Ficha técnica, placa F – EN 520 (anti-fogo), DOC 05.01-21.
- [26] Ferreira, D., Duarte, L., Mesquita, L., Piloto, P. (2016), Sistemas passivos de proteção ao fogo dos CFRP, XII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation.
- [27] Ferreira, D., Duarte, L., Mesquita, L., Piloto, P. (2016), Comportamento ao fogo dos CFRP-Sistemas passivos de proteção, 5ºJORNINC.

8- Anexos

Passos da calibração da balança e da calibração diária.

1. Calibração da balança (com a temperatura no fluxo 35 [kW/m²] ou 75 [kW/m²] conforme o ensaio)
 - Sem nada na balança colocar o porta amostra
 - Carregar na tecla “Tare” para dar o zero
 - Colocar uma amostra calibrada (ex: m=200 [g])
 - Balança calibrada.

2. Calibração diária
 - No software MLLCalc clicar em HRR Check
 - Selecionar o ficheiro (Heat flux e separation)
 - Pressionar “Next”
 - Colocar a base com areia (metano)
 - Abrir o escudo de proteção
 - Start Check
 - Quando estabilizar selecionar “Collect Baseline”
 - Colocar o ignitor em posição (no centro)
 - Ligar o gás (3 [kW] a 5,03 [l/min])
 - Havendo a ignição retirar o ignitor
 - Esperar que esteja dentro do limite de 5+/- [kW]
 - Aguardar mais de 60 segundos e pressionar “close”

Após estes passos, a calibração da balança e a calibração diária está concluída.