



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Ribeiro Pinhão Pereira

Caracterização de Reforços
Compósitos Submetidos a Impacto e Fogo



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Ribeiro Pinhão Pereira

Caracterização de Reforços
Compósitos Submetidos a Impacto e Fogo

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Paulo B. Lourenço
Doutor João M. Pereira

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu agradecimento à Universidade do Minho, em particular ao Departamento de Engenharia Civil que me proporcionou os meios para realizar este trabalho.

De um modo especial ao Professor Paulo Lourenço que me orientou neste projeto, pelos seus ensinamentos e profundo sentido de profissionalismo que considero ter sido uma referência fundamental para o trabalho que realizei.

Ao Doutor João Pereira, co-orientador desta dissertação, a minha gratidão por ter aceitado acompanhar-me desde início, por todo o empenho, contínua ajuda e partilha de conhecimento na área de comportamento dinâmico dos materiais em materiais compósitos de FRP.

Ao Doutor Bahman Ghiassi, gostaria de manifestar igualmente a minha sincera gratidão pelo conhecimento transmitido na área dos materiais compósitos, toda a dedicação demonstrada e pela forma eficiente e rápida como colocou à minha disposição todos os recursos materiais que necessitei no decorrer deste trabalho.

Agradeço, também aos Engenheiros Hamid Maljaee, António Matos, Marco Jorge, Carlos Jesus e Fernando Pokee que me acompanharam no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST), pelo auxílio, acompanhamento e ensinamentos durante a preparação das amostras e ensaios laboratoriais.

Por fim, gostaria de dedicar esta dissertação à minha família que sempre me apoiou, especialmente aos meus avós, Maria Cândida e José.

*“Viste como ergueram aquele edifício de grandeza imponente?
Um tijolo, e outro. Milhares. Mas um a um. - E sacos de cimento, um a um. E blocos de
pedra, que pouco representam na mole do conjunto. - E pedaços de ferro. - E operários que
trabalham, dia a dia, as mesmas horas...*

*Viste como levantaram aquele edifício de grandeza imponente?
À força de pequenas coisas!”
S. Josemaría Escrivá*

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo investigar experimentalmente o comportamento de aderência entre materiais de reforço modernos, como GFRP ou CFRP, e substratos comuns, como tijolo e betão, quando sujeitos a ações extremas. Pretende-se estudar a influência de temperaturas elevadas e impactos nestes sistemas de reforço. Relativamente ao efeito de temperaturas elevadas, as amostras serão expostas a diferentes temperaturas constantes entre 70°C e 500°C por diferentes períodos de exposição. A aderência entre o reforço e o substrato será avaliada com recurso a ensaios de arrancamento por tração e o efeito da aplicação de camada de revestimento em argamassa também será investigado. Com o estudo do comportamento de aderência entre o reforço e o substrato quando sujeito a impactos, pretende-se estudar o efeito das elevadas velocidades de deformação nestes sistemas. O efeito da velocidade de deformação influencia a maioria dos materiais de construção. Este efeito já foi estudado no reforço e no substrato isoladamente e pretende-se com este trabalho quantificar essa influência no comportamento de aderência nestes sistemas de reforço. Para esse efeito, será utilizada uma torre de queda (“Drop-Weight Tower” ou DW) desenvolvida especificamente para este efeito e que possibilita a combinação entre diferentes alturas e pesos de queda. Será quantificado o efeito das velocidades de deformação na força máxima de corte sob a forma de Fatores de Incremento Dinâmico (FID).

Palavras-chave: Alvenaria; FRP; Aderência; Temperatura elevada; Impactos.

ABSTRACT

This dissertation aims at experimentally investigating the bond behavior of modern strengthening techniques with FRPs when subjected to extreme loading. The work addresses the influence of the high temperatures and impacts in these strengthening systems. Regarding the fire or high temperatures study, the test specimens will be subjected to constant temperatures ranging from 70°C to 500°C for different exposures periods. The bond behavior will be evaluated performing pull-off tests and the application of a mortar cover layer will be also studied. It is well known that the high strain rates influences most of the construction materials and this effect was previously studied in both the substrate and the reinforcement on their own. This work will focus on such effect on the bond behavior of these strengthening techniques using impacts. A newly developed Drop Weight Tower (DW) allowing different combinations of hammer mass and drop height will be used. Empirical relations of Dynamic Increase Factors (DIF) for the maximum force under pull-out tests will be presented.

Keywords: Masonry; FRP; Bond; High Temperature; Impact.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice Geral.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Índice de Figuras	xii
1 Introdução	1
2 Estado da Arte.....	5
2.1 Breve contextualização histórica dos materiais compósitos	5
2.2 Materiais compósitos FRPs como reforço estrutural	9
2.3 Fibras.....	11
2.4 Adesivos de colagem.....	12
2.5 Influência de temperaturas elevadas	16
2.6 Propriedades estáticas	19
2.7 Propriedades dinâmicas.....	22
3 Preparação de Provetes	27
3.1 Tratamento da superfície de ligação (1ª Fase)	27
3.1.1 Tijolo	27
3.1.2 Betão.....	29
3.2 Aplicação do reforço exterior (2ª Fase).....	31
3.3 Aplicação da camada de argamassa	33
4 Efeito de Temperaturas Elevadas	35
4.1 Ensaio de arrancamento por tração (PULL-OFF)	36
4.2 Procedimento experimental.....	37

4.3	Sistemas Tijolo-GFRP.....	39
4.4	Sistemas Betão-CFRP	43
5	Efeito das Velocidades de Deformação	49
5.1	Resultados pretendidos.....	50
5.2	Instrumentação	51
5.3	Procedimento experimental.....	54
5.4	Análise e discussão de resultados.....	55
6	Conclusões	61
7	Referências.....	65
	Anexos.....	69
	Anexo A – Caracterização da resistência à compressão do betão aos 28 dias	70
	Anexo B – Catálogos dos fornecedores com as propriedades dos materiais utilizados ..	71
	Anexo C – Catálogo fotográfico do sistema Tijolo-GFRP submetido a elevadas temperaturas	75
	Anexo D – Catálogo fotográfico do sistema Betão-CFRP submetido a elevadas temperaturas	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades das fibras mais utilizadas em engenharia civil para reforçar FRPs (Firmo, 2010).....	11
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (Firmo, 2010).	13
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente dos adesivos epóxicos à temperatura ambiente (Firmo, 2010).	14
Tabela 4 - Propriedades dos materiais usados nos provetes ensaiados por Ghiassi (2013).	32
Tabela 5 - Programa de exposição.....	36
Tabela 6 - Resultados obtidos nos ensaios Pull-off do sistema tijolo-GFRP quando sujeitos a elevadas temperaturas.	41
Tabela 7 - Resistências finais de arrancamento por tração, tendo em conta a temperatura e tempo de exposição do provete (em percentagem), no sistema tijolo-GFRP.	42
Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios Pull-off do sistema betão-CFRP quando sujeitos a elevadas temperaturas.	46
Tabela 9 - Resistências finais de arrancamento por tração, tendo em conta a temperatura e tempo de exposição do provete (em percentagem), no sistema betão-CFRP.	47
Tabela 10 - Resultados dos ensaios em impacto em sistemas GFRP-tijolo.	57
Tabela 11 - Resultados dos ensaios com os dois sistemas de aquisição de deslocamento.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Importância relativa dos materiais básicos na construção ao longo do tempo (Ashby, 1987)	6
Figura 2 - Evolução no tempo da utilização da fibra de carbono em função do preço, da produção e do campo de aplicação (Juvandes, 1999).....	7
Figura 3 - Primeiros projetos onde se destacou a utilização de FRPs: a) “Monsanto House of the Future” – revestimentos em compósitos de fibras de vidro; b) “American Pavilion in Brussels” – fachadas totalmente em compósito de fibra de vidro (Firmo, 2010).	8
Figura 4 - Exemplo de aplicação de FRP como reforço exterior: a) Madeira; b) Betão; c) Alvenaria (Maruccio, 2010).	9
Figura 5 - Reforços tipo mais comuns com colagem de laminados, mantas e tecidos de FRP (Juvandes, 1999).....	10
Figura 6 - Diagramas tensão-extensão de vários compósitos de FRP e dos aços macio e de pré-esforço (Abdelrahman e Rizkalla, 1998).....	12
Figura 7 - Variação da rigidez e do Tg, com os efeitos higrotérmicos (Juvandes, 1999)..	17
Figura 8 - Ensaio ao corte realizados por Fedele e Milani (2010) para o comportamento de aderência do sistema FRP-alvenaria.	20
Figura 9 - a) Ensaio de corte direto; b) Ensaio de corte duplo (Cabral, 2012).....	20
Figura 10 - Set-up ensaio de corte direto: a) Configuração do ensaio; b) Colocação dos LVDTs no provete (Ghiassi, 2013).	21
Figura 11 - Ensaio estático de corte direto em sistemas GFRP-tijolo: Força vs. tempo (Ghiassi, 2013).....	21
Figura 12 - Ensaio estático de corte direto em sistemas GFRP-tijolo: Deslocamento relativo vs. tempo (Ghiassi, 2013).....	22
Figura 13 - Taxas de deformação esperadas para diferentes tipos de carga (Riisgaard et al., 2007)	23
Figura 14 - Esquema geral de ensaio em Silva (2012) e Dias (2013): 1) Estrutura metálica; 2) Guias de suporte; 3) Pesos adicionais; 4) Martelo; 5) Provete; 6) Célula de carga; 7) Base metálica; 8) Sistema de aquisição; 9) Equipamento de vídeo de alta velocidade.	24
Figura 15 - FID da tensão máxima do tijolo em compressão (Dias, 2013).....	25
Figura 16 - Configuração dos testes de impacto realizados por Min et al (2010).	25

Figura 17 - Configuração de ensaio de corte duplo aplicando cargas de impacto realizados por Al-Zubaidy et al (2011).....	25
Figura 18 - Processo de preparação dos tijolos: a) tijolo cerâmico 200x100x55 mm; b) retificação de superfícies; c) arredondamento de arestas; d) lavagem.	28
Figura 19 - Provetes de tijolo prontos para aplicação do primário.....	29
Figura 20 - Fabrico dos provetes de betão: a) Betonagem; b) Enchimento dos moldes com betão; c) Blocos depois da descofragem.....	30
Figura 21 - Caracterização do betão: a) Máquina de compressão uniaxial; b) Ensaio de resistência à compressão de um provete cilíndrico; c) Provetes depois de ensaiados.....	30
Figura 22 - Provetes de betão prontos para aplicação do primário.	30
Figura 23 - Configurações geométricas utilizadas nos provetes: a) Ensaio Pull-out; b) Ensaio Pull-off.	32
Figura 24 - Preparação de provetes: a) Aplicação do GFRP em tijolos; b) Aplicação do CFRP em betão.....	32
Figura 25 - Revestimento em argamassa: a) Batedeira utilizada na produção da argamassa; b) Aplicação da camada de argamassa.....	33
Figura 26 - Provetes com e sem argamassa dispostos no forno antes de serem sujeitos a qualquer ação.....	36
Figura 27 - Setup do teste Pull-off (Ghiassi, 2013).....	37
Figura 28 - Preparação dos ensaios Pull-off: a) Caroteadora de 50 mm de diâmetro; b) Pormenor de medição da profundidade da carote; c) Colagem de pastilhas metálicas de 45 mm de diâmetro.	38
Figura 29 - Ensaio Pull-off: a) Prensa hidráulica; b) Pormenor do modo de rotura pelo tijolo; c) Pormenor do modo de rotura pela ligação do sistema (resina).....	38
Figura 30 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 70°C e 100°C: a) 70°C durante 1h; b) 70°C durante 4h; c) 100°C durante 1h; d) 100°C durante 2,5h.	39
Figura 31 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 280°C: a) 1 de exposição sem proteção; b) 2h30min de exposição sem proteção; c) 2h30min de exposição com proteção; d) 4h de exposição com proteção.....	39
Figura 32 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 500°C: a) após 1h de exposição; b) aspeto do GFRP com proteção de argamassa; c) aspeto do GFRP sem proteção de argamassa.....	40

Figura 33 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes sem argamassa, no sistema tijolo-GFRP.	42
Figura 34 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes com argamassa, no sistema tijolo-GFRP.	43
Figura 35 - Aspeto dos provetes: a) após 2h30min a 70°C com argamassa; b) após 1h a 70°C sem argamassa; c) após 2h30min a 100°C com argamassa; d) após 4h a 100°C sem argamassa.	43
Figura 36 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 280°C: a) 1h sem argamassa; b) 2h30min com argamassa; c) 4h sem argamassa; d) 4h com argamassa.....	44
Figura 37 - Aspeto dos provetes expostos à temperatura de 500°C durante 1h.....	44
Figura 38 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes sem argamassa, no sistema betão-CFRP.....	47
Figura 39 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes com argamassa, no sistema betão-CFRP.....	48
Figura 40 - Efeito das velocidades de deformação: a) Setup de ensaio; b) Provetes preparados.....	50
Figura 41 - Aspeto genérico da evolução de FID com velocidades de deformação.	50
Figura 42 - Perfil genérico esperado: a) Força ao longo do tempo; b) Deslocamento relativo ao longo do tempo.	51
Figura 43 - a) Setup do ensaio pull-out: 1) Equipamento de vídeo de alta velocidade; 2) Torre de queda; 3) Célula de carga; 4) Martelo; 5) Provette; 6) Sistema de aquisição de dados; 7) Computador; 8) Extensómetros. b) Representação da Torre de Impacto.....	52
Figura 44 - Registo do perfil de Força: a) VETEK VZ101BH; b) Sistema de aquisição da Natitonal Instruments (NI).....	52
Figura 45 - PHOTRON FastCam APX-RS.	53
Figura 46 - Registo da resposta dos provetes: a) Alvos para registo de vídeo; b) Extensómetros ao longo do reforço.....	53
Figura 47 - Procedimento de ensaio: a) Extremidade do reforço; b) Suporte do provete na torre; c) Posicionamento do martelo; d) Comando para operação do equipamento de vídeo.	54
Figura 48 - Exemplos de registos dos ensaios: a) Perfil de força; b) Perfil de deslocamento relativo.	55

Figura 49 - Exemplos de curvas força-deslocamento relativo.	56
Figura 50 - Modos de rotura típicos dos ensaios dinâmicos para diferentes velocidades de deformação, com arrancamento total ou parcial do reforço GFRP.	56
Figura 51 - FID para a capacidade de carga do sistema de reforço tijolo-GFRP em função da taxa de deformação.	57
Figura 52 - Configuração da disposição dos extensómetros: extensómetro A, posição $x=00$ mm; extensómetro B, posição $x=50$ mm; extensómetro C, posição $x=100$ mm.....	58
Figura 53 - Exemplos de perfis extensões ao longo do tempo: a) Destacamento completo do reforço; b) Destacamento parcial de 60 mm do reforço.	59
Figura 54 - Extensometria: a) Distribuição de extensão ao longo do reforço a diferentes instantes; b) Perfil de deslocamento relativo obtido com extensometria.	60
Figura 55 - FID para a capacidade de carga do sistema de reforço tijolo-GFRP em função da taxa de deformação, inclui resultados com extensometria.....	60

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Uma estrutura, no seu período de vida não é só sujeita a ações estáticas e de longa duração mas pode também ser sujeita a ações extremas e rápidas, como é o caso do fogo, impactos ou explosões. Muitas vezes estas ações não são consideradas porque o seu efeito não está ainda quantificado e introduzido nas normativas nacionais e internacionais. Este trabalho pretende estudar o efeito de ações extremas, do tipo fogo e impacto, em sistemas de reforço modernos com recurso a FRP (“Fibre Reinforced Polymers”, polímeros reforçados com fibras).

Uma das técnicas de reforço com FRP mais utilizadas é por colagem exterior ou EBR (“Externally Bonded Reinforcement”) e tem sido especialmente utilizada no campo da reabilitação. Tratando-se de materiais relativamente recentes, aspetos como a durabilidade e o desempenho a longo prazo destes reforços estão ainda numa fase inicial de estudo. Estando uma estrutura, ao longo do seu período de vida, sujeita a ações extremas ou não convencionais, é importante estudar o comportamento destas técnicas de reforço quando sujeitas a este tipo de ações.

É conhecido que o comportamento de aderência do FRP com o substrato é um ponto crítico nesta técnica de reforço. Este trabalho pretende estudar o comportamento de aderência entre diferentes materiais de reforço, GFRP (“Glass Fibre Reinforced Polymers”) e CFRP (“Carbon Fibre Reinforced Polymers”), e diferentes substratos, tijolo e betão, quando sujeitos a elevadas temperaturas (fogo) e ações impulsivas (impactos ou explosões).

Para estudar o efeito das elevadas temperaturas nestes sistemas de reforço foi definida uma campanha experimental extensa que permite várias combinações de temperatura (variando entre os 70°C e os 500°C) e tempos de exposição (variando entre os 60 e os 240 minutos). A capacidade residual de aderência entre o reforço e o substrato é determinada com recurso a ensaios de arrancamento por tração (pull-off). A influência da aplicação de uma camada de revestimento em argamassa que possa funcionar como proteção é também estudada neste trabalho.

Para estudar o efeito de ações impulsivas nestes sistemas de reforço foi também definida uma campanha experimental extensa que permite quantificar o efeito das elevadas velocidades de deformação no comportamento destas técnicas de reforço. Uma torre de queda (DW) especificamente desenvolvida para este efeito permite solicitar estes sistemas com recurso a impactos sob a forma de ensaios de corte direto (pull-out). Fazendo variar a altura de queda e o peso do martelo é possível introduzir diferentes velocidades de deformação no sistema, o que combinado com o registo de força máxima de corte permite estabelecer relações empíricas sob a forma de FID (“DIF - Dynamic Increase Factors”).

Este trabalho apresenta duas campanhas experimentais que visam quantificar a influência das elevadas temperaturas e elevadas velocidades de deformações em sistemas de reforço com FRPs e está estruturado em cinco capítulos, além deste capítulo introdutório, cada um com uma contribuição para os objetivos definidos anteriormente.

No Capítulo 2 apresenta-se o Estado da Arte sobre o reforço de estruturas com recurso a FRPs (polímeros reforçados com fibras). É reunida informação sobre os materiais em estudo assim como o comportamento de aderência entre o reforço e o substrato, e aspetos inerentes ao sistema de reforço em questão. São também apresentados estudos que permitem reunir um conjunto de informação necessária à execução deste trabalho.

No Capítulo 3 é descrito todo o processo de preparação dos provetes em estudo, desde a preparação do substrato, betão e tijolo, até à aplicação do reforço com CFRP e GFRP de acordo com as especificações necessárias à execução dos ensaios previstos.

O Capítulo 4 apresenta a campanha experimental levada a cabo para estudar a influência das elevadas temperaturas no comportamento de aderência entre o reforço e o substrato. São apresentados os resultados obtidos com os testes pull-off bem como os modos de rotura obtidos.

No Capítulo 5 é apresentada a segunda campanha experimental referente ao comportamento de aderência destes sistemas de reforço quando sujeitos a elevadas velocidades de deformação. São apresentados os resultados obtidos, modos de rotura e são apresentadas as relações empíricas em forma de FID.

No Capítulo 6 é reunida a informação dos capítulos anteriores e são apresentadas as principais conclusões e resultados obtidos. São também apresentadas sugestões relativamente a trabalhos futuros neste tópico.

Capítulo 2

2 ESTADO DA ARTE

Nesta secção é apresentada uma revisão da informação existente sobre a caracterização do comportamento de aderência para reforços com FRPs aplicados externamente. É apresentada uma breve contextualização histórica sobre estes materiais, são apresentados os materiais necessários para esta técnica de reforço, bem como várias propriedades destes materiais em diferentes regimes de carga.

2.1 Breve contextualização histórica dos materiais compósitos

Desde a antiguidade, o homem habituou-se misturar vários materiais como pedra, madeira, fibras vegetais, terra e outros materiais orgânicos de forma a obter materiais que servissem as suas necessidades (Keller, 1999).

Um material compósito resulta da combinação de diferentes materiais que juntos definem um novo material com diferentes propriedades (Cabral, 2012). O compósito mais utilizado em

construção é o Betão Armado, que conjuga o bom comportamento e resistência à compressão do betão com a resistência à tração e modo de rotura dúctil por parte do aço.

Ao longo dos últimos cinquenta anos, os polímeros (compósitos plásticos reforçados com fibras) têm estimulado o aparecimento de novos produtos estruturais (Juvandes, 1999). Na Figura 1, observa-se a comparação da importância relativa dos materiais de construção ao longo do tempo da vida humana (Ashby, 1987).

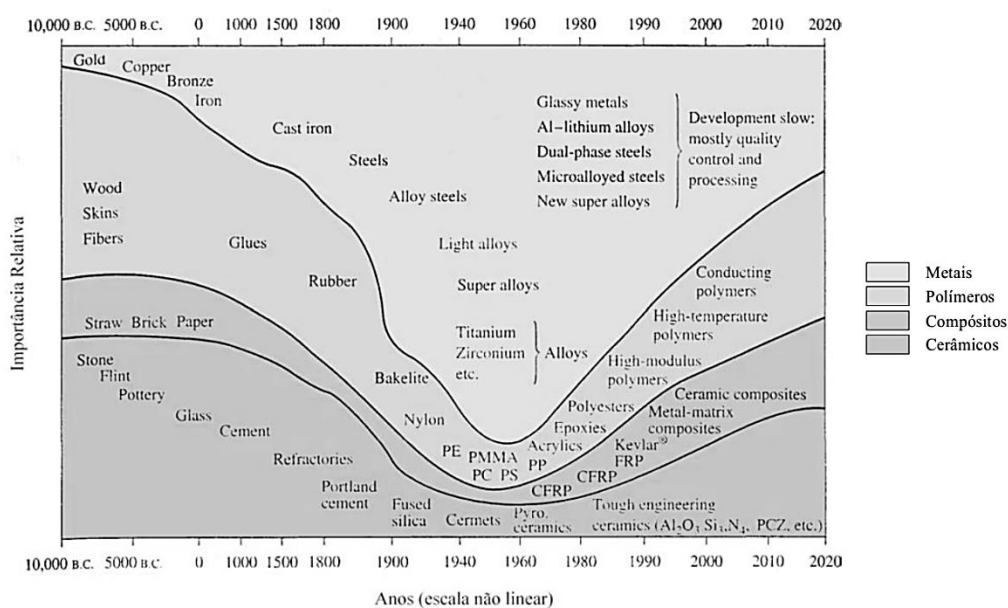


Figura 1 - Importância relativa dos materiais básicos na construção ao longo do tempo (Ashby, 1987)

Enquanto o conceito de materiais compósitos existe há vários séculos, a incorporação de fibras de reforço numa matriz polimérica é uma tecnologia relativamente recente, e só se tornou possível com o desenvolvimento da indústria dos plásticos, a partir do início do século XX (Firmo, 2010).

Na década de 1940, a indústria aeroespacial e naval foram as grandes impulsionadoras na criação de materiais plásticos reforçados com fibras, também conhecidos como FRPs (do inglês, Fiber Reinforced Polymer) destacando-se as aplicações de fibras de vidro embebidas em poliéster nos cascos de navios e coberturas de radar, devido à sua resistência a ambientes agressivos, ao bom comportamento térmico e eletromagnético e à sua boa relação resistência/peso (Correia, 2004). Ainda nessa década, devido à localização das plataformas em

alto mar, a indústria petrolífera torna-se num dos maiores consumidores de FRPs, utilizando-os em elementos estruturais ou tubagens devido à sua elevada resistência química (Gibson, 2005). No início da década de 1950, a indústria automóvel utiliza pela primeira vez este material nos seus componentes enquanto na indústria química, são utilizados na produção de pasta do papel, estações de tratamento de águas e esgotos e estações elétricas (Firmo, 2010).

O surgimento de “materiais compósitos avançados”, como as fibras de carbono, dotadas de elevadas resistência e elevado módulo de elasticidade remete à década de 1960, mas devido ao seu elevado preço comercial eram só utilizados para fins militares. Com a crise energética na década de 1970, houve um esforço na redução do custo de produção destes materiais, alargando-se a muitos campos de aplicação do dia-a-dia (Figura 2) como artigos desportivos (raquetes de ténis, equipamentos de ski ou canas de pesca) ou meios de transporte civis (carros e embarcações de recreio). Entre a década de 1980 e 1990, devido à evolução tecnológica de processo de fabrico como a pultrusão, verifica-se uma nova descida do custo dos FRPs. Surgem também os compósitos plásticos reforçados com fibras de aramida (Halliwell e Reynolds, 2004).

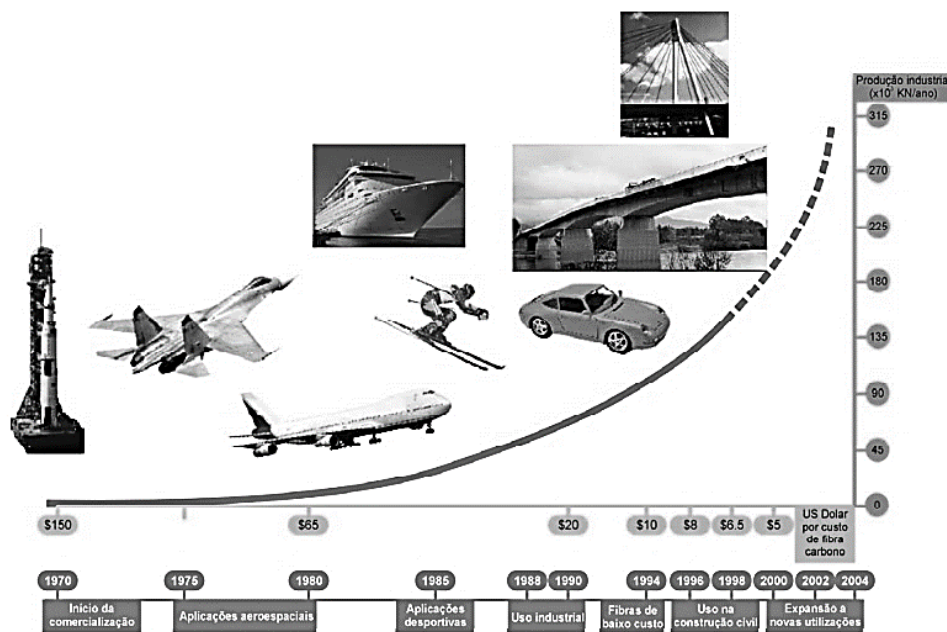


Figura 2 - Evolução no tempo da utilização da fibra de carbono em função do preço, da produção e do campo de aplicação (Juvandes, 1999).

A aplicação deste tipo de materiais no sector da construção surgiu com maior destaque por volta da década de 1980, coincidindo este momento com uma redução no custo de produção dos FRPs (Correia, 2012). Dois projetos onde se destacam a utilização destes materiais na construção foram “Monsanto House of the Future” (Figura 3a) e “American Pavilion in Brussels” (Figura 3b), onde se utilizou compósitos de fibra de vidro como revestimentos de fachada conferindo um aspeto moderno (Firmo, 2010).

Ultimamente estes materiais têm sido utilizados no campo de reparação e reforço estrutural, sendo neste tema que se vai debruçar este estudo. Segundo Meier (1997a) a primeira aplicação de um sistema de reforço FRP remete ao período de 1986/1987, especificamente na Europa, na ponte Kattenbusch (Alemanha). Foram utilizadas 20 tiras de laminados de polímero reforçado com fibras de vidro. Outro exemplo pioneiro foi a ponte İbach (Suíça) através da incorporação por colagem de laminados reforçados com fibras de carbono através de um sistema de resina epóxida (Juvandes et al. 1996a).

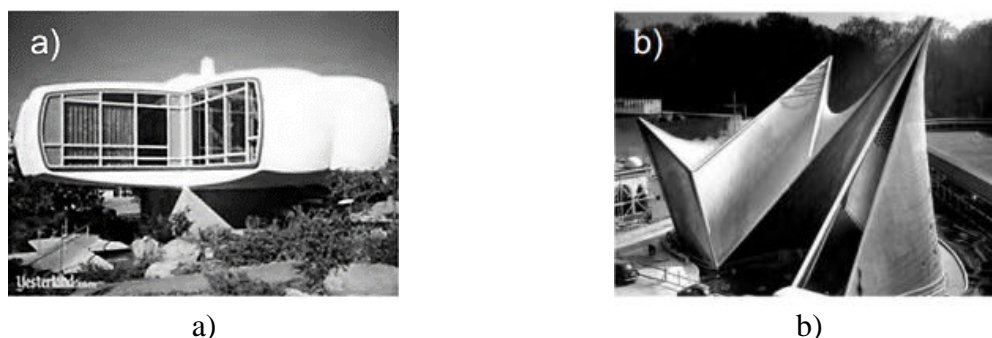


Figura 3 - Primeiros projetos onde se destacou a utilização de FRPs: a) “Monsanto House of the Future” – revestimentos em compósitos de fibras de vidro; b) “American Pavilion in Brussels” – fachadas totalmente em compósito de fibra de vidro (Firmo, 2010).

A aplicação de sistemas por colagem externa EBR (em inglês, “Externally Bonded Reinforcement”) de reforço com FRP, contínuos e unidirecionais em forma de manta ou multidirecionais em forma de tecidos, foram empregues pela primeira vez no Japão no ano de 1992 em situações de reforço ao sismo, à flexão e ao corte através do confinamento total ou parcial dos elementos estruturais. A reconstrução da cidade de Kobe, depois do sismo de Hanshin em 1995 é um exemplo do uso destes materiais como reparação ou reforço. (Juvandes, 1999).

Vantagens tais como a leveza, elevadas propriedades mecânicas e facilidade de aplicação, quando comparados com outros materiais e técnicas de reforço, fazem deste material uma escolha apropriada para fins de reforço. Sabe-se que a eficácia e fiabilidade desta técnica de reforço depende intrinsecamente da ligação entre o material compósito e o substrato e, por conseguinte, a sua caracterização e compreensão profunda é de crucial importância.

2.2 Materiais compósitos FRPs como reforço estrutural

Os FRPs – Polímeros reforçados com fibras são formados por agregação de fibras contínuas, numa matriz de resina termoendurecível que serve de material aglomerante. Esses compostos podem ser moldados em placas ou mantas adesivas e ligadas à superfície ao substrato (alvenaria ou betão) como um forma de reforço (Maruccio, 2010) (Figura 4).

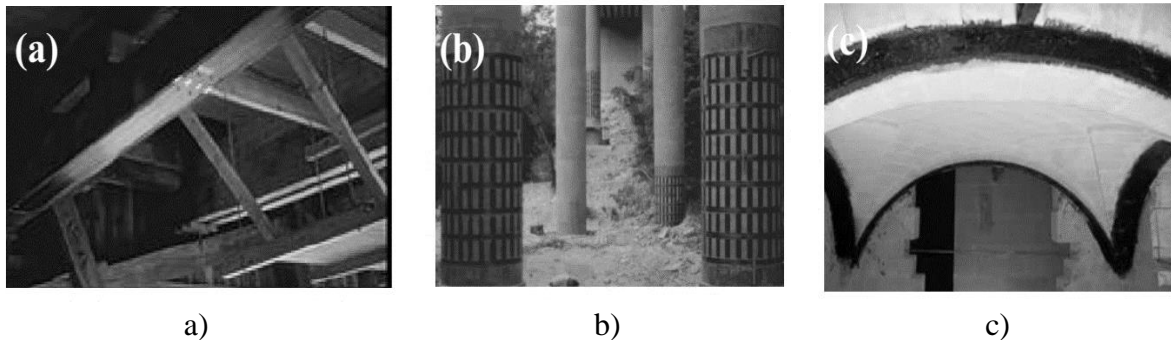


Figura 4 - Exemplo de aplicação de FRP como reforço exterior: a) Madeira; b) Betão; c) Alvenaria (Maruccio, 2010).

Esta família de compósitos é formada sobretudo por duas fases, as Fibras e a Matriz polimérica. A primeira fase é considerada o elemento estrutural principal dos materiais compósitos, sendo responsável pela resistência, rigidez, elevado módulo de elasticidade e tem o formato de finas fibras. Malek (1997) define fibras como materiais alongados com dimensão na razão de 10/1 (no mínimo), com uma secção transversal de $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e uma espessura máxima de 25mm. A matriz polimérica envolve completamente o sistema fibroso, protege contra ações diretas de agentes ambientais, assegura uma melhor distribuição de tensões do sistema fibroso e evita a micro-encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão. Por estas razões diz-se que a matriz tem características sinérgicas (Firmo, 2010).

Ao nível da construção civil, os sistemas de FRP do tipo mantas (com resina pré-impregnada) ou laminados pré-fabricados são os mais aplicados recorrendo ao EBR (Figura 5). Estes oferecem várias vantagens, como elevadas resistências mecânicas, facilidade de aplicação e leveza, tornando-os assim interessantes para fins de reforço (Ghiassi, 2013). Apesar destes benefícios, é sabido que o comportamento da aderência e durabilidade correspondente é afetado por diversos fatores, como as condições ambientais a que é exposto, o material compósito, o substrato, a adesão interfacial e a preparação da superfície.

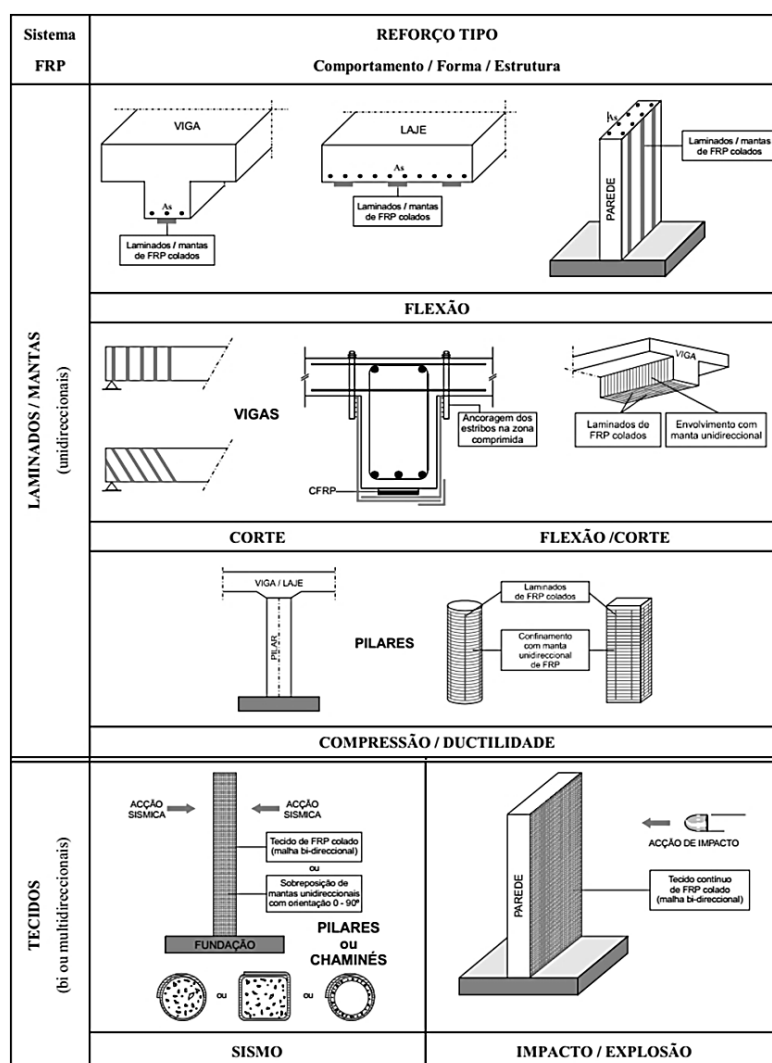


Figura 5 - Reforços tipo mais comuns com colagem de laminados, mantas e tecidos de FRP (Juvandes, 1999).

O comportamento final de um FRP é dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da interação entre estes materiais. Os fatores que influenciam esse comportamento são a orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras, as

propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz (Juvandes et al., 1996a). Em seguida serão apresentados os diferentes componentes do compósito FRP de uma forma detalhada, assim como a sua influência no comportamento da adesão entre o reforço e o substrato.

2.3 Fibras

As fibras contínuas são as mais adequadas para reforço de estruturas de alvenaria ou betão, devido à possibilidade de orientação numa direção específica com vista à otimização do seu desempenho estrutural (ACI 440R-96,1996; JCI TC952,1998). São as fibras que representam as componentes de resistência e rigidez do compósito, sendo as mais utilizadas as de vidro (G), de carbono (C) e aramida (A). O nome do reforço é caracterizado pelas fibras empregues, assim, os reforços mais empregues são os GFRP (polímeros reforçados com fibras de vidro), CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) e AFRP (polímeros reforçados com fibras de aramida), respetivamente. Na Tabela 1 pode-se observar as suas principais propriedades.

Tabela 1 - Principais propriedades das fibras mais utilizadas em engenharia civil para reforçar FRPs (Firmo, 2010).

Propriedades	Designação	Unidade	Vidro	Carbono	Aramida
Mecânicas	Resistência à tração	MPa	1800 - 4800	2000 - 6000	2900 - 4100
	Módulo de elasticidade	GPa	69 - 90	160 - 700	60 - 190
	Extensão de rotura	%	3.0 - 5.5	0.2 - 2.3	2.0 - 5.0
Físicas	Coefficiente de Poisson	-	0.4	0.3 - 0.4	0.2
	Massa volúmica	g/cm ³	2.5	1.7 - 2.1	1.5
	Diâmetro das fibras	µm	3 - 120	4 - 10	12
	Estruturas das fibras	-	Isotrópica	Anisotrópica	Anisotrópica
Térmicas	Coefficiente de dilatação térmica	10 ⁻⁶ /K	5.0 - 6.0	Axial: -1.3 a - 0.1 Radial: 18.0	-2.0
	Condutibilidade	W/(m°C)	1.3	8.5 - 70	-
Elétricas	Resistividade	Ω	4.0 (x10 ⁻¹⁴)	9.5 - 18(x10 ⁻⁶)	-

As fibras de vidro são as que possuem menor preço comercial, sendo por esta razão muito utilizadas na indústria da construção. Existem vários subtipos de fibras de vidro (com as designações E, S, AR, C), que apesar de possuírem igual módulo de elasticidade, os seus valores da resistência mecânica e resistência à corrosão diferem. A sua alta resistividade confere-lhe boas propriedades isolantes, mas geralmente apresentam os inconvenientes de serem suscetíveis

à rotura por fadiga, possuírem pouca resistência à humidade e a ambientes alcalinos, além do seu módulo de elasticidade ser relativamente reduzido (Keller, 2003).

As fibras de carbono, apesar de mais dispendiosas, possuem melhores resistências mecânicas (Figura 6) e módulo de elasticidade, associados a uma maior leveza. À temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela humidade e nem pela ação de vários solventes, ácidos e bases, sendo recomendadas para condições ambientais mais abrasivas.

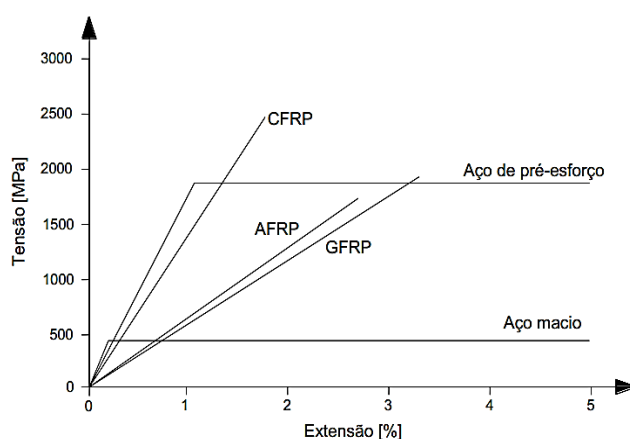


Figura 6 - Diagramas tensão-extensão de vários compósitos de FRP e dos aços macio e de pré-esforço (Abdelrahman e Rizkalla, 1998).

As fibras de aramida possuem resistências de tração e módulo de elasticidade compreendidas entre as fibras de vidro e carbono. Apresentam a inconveniência de serem suscetíveis à degradação por raios UV e rotura por fadiga (Keller, 2003). O seu fabrico, devido a operações de tecelagem, permite obter reforços na forma de filamentos contínuos ou na forma plana (mantas e tecidos de reforço também denominados por Kevlar®). Quanto ao seu campo de aplicação, este reforço é sobretudo utilizado em proteções balísticas, cordas e cabos, nas indústrias aeroespacial, marítima e automóvel (Smith, 1998). No ramo da construção destacam-se as aplicações em proteções de pilares para ações de explosão ou impacto.

2.4 Adesivos de colagem

A matriz polimérica, envolvendo completamente as fibras, transmite os esforços entre elas, protegendo-as das ações ambientais e servindo de material aglomerante. Assegura uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evita a micro-encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão. Por estas razões, considera-se que a matriz

possui propriedades sinérgicas (Juvandes, 1999). A matriz polimérica é constituída essencialmente por resina à qual podem ser adicionados materiais de enchimento (fillers) ou aditivos que acrescentam certas propriedades ao compósito, como catalisadores, aceleradores ou promotores. Hoje em dia existem dois grandes grupos de resinas, as termoplásticas e as termoendurecíveis. A grande diferença entre as duas está no comportamento quando expostas a temperaturas elevadas, as termoplásticas possuem uma capacidade múltipla de moldagem por intermédio de sucessivos aquecimentos e arrefecimentos enquanto as termoendurecíveis apenas podem ser moldadas uma vez. As mais utilizadas são as termoendurecíveis sobressaindo as resinas de poliéster, viniléster, epóxicas e fenólicas. Na Tabela 2 estão apresentadas as diferentes propriedades gerais das resinas.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (Firmo, 2010).

Propriedades	Unidade	Poliéster Não-saturada	Viniléster	Epóxida	Fenólicas
Resistência à tração	MPa	20-100	68-90	55-130	30-50
Módulo de elasticidade	GPa	2,0-4,1	3,5-5,2	2,0-4,1	3,6
Extensão na rotura	%	1,0-6,0	3,0-5,2	1,0-9,0	1,8-2,5
Massa Volúmica	g/cm ³	1,20-1,30	1,12-1,16	1,20-1,30	1,00-1,25
Temperatura de transição vítrea	°C	55-120	102-280	50-270	260

A resina é responsável pela união das fibras (assegurando a transmissão das cargas entre elas), por manter a correta posição das fibras (uma vez que a sua resistência é unidirecional), por proteger as fibras do meio envolvente e por garantir a ligação entre o substrato e o reforço exterior. A transferência de tensão ocorre nos planos das interfaces substrato-adesivo-compósito, onde se verificam tensões predominantemente de corte, embora tensões normais a essa interface também possam ocorrer. O adesivo estrutural mais utilizado é a resina epóxida sendo a sua viscosidade, o tempo de utilização, o tempo de cura, a toxicidade e a capacidade de endurecimento em contacto com a humidade ou água as propriedades mais importantes (Ribeiro, 1997). As suas principais propriedades encontram-se na Tabela 3.

A eficácia de materiais compósitos como uma técnica de reforço externo é intrinsecamente dependente do desempenho ligação entre o FRP e o substrato. Qualquer falha no adesivo pode resultar em uma falha descolamento prematuro. Assim, torna-se importante a clara compreensão de aspetos, como a durabilidade e desempenho a longo prazo, sendo fundamental para o projeto estrutural e previsão de vida útil (Ghiassi, 2013). O comportamento da aderência

entre FRP e o substrato de alvenaria/ depende de muitos fatores, incluindo a força do substrato, preparação da superfície, propriedades mecânicas (sobretudo a rigidez) do FRP, o comprimento e a largura da superfície de colagem do reforço (Ghiassi, 2013). A ligação entre dois materiais pode ser devido a qualquer um dos seguintes seis mecanismos de adesão: absorção, ligação mecânica, difusão, eletrostático, teoria da camada limite fraco e teoria de ligação química (Lee, 1991), sendo a técnica de adsorção e ligação mecânica as mais utilizadas e por isso explicadas em maior detalhe.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente dos adesivos epóxicos à temperatura ambiente (Firmo, 2010).

Propriedade	Unidade	Intervalo de Valores
Resistência à tração	MPa	9 - 55
Resistência à compressão	MPa	55 - 120
Resistência ao corte	MPa	10 - 30
Tensão de aderência do betão	MPa	2 - 8
Módulo de elasticidade	GPa	0,5 - 20
Módulo de distorção	GPa	0,2 - 8
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Extensão de rotura	%	0,5 - 5,0
Massa volúmica	g/cm ³	1,1 - 1,7
Temperatura de transição vítrea	°C	40 - 80

A teoria de adsorção, também conhecida como a teoria da termodinâmica, aplica-se ao resultado da adesão das forças intermoleculares entre dois materiais, que envolvem energias superficiais desenvolvidas entre os átomos das duas superfícies. Estas forças entre o adesivo e o substrato incluem ligações primárias, secundárias, de hidrogénio, iónicas, metálicas e covalentes; interações de Van der Waals e transições doadores-aceitadores. Foi observado experimentalmente que as ligações secundárias são os principais mecanismos de adesão, em muitas ligações adesivas (Kinloch, 1979).

A ligação mecânica estabelece-se quando o adesivo penetra nos poros da superfície do substrato por interligação mecânica, estando assim relacionada com o atrito entre o adesivo e o substrato e a rugosidade da superfície do substrato (Ghiassi, 2013).

A primeira pesquisa em tecnologia de ligação/placa FRP foi realizado no Laboratório Federal Suíço de Testes e Pesquisa de Materiais em 1984, onde vigas reforçadas com placas de FRP

foram testadas. Yuan (2004) afirma que as falhas verificadas em reforço de colagem em vigas de betão com chapas de FRP são muito semelhantes ao de chapas de aço e que o principal modo de falha do reforço e o substrato é sob a forma de corte que ocorre em alguns milímetros a partir da interface do substrato.

Quando um esforço de corte é submetido entre reforço FRP e o substrato, as tensões de tração resultantes da fissuração de corte são transferidos para o substrato. Antes do fenómeno de rotura, a ligação FRP e substrato é considerada perfeita (Lee et al, 1999). Sempre que a carga e as fissuras do substrato aumentam, chega-se a um pico de tensão de corte na extremidade da fissura, gerando-se um incremento da tensão de corte na região adjacente da extremidade da fissura. A diminuição da tensão de corte é sinal do aumento da fissura nessa região, ao passo que o aumento de tensão de corte na região adjacente mostra que as tensões estão a ser aplicadas nessa região (Bizindavyi e Neal, 1999). Esse fenómeno chamado de delaminação, progride até o descolamento completo.

O comportamento da aderência é avaliado com base na força de ligação, os perfis de extensão ao longo do comprimento de superfície colada, locais de perda de aderência e eficácia da passagem de tensões entre o reforço e o substrato. A força de ligação é geralmente limitada pela força de corte do substrato uma vez que a resistência à tração do FRP é superior. Tem sido observado que a força de ligação aumenta com o aumento do comprimento da área colada. No entanto, existe um limite de comprimento para o qual a força não aumenta, chamado comprimento de ligação efetivo (“effective bond length”) (Ghiassi, 2013).

A força de aderência aumenta com o aumento da força do substrato. Segundo Chajes et al (1996) se a rotura ocorre no substrato, a força de ligação é proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão do substrato. No caso de estruturas de betão, segundo Horiguchi e Saeki (1997), uma vez que a rotura na ligação ocorre no interior do betão, a resistência da ligação é independente do tipo de reforço utilizado e proporcional à potência de $2/3$ da resistência à compressão do substrato.

O tratamento da superfície que se pretende reforçar é fundamental para o bom desempenho do reforço, uma vez que as propriedades da superfície do substrato também afetam a resistência da ligação. Segundo as normas ACI 440 (2000) e ACI 546 (2001) deve-se eliminar qualquer fator na superfície do betão que possa constituir um ponto/zona de maior fragilidade, como por

exemplo, sujidade (pó ou óleos), pasta de cimento, corrosão das armaduras existentes, betão degradado ou menos resistente. Para tal, o jato de areia, moagem e abrasão mecânica melhora a resistência da ligação, até certo ponto (Horiguchi e Saeki,1997; Willis et al, 2009). Este aumento de resistência da ligação é devido à melhoria da interligação mecânica entre o material compósito e o substrato.

2.5 Influência de temperaturas elevadas

As elevadas temperaturas podem afetar o reforço FRP (Leone et al., 2009). As fibras são geralmente resistentes à temperatura (por exemplo, fibras de carbono, são resistentes a temperaturas até 600°C). Portanto, qualquer degradação de materiais compósitos, devido à exposição a condições de temperatura é devido à degradação da matriz ou de interface fibra/matriz (Ghiassi, 2013). As resinas e os adesivos, tratando-se de polímeros termoendurecíveis, quando é ultrapassada a sua temperatura de transição vítrea Tg (geralmente, no intervalo de 45°C a 82°C, segundo o ACI 440 (2000)) incitam modificações nas cadeias moleculares podendo provocar uma alteração do seu estado físico, perda das suas propriedades mecânicas (resistência e rigidez) e conseqüentemente o seu envelhecimento (Klamer, 2006; 2009).

Uma vez que o FRP e o substrato e/ou as fibras e resinas poderão ter coeficientes de dilatação térmica diferentes, serão introduzidas tensões entre estes materiais quando sujeitos a variações de temperatura gerando assim uma incompatibilidade térmica. A maioria das resinas epóxicas usadas como matrizes em FRP têm coeficientes de dilatação, no intervalo de 45 a $65 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, no entanto as fibras de vidro mais comuns possuem um coeficiente de $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e as fibras de carbono um coeficiente no intervalo de -0,2 a $0,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Mufti et al, 1991). O coeficiente de expansão térmica de tijolos de argila é da ordem de $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Kralj et al, 1991). No caso do CFRP, uma vez que a fibra é anisotrópica tendo um coeficiente positivo de dilatação térmica, na direção transversal e um coeficiente negativo, na direção longitudinal, resulta na separação entre a fibra e a resina (Abanilla et al, 2006). Isto é comum depois de ciclos térmicos, como através de repetidas exposições a congelamento e descongelamento.

Expondo as resinas epóxicas, a baixas temperaturas, resulta num aumento da suscetibilidade para assimilação de humidade e numa menor flexibilidade da matriz polimérica, com tendência a danos por fadiga. A humidade pode provocar uma diminuição de cerca de 10°C a 20°C na

temperatura de transição vítrea (T_g) e consequente perda das propriedades mecânicas do compósito, como indica a Figura 7.

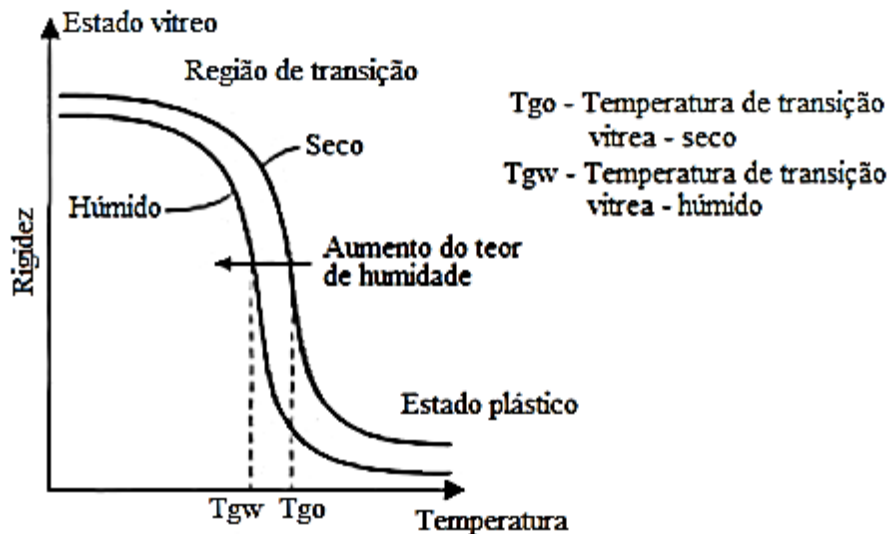


Figura 7 - Variação da rigidez e do T_g , com os efeitos higrotérmicos (Juvandes, 1999).

Por outro lado, a exposição a temperaturas elevadas resulta num aumento do coeficiente de difusão de humidade (aumento de absorção de humidade devido a abertura de poros e aparecimento de micro-fissurações onde se retém a humidade) e de pós-cura (aumento adicional da temperatura de cura de um sistema de FRP, para aumentar as ligações de polimerização) (Juvandes, 1999).

Existem poucos estudos experimentais sobre como podem as temperaturas elevadas influenciar o comportamento da aderência da manta de FRP ligado ao substrato de alvenaria. Testes de corte duplo foram feitos por Wu et al (2005) em provetes de CFRP-betão. A aplicação do reforço consistiu em duas etapas: uma primeira camada de primário foi aplicada inicialmente na superfície de betão, seguida pela aplicação do CFRP, utilizando como matriz polimérica uma resina epóxida aplicada em três camadas. Num conjunto de amostras, foi utilizado um primário comum e uma resina epóxida normal. Em seguida, os provetes foram expostos a quatro temperaturas diferentes (26, 30, 40 e 50°C). Os testes mostraram que a carga máxima diminuiu gradualmente à medida que a temperatura aumentou.

Klamer (2006; 2009) investigou o efeito da variação da temperatura no comportamento de descolagem das interfaces de CFRP-betão utilizando dois setups diferentes: testes de corte de dupla face e ensaios de flexão de três pontos em pequena escala. Nos ensaios de corte de dupla

face, os provetes foram expostos a oito temperaturas diferentes (-20, 20, 40, 50, 70, 80, 90 e 100°C). Os resultados do teste mostraram que a resistência aumentou inicialmente com o aumento da temperatura, até chegar à temperatura vítrea da resina de 62°C. Para temperaturas superiores verificou-se uma diminuição de capacidade de carga de rotura devido ao amolecimento do adesivo. A descolagem do reforço, para temperaturas entre -20°C a 50°C, deu-se devido a uma falha de conexão no betão adjacente à camada do adesivo enquanto para temperaturas entre 70°C a 100°C a descolagem se deu devido à falha na interface reforço-substrato (Klamer, 2006). Uma tendência semelhante para cargas últimas também foi observada para os testes de flexão em três pontos: primeiro a carga final aumentou com a temperatura e, em seguida, diminuiu (Klamer, 2009).

Cai (2008) estudou o comportamento de ligação entre mantas de CFRP aplicadas em substrato de betão, para temperaturas situadas entre 4°C a 180°C. Foi possível observar um aumento na carga máxima média de cerca de 35% para as amostras testadas a 40°C em relação aos provetes testados a baixa temperatura (4°C). A temperatura de 100°C resultou numa diminuição de 66% na carga de rotura média. Para temperaturas superiores a 100°C, verificou-se que a capacidade de carga se manteve constante.

Leone et al. (2009) também investigaram a influência da temperatura (20, 50, 65 e 80°C) no comportamento de ligação de compósitos FRP quando colados externamente a substrato de betão. Foram utilizados três tipos de reforço de FRP: mantas de CFRP e GFRP e placas de CFRP. No caso das mantas de CFRP, um aumento da temperatura no intervalo abaixo da temperatura vítrea T_g , resultou num aumento da capacidade de carga, enquanto para temperaturas superiores a T_g , a carga máxima diminuiu à medida que a temperatura aumentou. No caso das mantas de GFRP, os provetes foram expostos apenas a 20°C e 80°C, mostrando uma perda significativa da carga máxima a 80°C. No entanto, uma tendência diferente foi observada para as placas de CFRP. A capacidade de carga máxima a 50°C revelou-se inferior às verificadas para as temperaturas 20°C e 80°C. Os investigadores concluíram que provavelmente estes resultados seriam devidos à penetração insuficiente da substância adesiva no betão em algumas áreas do substrato.

Os ensaios laboratoriais acima analisados demonstram claramente que as temperaturas elevadas têm um efeito significativo sobre o comportamento da aderência do compósito de FRP quando aplicado no substrato de betão. Na maior parte dos estudos existentes, as tensões de rotura de ligação do sistema aumentou antes de a temperatura atingir a temperatura de transição vítrea.

Isto deveu-se ao efeito de tensões térmicas induzidas ao longo da interface do sistema FRP-betão, tal como explicado por Gao et al. (2012). A redução das tensões de rotura para temperaturas superiores à transição vítrea foi devida à degradação na ligação interfacial que pode ser descrita utilizando um modelo de perda de aderência por degradação. No desenvolvimento de um modelo de perda de aderência na interface do reforço e substrato por degradação por exposição de elevadas temperaturas, isola-se localmente a área que se pretende estudar de forma a que diferentes sistemas alterem o seu comportamento devido ao efeito de tensões térmicas (Dai et al, 2013).

2.6 Propriedades estáticas

Diversos tipos de ensaios têm sido realizados para caracterizar o comportamento da aderência em sistemas de FRP-betão, sendo que alguns ensaios já estão devidamente normalizados e regulamentadas por instituições como o ACI - American Concrete Institute. No caso de sistemas de FRP-alvenaria, devido à falta de um método de ensaio padrão, os mesmos ajustes de teste foram geralmente utilizados (Ghiassi, 2013). Alguns esforços têm sido feitos para desenvolver novos métodos personalizados para analisar o comportamento da aderência em sistemas FRP-alvenaria (Figura 8), como se pode observar em pesquisas feitas por Fedele e Milani (2010).

O ensaio de corte direto consiste na imposição de uma força de tração aos compósitos de FRP, aplicada segundo a direção longitudinal do compósito, tal como se mostra na Figura 9a. Geralmente os compósitos são colados numa das faces de provetes de betão, que podem ser cúbicos com uma aresta de 15 cm ou então com um dos lados mais alongado. Na colagem das fibras deve ser deixado livre um comprimento suficiente para que possam ser ligados a um equipamento mecânico que aplique a força. Das configurações de ensaio de arrancamento por corte mais comuns existe ainda outro denominado de corte duplo (“Double Shear Test”) em que o compósito é colado em duas faces do bloco como se pode verificar na Figura 9b (Cabral, 2012).

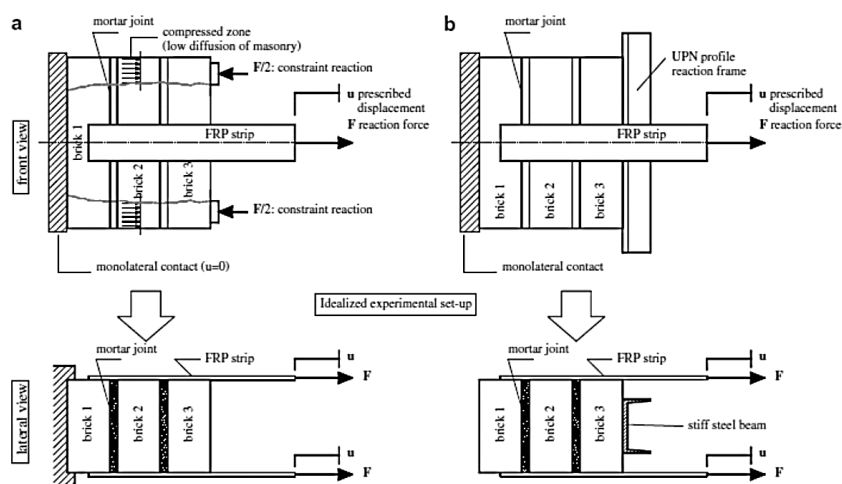


Figura 8 - Ensaios ao corte realizados por Fedele e Milani (2010) para o comportamento de aderência do sistema FRP-alvenaria.

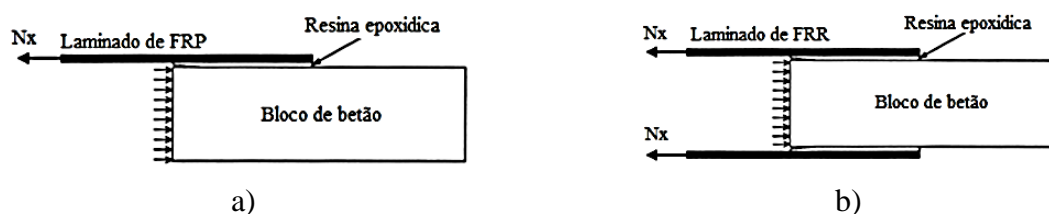


Figura 9 - a) Ensaio de corte direto; b) Ensaio de corte duplo (Cabral, 2012).

Geralmente, o comportamento de aderência entre o FRP e o substrato é avaliado com base na força de ligação, os perfis de extensão ao longo do comprimento do reforço, diagramas de força/deslocamento relativo e o comprimento de ligação efetivo (“effective bond length”).

Como a resistência à tração do reforço é maior que a do substrato, a resistência de ligação do sistema, naturalmente é limitada pela resistência ao corte do substrato ou da força de aderência do sistema FRP-substrato. Várias investigações têm demonstrado que a força de aderência aumenta com o comprimento de reforço colado, no entanto existe um limite para o qual a força deixa de aumentar, denominado por comprimento de ligação efetiva. Isto significa que a solicitação só terá efeito numa área delimitada pelo comprimento de ligação efetiva, assim quando este comprimento é ultrapassado, no caso de arrancamento, verifica-se uma delaminação progressiva, onde as tensões de corte se dissipam para fora das regiões ligadas. O “effective bond length” está relacionado com a geometria do provete, a largura de FRP e a rigidez de FRP (Maeda et al, 1997; Bizindavyi e Neal, 1999).

Ghiassi (2013) investigou o comportamento de aderência ao corte do sistema GFRP-tijolo, através do ensaio ao corte direto para baixas taxas de deformação. Os resultados foram utilizados nesta tese como valores de referência para a análise dos resultados dos ensaios com taxas de deformação elevadas. Os testes realizaram-se utilizando uma prensa hidráulica de tração existente no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, com uma capacidade máxima de carga de 50 kN. As amostras foram colocadas numa estrutura de aço rígida, como mostrado na Figura 10a, de forma a evitar distorções na aplicação da carga. A carga resultante foi medida por meio de uma célula de carga enquanto o deslocamento relativo entre o GFRP e o substrato de alvenaria foi medido com os LVDTs colados ao longo do comprimento do reforço colado (Figura 10b). Foram realizados cinco ensaios tendo sido obtido em média, a capacidade de carga máxima de 9,22 kN e um deslocamento relativo máximo de 1,43 mm para o arrancamento do reforço por corte direto. Nas Figura 11 e Figura 12 estão representados os perfis de capacidade de carga e deslocamento relativo máximos obtidos nos ensaios.

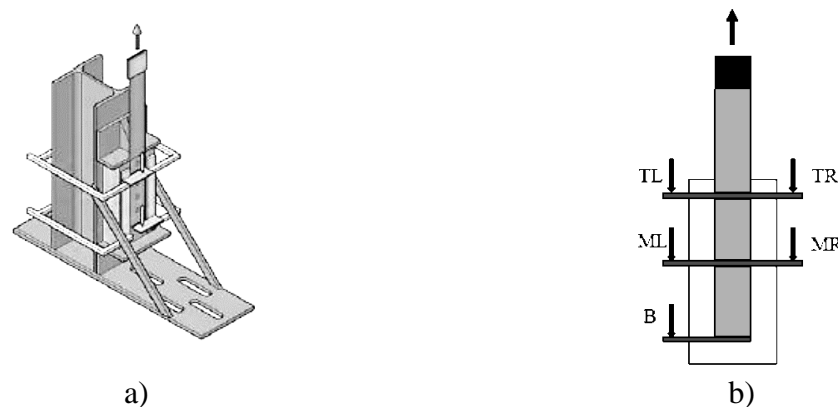


Figura 10 - Set-up ensaio de corte direto: a) Configuração do ensaio; b) Colocação dos LVDTs no provete (Ghiassi, 2013).

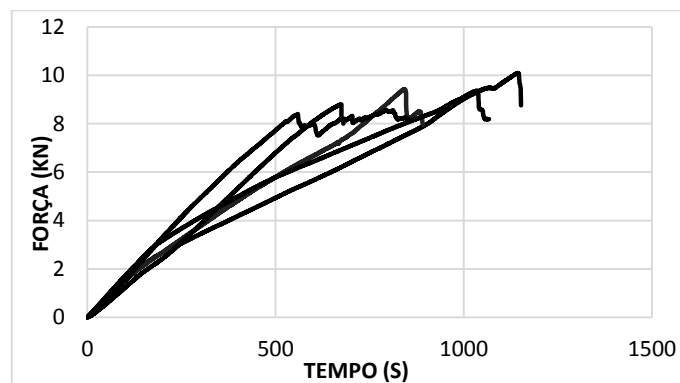


Figura 11 - Ensaio estático de corte direto em sistemas GFRP-tijolo: Força vs. tempo (Ghiassi, 2013).

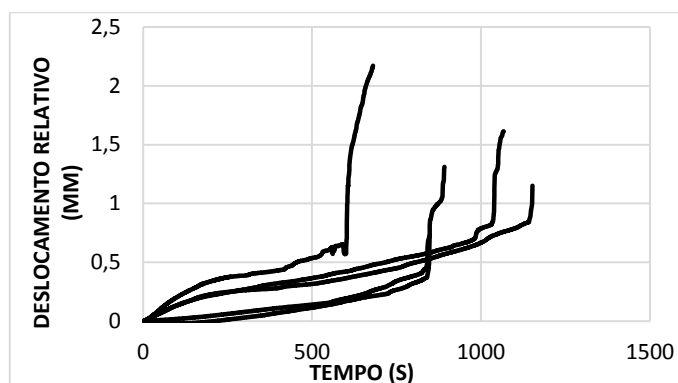


Figura 12 - Ensaio estático de corte direto em sistemas GFRP-tijolo: Deslocamento relativo vs. tempo (Ghiassi, 2013).

2.7 Propriedades dinâmicas

Eventos mundiais recentes, como atentados em Nova Iorque (2001), Madrid (2004) e Londres (2005) têm destacado a suscetibilidade de muitas estruturas civis a um ataque terrorista causando danos e perdas de vida consideráveis. Como resultado, reforçou-se o interesse do estudo das propriedades dinâmicas dos materiais através de procedimentos experimentais ou modelos de elementos finitos de forma a aumentar a resistência à explosão de muitos tipos de estruturas existentes (Buchan et al, 2006; Pereira, 2014).

Uma estrutura, no seu período de vida útil, está sujeita a diversos tipos de ações que são classificadas quanto à sua frequência (permanente, variáveis, acidental) ou de acordo com a sua natureza. Quanto à natureza, as ações podem ser classificadas como estáticas, associadas a velocidades de deformação baixas (geralmente são cargas permanentes ou variáveis) ou como ações dinâmicas, associadas a velocidades de deformação mais elevadas (cargas acidentais) (Eurocódigo 0, 2009).

Num diagrama (Figura 13) apresentado por Riisgaard et al (2007), estão classificados vários tipos de ações que uma dada estrutura pode estar sujeita, tendo em conta as velocidades de deformação. Como se pode observar, os carregamentos quase-estáticos produzem velocidades de deformação na ordem dos $10^{-6}/s$, enquanto impactos e explosões produzem velocidades de deformação acima dos $10^1/s$. A taxa de deformação ou velocidade de deformação (“strain rate”) é definida com sendo a variação da deformação por unidade de tempo.

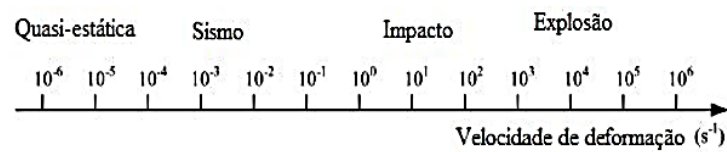


Figura 13 - Taxas de deformação esperadas para diferentes tipos de carga (Riisgaard et al., 2007)

Devido às características dinâmicas de cargas impulsivas, o comportamento da aderência entre FRP e o substrato pode ser muito diferente daquele em condições normais de carga estática. Para se caracterizar o comportamento dinâmico recorre-se, geralmente, a gráficos de FID (“DIF - Dynamic Increase Factors”) com diferentes taxas de deformação. O fator de incremento dinâmico (FID) foi introduzido por CEB-FIP (1990) e estabelece a relação entre as propriedades estáticas e dinâmicas para um dado material. Neste trabalho será estudado o FID em relação à capacidade de carga máxima, usando como valores estáticos de referência o trabalho conduzido por Ghiassi (2013).

Nos ensaios a realizar neste trabalho será utilizada uma torre de queda “Drop-weight” (DW). Este mecanismo permite a queda livre de uma massa suspensa para gerar uma ação dinâmica sobre o provete. Com esta técnica é possível realizar ensaios com carregamentos elevados e obter elevadas velocidades de deformação. Forças até 900 kN são geradas a partir de massas de 225 a 1000 kg, suspensas a cerca de 2,5m em ensaios que podem durar 0,1 a 20 ms (Ferreira, 2003).

Recentemente, vários estudos têm sido feitos na Universidade do Minho no âmbito da caracterização do comportamento dinâmico de diferentes materiais de alvenaria utilizando uma torre de impacto “drop-weight”. Silva (2012) e Dias (2013) utilizaram um procedimento experimental semelhante ao que será usado neste trabalho (Figura 14), com o objetivo de investigar a influência das velocidades de deformação no comportamento em compressão de alvenaria e seus constituintes (Figura 15).

As propriedades dinâmicas do reforço composto FRP foram também estudadas isoladamente. Al-Zubaidy et al (2011) estudaram a resistência mecânica do reforço CFRP em mantas com resina epóxida quando sujeitas a diferentes velocidades de deformação (54,2, 67,2 e 87,4 s^{-1})

originadas pelo impacto de uma massa de 156 kg largado de diferentes alturas. Concluíram que com o aumento da velocidade de deformação, as propriedades mecânicas dos constituintes também aumentaram tendo-se verificado uma maior influência na resina (aumentos de capacidade de carga de 20% a 40% para o CFRP e 220% para a resina comparativamente aos valores estáticos).

Outros autores dedicaram-se ao estudo de caracterização do comportamento dinâmico de sistemas reforçados com FRP. Min et al (2010) estudaram vigas de betão reforçadas com fibras de carbono (CFRP) e aramida (AFRP), aplicadas em torno de vigas com a forma de “U”, quando sujeitos a testes estáticos e dinâmicos. Os testes de impacto foram realizados com uma torre “drop-weight” (Figura 16), largando um peso de 33,62 kg a uma altura de 0,7 m em queda livre. No final, obtiveram maiores deformações nas vigas reforçadas, resultando numa maior energia dissipada verificando um melhor comportamento à flexão.

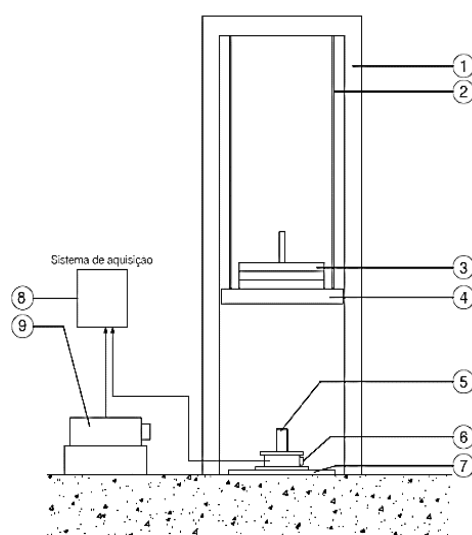


Figura 14 - Esquema geral de ensaio em Silva (2012) e Dias (2013): 1) Estrutura metálica; 2) Guias de suporte; 3) Pesos adicionais; 4) Martelo; 5) Provete; 6) Célula de carga; 7) Base metálica; 8) Sistema de aquisição; 9) Equipamento de vídeo de alta velocidade.

Al-Zubaidy et al (2012) caracterizaram a ligação entre juntas metálicas de cinta dupla de CFRP, quando sujeitas a cargas de impacto com velocidades de deformação de 2 mm/min, 3,35, 4,43 e 5 m/s com teste de corte duplo (Figura 17). Foram estudadas a capacidade de carga máxima, o comprimento efetivo de ligação, modos de rotura, diferentes comprimentos de ligação e diferentes números de camadas de reforço. No fim concluíram que a utilização de várias

camadas de reforço era ineficaz, o comprimento efetivo de ligação é independente da velocidade de deformação, os modos de rotura entre as condições estáticas e dinâmicas eram idênticas e a capacidade de ligação máxima deu-se para a velocidade de deformação de 3,35 m/s.

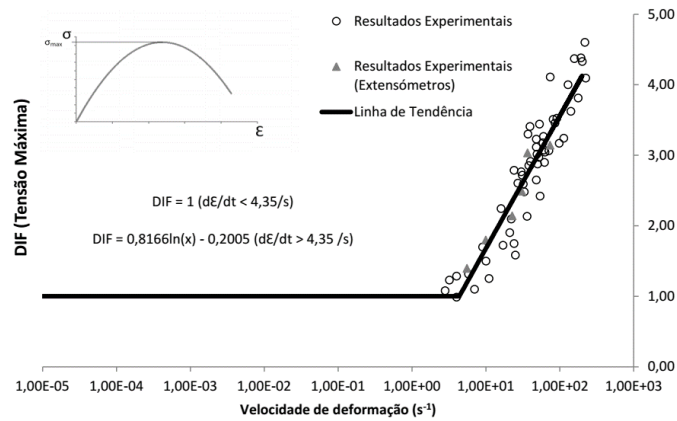


Figura 15 - FID da tensão máxima do tijolo em compressão (Dias, 2013).

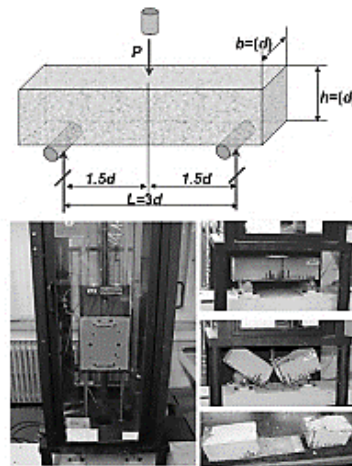


Figura 16 - Configuração dos testes de impacto realizados por Min et al (2010).

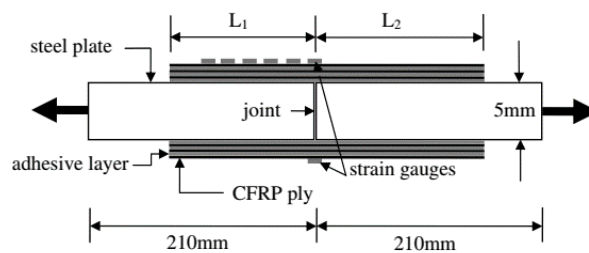


Figura 17 - Configuração de ensaio de corte duplo aplicando cargas de impacto realizados por Al-Zubaidy et al (2011).

Capítulo 3

3 PREPARAÇÃO DE PROVETES

Neste capítulo serão apresentados, de forma detalhada, os processos de preparação dos provetes que serão posteriormente ensaiados. De um modo geral, a técnica de aplicação de um reforço exterior envolve duas fases: a preparação da superfície a colar, neste caso de tijolo ou betão, (primeira fase) e a aplicação do reforço (segunda fase).

3.1 Tratamento da superfície de ligação (1ª Fase)

A preparação das superfícies de interface entre o substrato (tijolo ou betão) e o compósito (GFRP ou CFRP) deve ser bem cuidada, de modo a obter condições necessárias à boa aderência do adesivo (Juvandes, 1999). Nesse sentido, expõem-se de seguida os processos e produtos utilizados no tratamento das superfícies de ligação nos substratos de tijolo e betão.

3.1.1 Tijolo

Para a realização deste trabalho foram utilizados 113 tijolos de dimensões 200x100x55 mm (Figura 18a). Estes tijolos são semelhantes aos já utilizados por outros autores onde é possível

encontrar uma caracterização mecânica e física dos mesmos (Fernandes et al., 2010; Ghiassi, 2013). Inicialmente os tijolos foram sujeitos a um polimento (aproximadamente 7 mm) na sua face principal, isto é, na face onde é colocado o reforço. Este polimento foi executado com recurso a uma retificadora presente no Laboratório de Materiais da Universidade do Minho (Figura 18b). O objetivo é melhorar a capacidade mecânica e química da aderência entre o reforço e o substrato removendo uma camada superficial do tijolo (Ghiassi, 2013). Além deste polimento superficial, nos provetes destinados aos ensaios de impacto, foi ainda necessário arredondar uma das arestas com recurso a lima (Figura 18c), para que, durante o ensaio e em caso de contato entre o reforço e o tijolo, a aresta não cause dano no reforço. Depois deste tratamento superficial, os tijolos foram lavados (Figura 18d) e colocados num forno a 100 °C por um período de 24 horas.

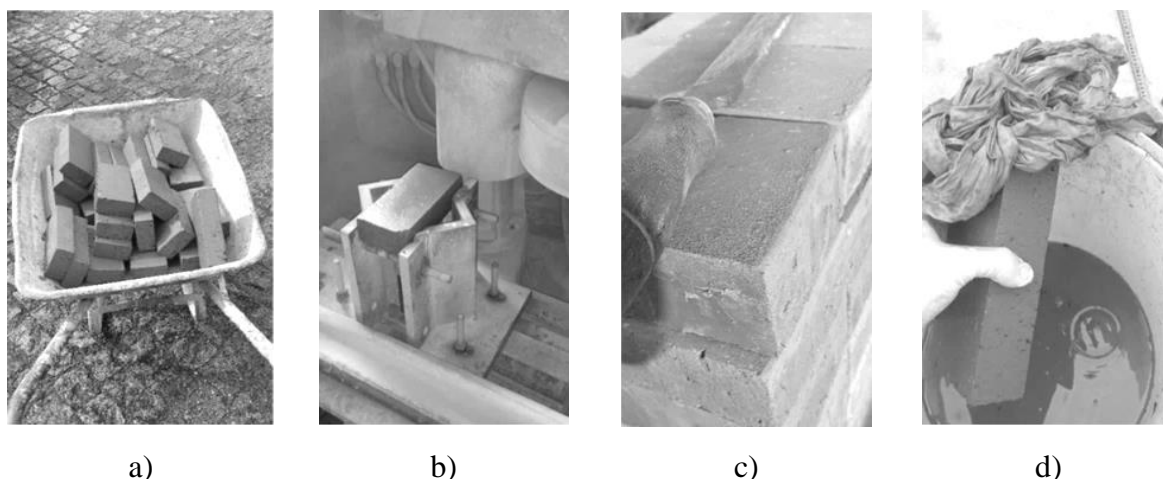


Figura 18 - Processo de preparação dos tijolos: a) tijolo cerâmico 200x100x55 mm; b) retificação de superfícies; c) arredondamento de arestas; d) lavagem.

Depois de retirados do forno, os provetes são limpos com recurso a jato de ar. A limpeza dos provetes é importante para que seja reduzida a possibilidade de ocorrer algum ponto de debilidade na ligação entre o reforço e o substrato. Para que a camada do primário e o reforço sejam aplicados apenas na área selecionada, a zona de aplicação do reforço é marcada e a área restante do tijolo é protegida com fita-cola de papel (Figura 19).



Figura 19 - Provetes de tijolo prontos para aplicação do primário.

3.1.2 Betão

Para os provetes de betão foram construídos moldes propositadamente para este efeito. De forma a não alterar os equipamentos disponíveis para a execução dos ensaios, as dimensões dos provetes de betão são as mesmas dos tijolos (200x100x55 mm). Foram betonados 108 provetes de betão (Figura 20a), bem como alguns provetes de dimensões normalizadas (Figura 20b) para caracterização da resistência à compressão do betão ao fim de 28 dias (Figura 20c). O betão foi produzido com a seguinte composição:

- Cimento 32,5 – 480 kg/m³
- Meia Areia de rio – 600 kg/m³
- Brita de granito – 1150 kg/m³ (d_{max}= 4 a 11 mm)
- Razão de água/cimento – 0.5

Foram necessárias duas amassaduras de 70 litros cada para produzir os provetes. Antes de colocar o betão nos moldes, estes foram pincelados com óleo descofrante para facilitar a descofragem. Depois de encher os moldes estes foram vibrados com recurso a mesa de vibração e resguardados durante 48 horas, sendo descofrados no final dessas 48 horas.

Ao fim de 28 dias os cubos e cilindros foram ensaiadas em compressão (Figura 21) conforme a norma NP EN 206-1 (2007). De acordo com o Eurocódigo 2 (2009) o betão produzido é de classe C30/37 obtendo-se uma resistência à compressão para os provetes cúbicos de 42,0 MPa. Os resultados obtidos estão apresentados no ANEXO A.

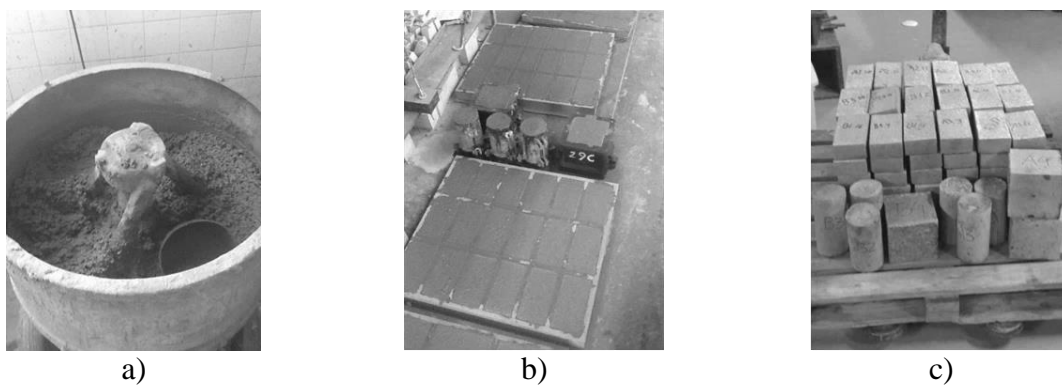


Figura 20 - Fabrico dos provetes de betão: a) Betonagem; b) Enchimento dos moldes com betão; c) Blocos depois da descofragem.

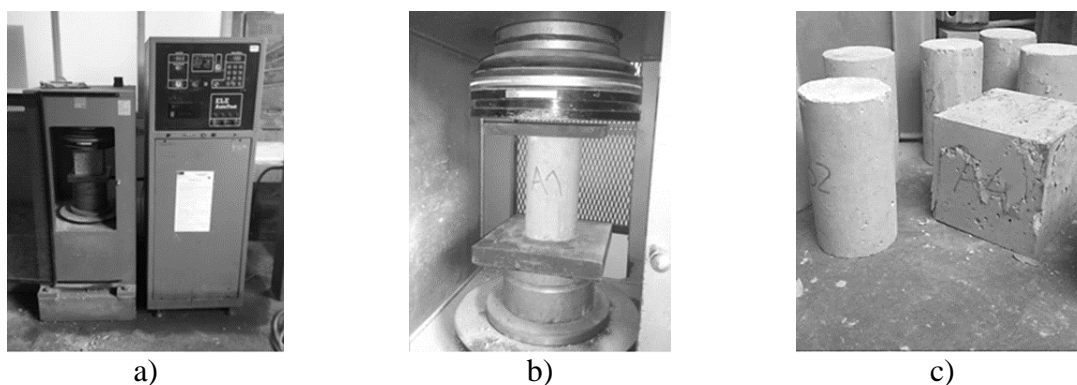


Figura 21 - Caracterização do betão: a) Máquina de compressão uniaxial; b) Ensaio de resistência à compressão de um provete cilíndrico; c) Provetes depois de ensaiados.

O tratamento da superfície dos provetes de betão é semelhante ao tratamento dos provetes de tijolo. A superfície onde é aplicado o reforço é alisada com recurso a uma rebarbadora, nos provetes para os ensaios de impacto uma das arestas também é arredondada com recurso a lima e os provetes são posteriormente limpos com recurso a jato de ar. Depois de limpos os provetes, a área onde é aplicado o reforço é delimitada com fita-cola de papel (Figura 22).

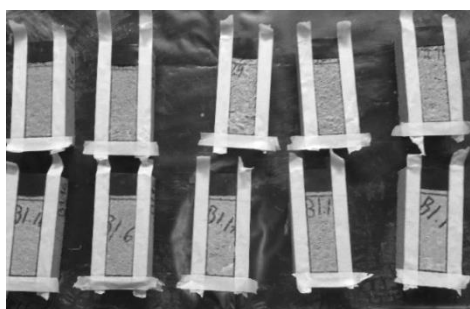


Figura 22 - Provetes de betão prontos para aplicação do primário.

3.2 Aplicação do reforço exterior (2ª Fase)

Na segunda fase de preparação de provetes é colocado o reforço nas superfícies previamente tratadas. Inicialmente é aplicado um primário do tipo MAPEWRAP PRIMER 1 em toda a área de reforço de forma a corrigir as irregularidades do substrato e assim melhorar a capacidade de aderência. A área de reforço varia conforme o ensaio a executar e a informação geométrica pode ser vista na Figura 23. Os provetes de tijolo foram reforçados com GFRP (“Glass Fibre Reinforced Polymer”) com fibra de vidro MAPEWRAP G UNI-AX e uma cola epóxida MAPEWRAP 31 (Figura 24a). As propriedades dos componentes do sistema tijolo-GFRP encontram-se na Tabela 4. Os provetes de betão foram reforçados com CFRP (“Carbon Fibre Reinforced Polymer”) com fibra S&P C-SHEET 240 e cola epóxida S&P RESIN 55 (Figura 24b). As suas propriedades foram retiradas do catálogo do fabricante e podem ser visualizadas no ANEXO B. O método de aplicação de reforço é semelhante, apenas se alterando os materiais aplicados:

1. Recortar as fibras em tiras, com as dimensões de 400x50 mm para os provetes de pull-out (Figura 23a) e 200x80 mm para os provetes de pull-off (Figura 23b). Nas tiras para os provetes de pull-out são ainda colocadas duas chapas metálicas numa das extremidades para servir de amarração no sistema de ensaio.
2. No substrato é aplicada uma camada de cola epóxida na área a reforçar com recurso a uma trincha.
3. Na tira de fibras é aplicada uma camada de cola epóxida e posteriormente esta é posicionada devidamente no local a reforçar. De seguida, com recurso a rolo de espuma de poliéster, garante-se que existe um contato total entre as fibras e a área de reforço.
4. É aplicada uma nova camada de resina epóxida na face superior da tira e usado novamente o rolo para garantir uma boa distribuição da resina.
5. Passados 60 minutos é retirada a fita-cola de papel e os provetes são resguardados durante o tempo de cura que se pretende. No caso destes provetes o tempo de cura foi de 3 semanas.

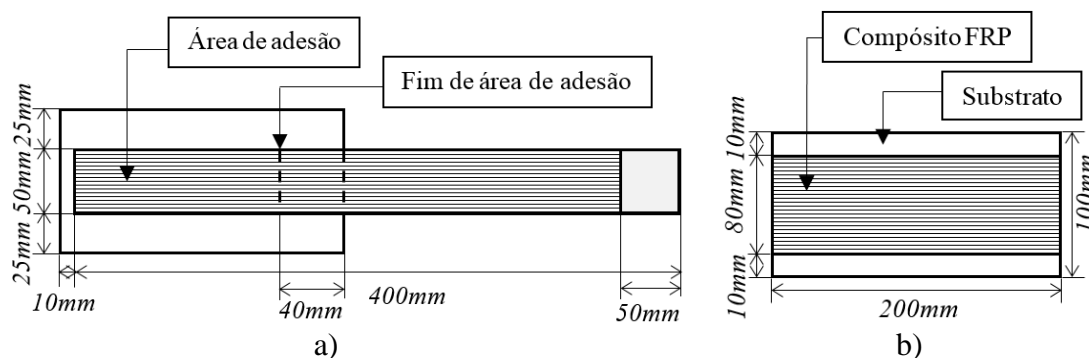


Figura 23 - Configurações geométricas utilizadas nos provetes: a) Ensaio Pull-out; b) Ensaio Pull-off.



Figura 24 - Preparação de provetes: a) Aplicação do GFRP em tijolos; b) Aplicação do CFRP em betão.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais usados nos provetes ensaiados por Ghiassi (2013).

Tijolo	
Resistência à compressão	14,3 MPa
Resina epóxida	
Resistência à tração	53,8 MPa
Módulo de Elasticidade	2,5 GPa
Extensão de rotura	2,6 %
Temperatura vítrea	70°C
Primário	
Resistência à tração	55,3 MPa
Módulo de Elasticidade	2,9 GPa
Extensão de rotura	2,1 %
Manta GFRP	
Resistência à tração	1250,0 MPa
Módulo de Elasticidade	79,2 GPa
Extensão de rotura	1,9 %

3.3 Aplicação da camada de argamassa

No caso dos provetes para os ensaios de Pull-off (elevadas temperaturas) foi ainda estudada a possibilidade da utilização de uma camada de proteção/isolamento do reforço com recurso a uma argamassa simples. Foi aplicada uma camada de argamassa em metade dos provetes, cerca de 50 provetes. O método de fabrico e aplicação da argamassa é apresentado de seguida.

Na produção da argamassa, foi utilizada a razão de 1 kg de argamassa pré-doseada ALBERIA STRUTTURA para 0,240 kg de água colocando primeiro a mistura no recipiente da batedeira e adicionando água lentamente. Em seguida, ligar a batedeira (Figura 25a) por 4 minutos na velocidade mais baixa, repousar 1 minuto e em seguida ligar novamente na velocidade mais alta por mais 4 minutos. Depois de fabricada a argamassa, esta foi aplicada rapidamente com uma espátula de forma a criar uma camada uniformizada e regular, sobre o reforço, com aproximadamente 10 mm de espessura (ver Figura 25b).

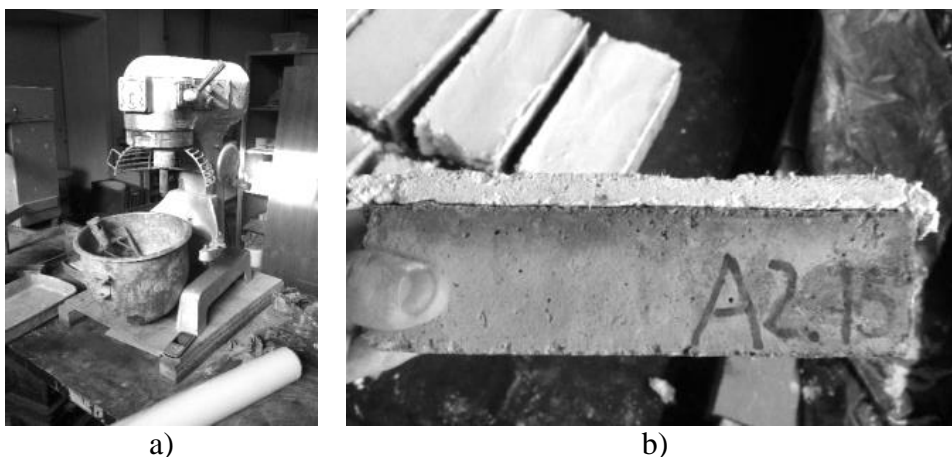


Figura 25 - Revestimento em argamassa: a) Batedeira utilizada na produção da argamassa;
b) Aplicação da camada de argamassa.

Capítulo 4

4 EFEITO DE TEMPERATURAS ELEVADAS

Este programa experimental tem como objetivo investigar o efeito de temperaturas elevadas no desempenho da aderência entre compósitos de FRP e substratos de tijolo e betão. O comportamento da ligação entre o substrato e o reforço é avaliado com recurso a ensaios de arrancamento por tração (pull-off) após a exposição num forno a diferentes temperaturas constantes por diferentes períodos de tempo (Tabela 5). Depois de retirados do forno, os provetes são mantidos à temperatura ambiente durante pelo menos 24 horas. Foram preparados e testados um total de 100 provetes, tendo sido realizados dois testes por provete.

Para cada tempo de exposição, dois provetes com camada de argamassa simples e sem argamassa são retirados do forno, resultando em quatro provetes para cada tempo de exposição (Figura 26). Os equipamentos e os sistemas de aquisição de dados utilizados foram disponibilizados pelo Laboratório de Estruturas (LEST) e o Laboratório de Materiais da Universidade do Minho.

Tabela 5 - Programa de exposição

Temperatura	70°C	100°C	280°C	500°C
Tempos de exposição	1 hora	1 hora	1 hora	1 hora
	2,5 horas	2,5 horas	2,5 horas	2,5 horas
	4 horas	4 horas	4 horas	4 horas



Figura 26 - Provets com e sem argamassa dispostos no forno antes de serem sujeitos a qualquer ação.

4.1 Ensaios de arrancamento por tração (PULL-OFF)

Os ensaios de arrancamento por tração ou “Pull-off” são normalmente realizados “in situ” para avaliar o desempenho de ligação entre materiais e uma superfície de um dado substrato. O teste consiste na medição da força de tração necessária para o arrancamento dos discos metálicos previamente colados, com recurso a resina epóxida, ao material que se pretende estudar a ligação. O valor da tensão de tração, $f_{ct,p}$ (neste contexto admite-se igual à tensão de aderência) obtém-se dividindo o esforço de tração na rotura F_t pela secção do disco A_p .

$$f_{ctm,p} = \frac{F_t}{A_p} \quad (1)$$

Apesar dos resultados obtidos representarem a resistência de adesão local entre o material compósito e o substrato, estes não representam o comportamento da ligação global do reforço, uma vez que podem representar áreas de menor adesão do reforço. A configuração utilizada é idêntica à da Figura 27 onde são colocados 2 discos para execução do ensaio. Cada provete permite a execução de dois ensaios Pull-off.

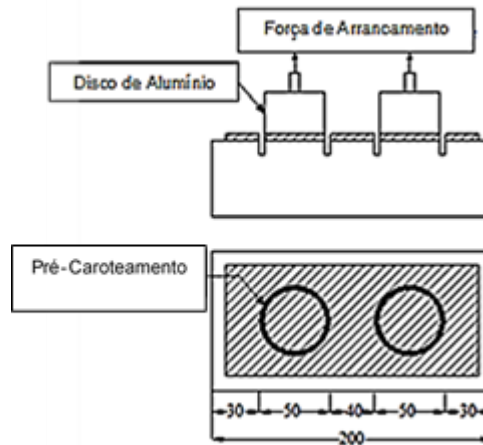


Figura 27 - Setup do teste Pull-off (Ghiassi, 2013).

4.2 Procedimento experimental

Os testes de Pull-off são realizados de acordo com as sugestões fornecidas pela ASTM D4541-09 (2009). Utilizando uma caroteadora com um diâmetro de 50 mm (Figura 28a), os provetes são perfurados nas zonas de teste, com uma profundidade aproximada de 7 mm (Figura 28b). Em seguida, coloca-se papel nas carotes para se certificar que o adesivo não passa da superfície horizontal e colam-se os discos de alumínio sobre a superfície de FRP utilizando um adesivo, SIKADUR 31. Dois ensaios de arrancamento são realizados em cada provete, como mostrado na Figura 28c. É de destacar que nos provetes de tijolo-GFRP expostos à temperatura de 280 graus e nos sistemas betão-CFRP, se utilizou o adesivo SIKADUR 32 uma vez que é mais líquido, formando uma camada mais fina, diminuindo assim o risco de envolver a superfície lateral das carotes e consecutivamente a interface de ligação do sistema.

Os testes são realizados utilizando uma prensa hidráulica de tração com uma célula de carga máxima de 25 kN (Figura 29a). As amostras são fixadas na estrutura de aço e os discos são então tracionados a uma taxa de $3 \mu\text{m}/\text{s}$, sob condições de controlo do deslocamento e a carga resultante é medida por meio de uma célula de carga. Os modos de rotura que podem ser observados neste tipo de ensaio podem ser: a) pelo substrato (Figura 29b); b) pela interface entre a resina e o substrato (Figura 29c); e c) pelo FRP.

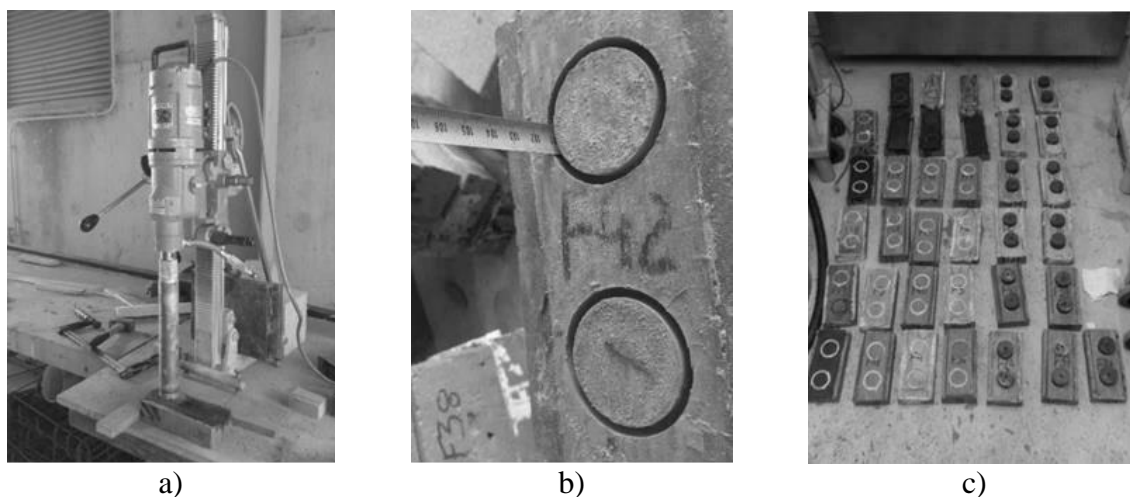


Figura 28 - Preparação dos ensaios Pull-off: a) Caroteadora de 50 mm de diâmetro; b) Pormenor de medição da profundidade da carote; c) Colagem de pastilhas metálicas de 45 mm de diâmetro.

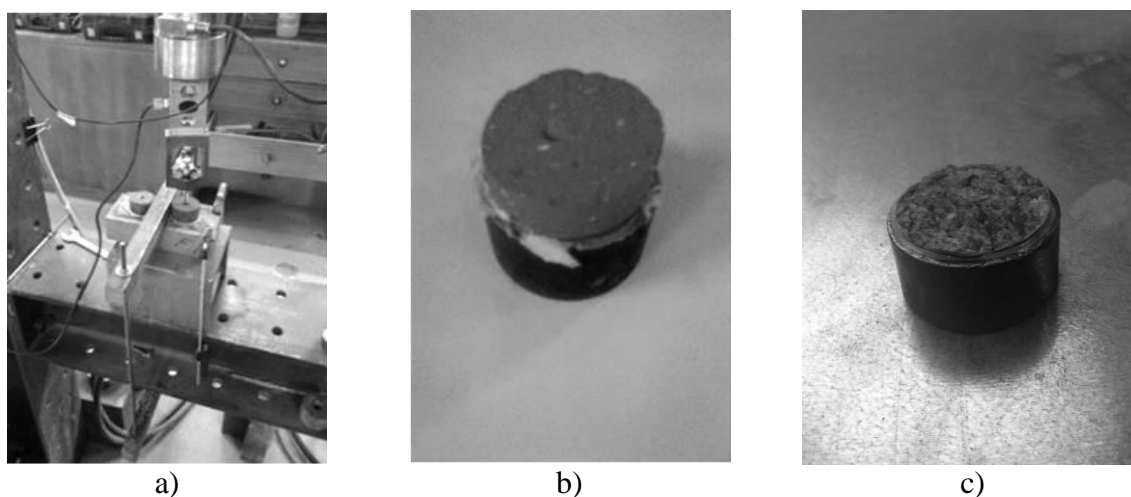


Figura 29 - Ensaios Pull-off: a) Prensa hidráulica; b) Pormenor do modo de rotura pelo tijolo; c) Pormenor do modo de rotura pela ligação do sistema (resina).

Segundo a Concrete Society (2000), o valor da resistência à tração do betão dado pelo ensaio de arrancamento por tração, no caso do modo de rotura pelo betão, pode ser estimado a partir da resistência à compressão do betão em cubos pela seguinte expressão:

$$f_{ctm,p} = 0,18 \times f_{cm}^{2/3} \quad (2)$$

4.3 Sistemas Tijolo-GFRP

Após a exposição dos provetes às temperaturas selecionadas, estes são alvo de uma primeira análise, em termos visuais, do estado do reforço. No caso dos sistemas de reforço tijolo-CFRP e para as temperaturas de 70°C (1Tg) e 100°C (1,4Tg), em geral, não se verificou qualquer alteração de cor ou dano visível (Figura 30) após o período de exposição.

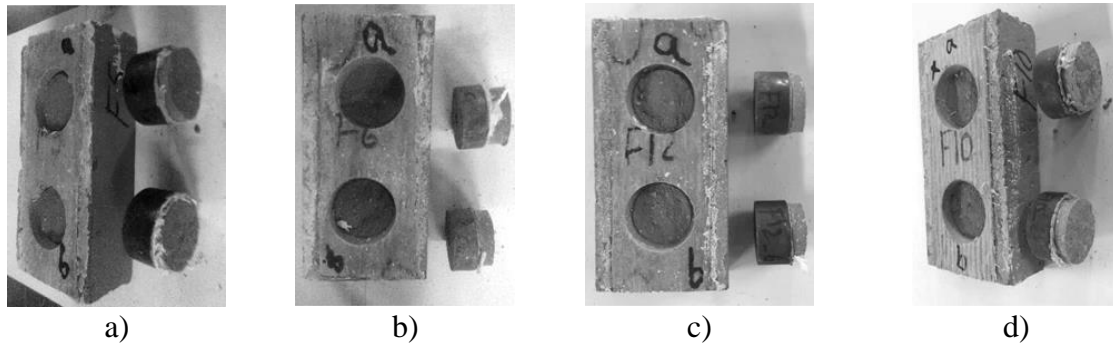


Figura 30 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 70°C e 100°C: a) 70°C durante 1h; b) 70°C durante 4h; c) 100°C durante 1h; d) 100°C durante 2,5h.

Nos provetes expostos a 280°C (4Tg), a resina epóxida queimou em todos os períodos de exposição das amostras sem camada de argamassa simples, apresentando uma cor mais “escura” (Figura 31). A exposição de 2h30min e 4h resultou no descolamento das fibras da superfície de tijolos e, por conseguinte, os testes de Pull-off não foram realizados. Nos provetes com argamassa, a queima ocorreu somente após 2h30min de exposição passando o modo de rotura a dar-se pela interface de ligação do sistema e não pelo substrato.

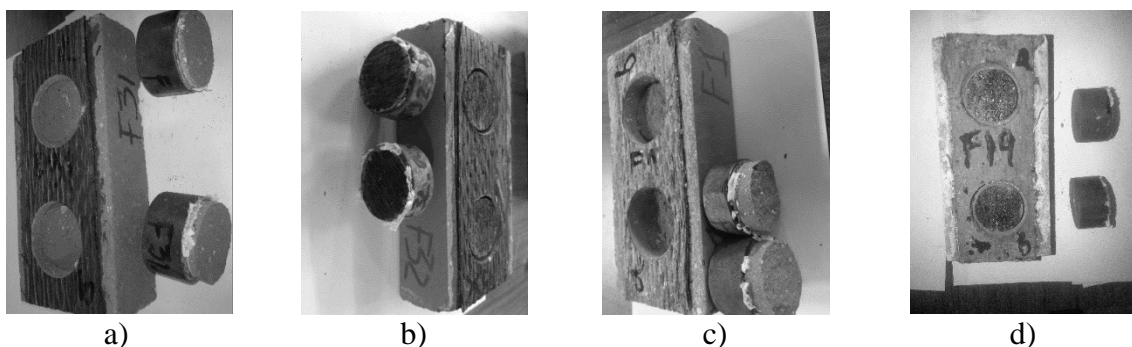


Figura 31 - Aspeto dos provetes expostos a temperaturas de 280°C: a) 1 de exposição sem proteção; b) 2h30min de exposição sem proteção; c) 2h30min de exposição com proteção; d) 4h de exposição com proteção.

Para a temperatura de exposição de 500°C (7Tg), para todos os tempos de exposição, a resina epóxida queimou completamente, provocando um destacamento e decomposição do GFRP à superfície do tijolo em todas as amostras, como se pode verificar na Figura 32. Os testes de arrancamento por tração não são realizados sobre as amostras expostas a 500°C, devido à separação completa das fibras da superfície de tijolo após a exposição.

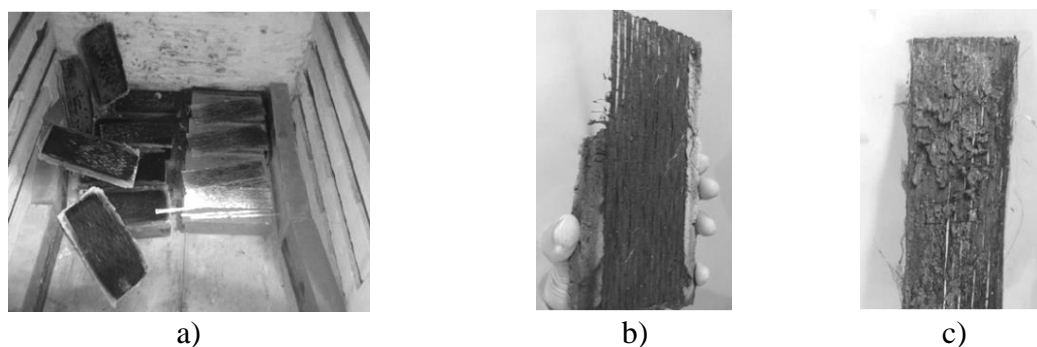


Figura 32 - Aspecto dos provetes expostos a temperaturas de 500°C: a) após 1h de exposição; b) aspecto do GFRP com proteção de argamassa; c) aspecto do GFRP sem proteção de argamassa.

Nas Tabela 6 e Tabela 7 estão representados os valores obtidos originando os gráficos da Figura 33 e da Figura 34, que representam a variação da resistência à tração dos provetes tendo em conta a temperatura e o tempo de exposição a que foram sujeitos.

Pode-se observar que em ambos os tipos de amostra (com e sem argamassa) a força de arrancamento residual aumenta com o tempo após a exposição a 70°C e 100°C. Este aumento pode ser devido a uma “re-cura” da cola epóxida. Tratando-se de uma cola termoendurecível, com a exposição a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea e posterior período de exposição a temperatura ambiente, é possível que com a “nova cura” tenha resultado um melhor contato entre as fibras e o substrato.

Uma redução significativa da tensão de aderência pode ser observada nas amostras expostas a 280°C. Para o tempo de exposição de 2h30min os provetes sem argamassa encontram-se completamente deteriorados. Para os provetes protegidos com a camada de argamassa, verificou-se uma redução de 21% e 72% da tensão de aderência para 2h30min e 4h de exposição, respetivamente. Os resultados mostram que a camada de proteção teve influência no desempenho destes sistemas de reforço, a esta temperatura.

Os modos de rotura, maioritariamente deram-se por fratura do tijolo. Apenas nas amostras com argamassa, expostos à temperatura de 280°C no período de 4h, se observou um destacamento na interface da ligação do reforço GFRP e o tijolo.

Tabela 6 - Resultados obtidos nos ensaios Pull-off do sistema tijolo-GFRP quando sujeitos a elevadas temperaturas.

Temperatura	Tempo de Exposição	Provete		Tração Máxima			
		F	Disco a)	Disco b)	Média (kN)	Cov (%)	
70°C	Sem Exposição	11	2,00	-	1,35	44,3	
		13	1,19	0,84			
	1h	3*	1,72	1,92	1,61	23,4	
		5*	-	1,19			
		36	-	-	1,45	1,0	
		40	1,46	1,44			
		4*	1,49	1,49			
	2h30min	20*	-	-	1,49	0,0	
		38	1,68	1,94			
		48	1,77	1,98	1,84	7,7	
		6*	1,7	-			
	4h	25*	1,9	1,92	1,84	6,6	
		37	1,88	2,29			
		39	1,56	1,56	1,82	19,0	
		12*	1,55	1,83			
17*		1,78	-				
100°C	1h	29	1,4	1	1,47	24,9	
		42	1,86	1,62			
		10*	-	-	1,95	3,6	
	18*	1,9	2				
	2h30min	41	1,51	1,61	1,59	4,8	
		47	1,66	-			
		16*	1,92	1,96	1,86	7,5	
		22*	1,7	-			
	4h	27	1,4	1,39	1,53	11,6	
		28	1,54	1,77			
		15*	1,51	1,54	1,42	18,1	
		24*	1,04	1,6			
	280°C	1h	31	1,46	1,75	1,33	25,2
			34	1,07	1,05		
			1*	1,62	1,06	1,07	36,9
2*			0,74	0,84			
2h30min		32	0	0	0	-	
		33	0	0			
		19*	0,36	-	0,38	7,0	
		23*	0,41	0,37			
		4h	30	0	0	0	-
35			0	0			

*Possui camada de argamassa.

Tabela 7 - Resistências finais de arrancamento por tração, tendo em conta a temperatura e tempo de exposição do provete (em percentagem), no sistema tijolo-GFRP.

	Tempo (h)	Sem Argamassa (%)	Com Argamassa (%)
70°C	0	100	100
	1	107	119
	2,5	137	110
	4	135	136
100°C	0	100	100
	1	109	127
	2,5	118	144
	4	113	138
280°C	0	100	100
	1	99	105
	2,5	0	79
	4	0	28

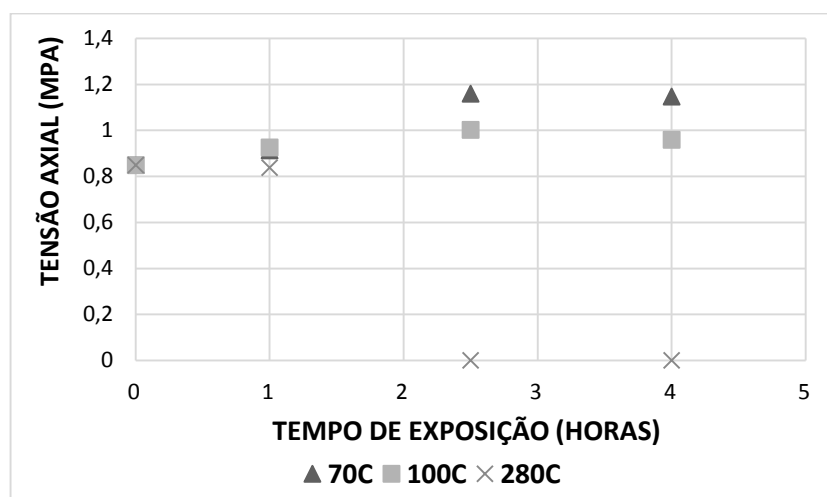


Figura 33 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes sem argamassa, no sistema tijolo-GFRP.

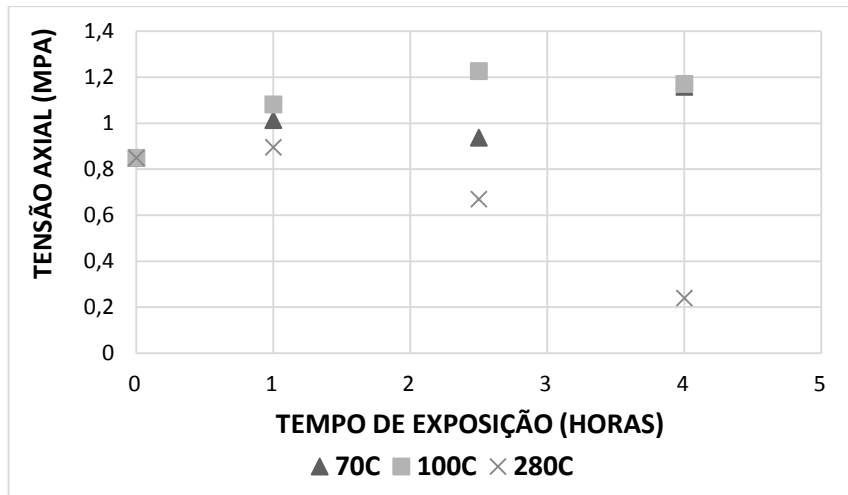


Figura 34 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes com argamassa, no sistema tijolo-GFRP.

4.4 Sistemas Betão-CFRP

Para todos os provetes expostos à temperatura de 70°C (1,6Tg) ou provetes com uma proteção de argamassa submetidos à temperatura de 100°C (2,3Tg) nenhuma alteração visual foi observada após o período de exposição. No caso dos provetes sem argamassa expostos à temperatura de 100°C, observou-se uma alteração da tonalidade da resina (Figura 35).

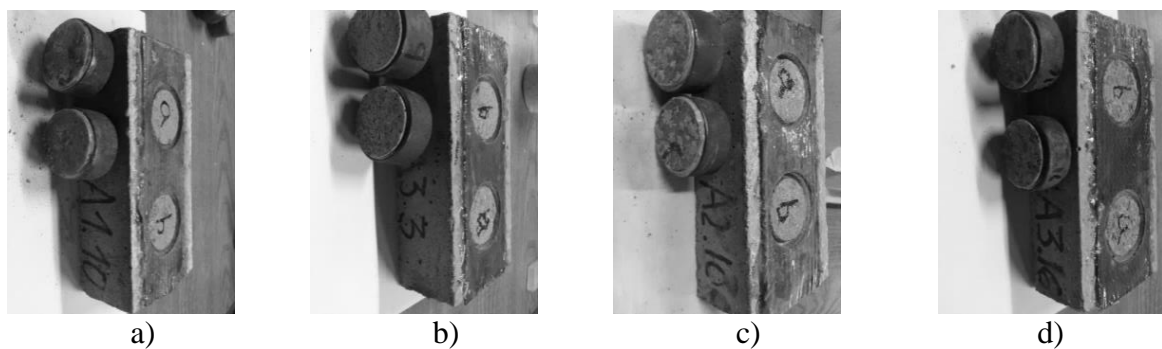


Figura 35 - Aspecto dos provetes: a) após 2h30min a 70°C com argamassa; b) após 1h a 70°C sem argamassa; c) após 2h30min a 100°C com argamassa; d) após 4h a 100°C sem argamassa.

Nos provetes sem camada de argamassa simples expostos a 280°C (6,4Tg), a resina epóxida queimou em todos os períodos de exposição, apresentando uma tonalidade negra (Figura 36).

Nos provetes com argamassa, o reforço apresentou-se menos degradado, observando em alguns casos o destacamento antecipado durante o processo de realização de carotos.

Os provetes expostos a 500°C (11,4Tg), ao fim de 1h de exposição apresentaram-se completamente deteriorados, com o reforço destacado do substrato, impossibilitando a realização dos testes de arrancamento por tração (Figura 37).

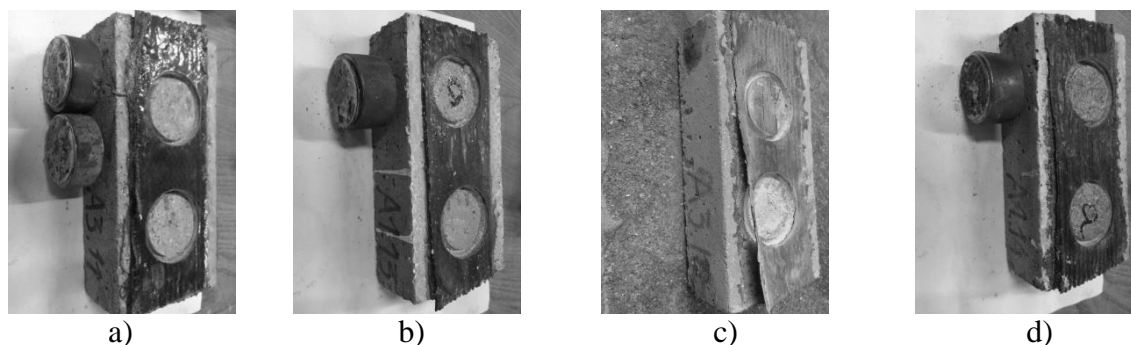


Figura 36 - Aspetto dos provetes expostos a temperaturas de 280°C: a) 1h sem argamassa; b) 2h30min com argamassa; c) 4h sem argamassa; d) 4h com argamassa.

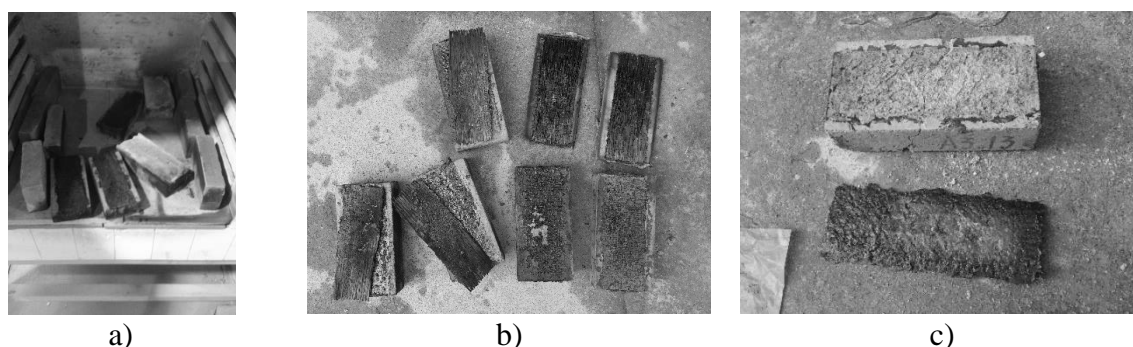


Figura 37 - Aspetto dos provetes expostos à temperatura de 500°C durante 1h.

Na Tabela 8 estão expostos os resultados obtidos nos ensaios, podendo ser vistos de forma condensada na Tabela 9 e nas Figura 38 e Figura 39, que representam a variação da resistência à tração dos provetes tendo em conta a temperatura e o tempo de exposição a que foram sujeitos.

Observando os gráficos da Figura 38 e da Figura 39, facilmente se pode concluir que para ambos tipos de amostras, após a exposição a 70°C e 100°C houve um aumento da resistência de arrancamento por tração. Como observado no sistema de tijolo-GFRP, este aumento pode ser devido a uma “re-cura” da resina epóxida. Tratando-se de uma cola termoendurecível, com

a exposição a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea e posterior período de exposição a temperatura ambiente, é possível que com a “nova cura” tenha resultado um melhor contato entre as fibras e o substrato. É de salientar, que ao contrário do sistema tijolo-GFRP este aumento é mais acentuado para a temperatura de 70°C quando comparado com a temperatura de 100°C. De fato, a 100°C e ao fim de 4h de exposição há uma redução da capacidade de ligação de 13% e 27% considerando a utilização de argamassa ou não, respetivamente.

Os provetes expostos a 280°C com camada de argamassa tiveram uma redução na capacidade de ligação de cerca de 90% para todos os tempos de exposição. No caso dos provetes sem camada de argamassa não foram executados testes pois a esta temperatura o reforço já se encontrava deteriorado.

Em relação aos modos de rotura, maioritariamente deram-se pela ligação do reforço apresentando uma camada de resina na superfície do disco. Em alguns casos, é possível observar betão ou a fibra de carbono em certos pontos. Para as exposições menos abrasivas foi possível observar uma fina camada de betão com a resina exposta em alguns pontos. Para os provetes sujeitos às exposições mais gravosas, era expectável modo de rotura dar-se pelo FRP, tal não aconteceu devido a uma imperfeição na colagem de discos uma vez que o adesivo envolveu a parte lateral do reforço aumentou consideravelmente a sua resistência de ligação.

Comparando estes resultados com os obtidos para o sistema tijolo-GFRP é possível observar que o desempenho do sistema betão-CFRP é inferior ao obtido com o sistema tijolo-GFRP, para estas temperaturas e estes tempos de exposição. De notar que a temperatura de transição vítrea da resina usada no sistema betão-CFRP é inferior à da resina no outro sistema e, além disso, o tratamento superficial da face principal do substrato também foi diferente. A superfície do betão não foi retificada, ao contrário dos provetes de tijolo, este aspeto condiciona o comportamento destas ligações (Horiguchi e Saeki, 1997; Willis et al, 2009)

Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios Pull-off do sistema betão-CFRP quando sujeitos a elevadas temperaturas.

Temperatura	Tempo de Exposição	Provete			Tração Máxima					
		A	Disco a)	Disco b)	Média (kN)	Cov (%)				
70°C	Sem Exposição	1,8	2,80	2,16	2,21	25,9				
		1,16	1,67	-						
	1h	1h	3,1	3,18	-	2,62	20,2			
			3,3	2,13	2,54					
			1,9*	-	2,72					
		2h30min	2h30min	1,7*	2,73	3,79	3,08	20,0		
				3,4	2,69	-				
				3,6	2,57	-				
	4h	4h	1,6*	2,90	2,88	2,55	21,2			
			1,10*	2,67	1,76					
			3,2	3,23	2,65					
		4h	4h	3,5	2,78	2,59	2,81	10,2		
1,3*				2,28	2,91					
1,5*				2,13	-					
100°C	1h	3,15	2,91	2,44	2,37	24,6				
		3,18	1,75	-						
		2,8*	2,74	2,01						
		2,9*	2,59	2,82						
		2h30min	2h30min	3,7			2,86	1,57	2,33	23,4
				3,17			2,46	2,44		
	4h	4h	2,10*	2,19	2,87	2,43	20,7			
			2,11*	2,83	1,84					
			3,12	2,64	1,72					
		4h	4h	3,16	1,40	-	1,92	33,7		
				2,2*	0,92	1,69				
				2,15*	1,51	2,34				
280°C	1h	3,11	0,00	0,00	0,00	-				
		3,14	0,00	0,00						
		1,15*	0,26	0,11						
		1,17*	-	0,23						
	2h30min	2h30min	1,4	0,00	0,00	0,00	-			
			3,13	0,00	0,00					
			1,13*	0,51	-					
			3,8*	-	-					
	4h	4h	3,9	0,00	0,00	0,00	-			
			3,10	0,00	0,00					
			1,14*	0,28	-					
			1,18*	0,10	-					

*Possui camada de argamassa.

Tabela 9 - Resistências finais de arrancamento por tração, tendo em conta a temperatura e tempo de exposição do provete (em percentagem), no sistema betão-CFRP.

	Tempo	Sem Argamassa (%)	Com Argamassa (%)
70°C	0	100	100
	1	119	139
	2,5	119	116
	4	127	111
100°C	0	100	100
	1	107	115
	2,5	106	110
	4	87	73
280°C	0	100	100
	1	0	9
	2,5	0	23
	4	0	8

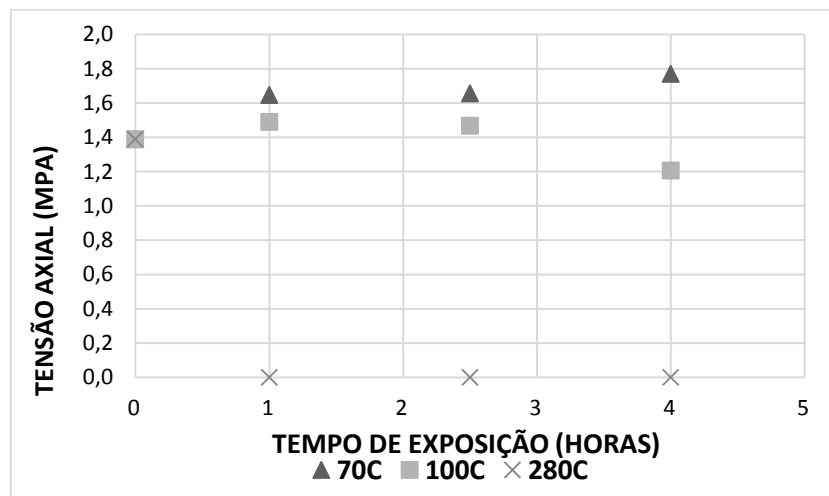


Figura 38 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes sem argamassa, no sistema betão-CFRP.

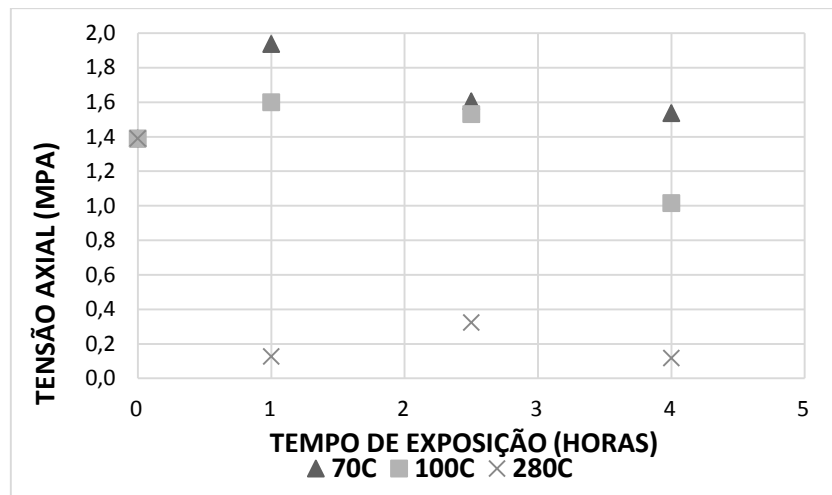


Figura 39 - Gráfico da variação da tensão de aderência em provetes com argamassa, no sistema betão-CFRP.

Capítulo 5

5 EFEITO DAS VELOCIDADES DE DEFORMAÇÃO

Neste capítulo, pretende-se estudar a influência das velocidades de deformação no comportamento de aderência de sistemas de reforço com FRP por colagem exterior. O desempenho da ligação é avaliado com ensaios de corte direto recorrendo a uma torre de queda desenvolvida propositadamente para este efeito. Esta torre de queda (Figura 40a) permite alturas de queda até 3 metros e tem um martelo com 14 kg de massa. Variando a altura do martelo introduzem-se diferentes velocidades de deformação do provete. Apesar de terem sido preparados 100 provetes (Figura 40b) (50 provetes tijolo-GFRP e 50 provetes betão-CFRP) apenas 30 provetes de tijolo-GFRP foram ensaiados. Limitações nos equipamentos não permitiram a execução de todos os ensaios. A célula de carga instalada no sistema de ensaio mostrou-se com capacidade reduzida (20 kN) para a execução de todos os ensaios, como será demonstrado ao longo deste capítulo.



Figura 40 - Efeito das velocidades de deformação: a) Setup de ensaio; b) Provetes preparados.

5.1 Resultados pretendidos

O principal objetivo destes ensaios é determinar relações empíricas sob a forma de FID (Fator de Incremento Dinâmico) que descrevam a influência das velocidades de deformação (Eq. 3) no comportamento de aderência destes sistemas de reforço. Estas relações apresentam-se normalmente com a forma que pode ser observada na Figura 41, uma primeira secção constante para o regime estático e uma segunda secção com um declive acentuado em regime dinâmico.

$$FID = \frac{\text{Propriedade (dinâmica)}}{\text{Propriedade (estática)}}, f(\dot{\delta}) \quad (3)$$

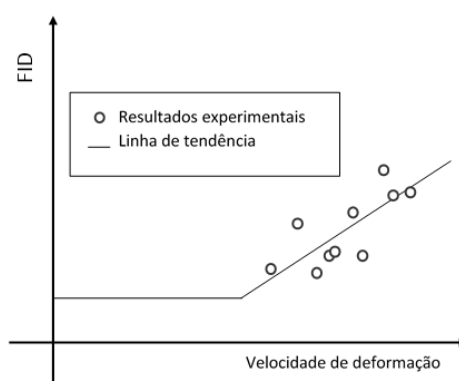


Figura 41 - Aspeto genérico da evolução de FID com velocidades de deformação.

Tal como indicado na Equação 3, é necessário comparar os resultados dinâmicos com os resultados estáticos, para tal, e como a execução dos mesmos ensaios em regime estático não

faz parte do conjunto de objetivos deste trabalho, utilizam-se os resultados obtidos em trabalhos anteriores para os mesmos materiais, neste caso o trabalho apresentado por Ghiassi (2013).

Durante os ensaios é necessário o registo de duas grandezas: a) evolução da força ao longo do tempo (Figura 42a); e b) evolução do deslocamento relativo (slip) ao longo do tempo (Figura 42b). A forma como estas grandezas são registadas será demonstrada na secção seguinte quando apresentado o equipamento de ensaio. Com estas duas grandezas registadas é possível então, por um lado comparar a força máxima registada com o valor de referência estático (obtendo-se o FID para esse ensaio) e, por outro lado obter a velocidade de deformação do ensaio que se considera constante durante o ensaio e igual ao gradiente da curva deslocamento relativo ao longo do tempo. Esta metodologia para determinação da velocidade de deformação é semelhante à utilizada por outros autores (Hao e Tarasov, 2008; Pereira, 2014).

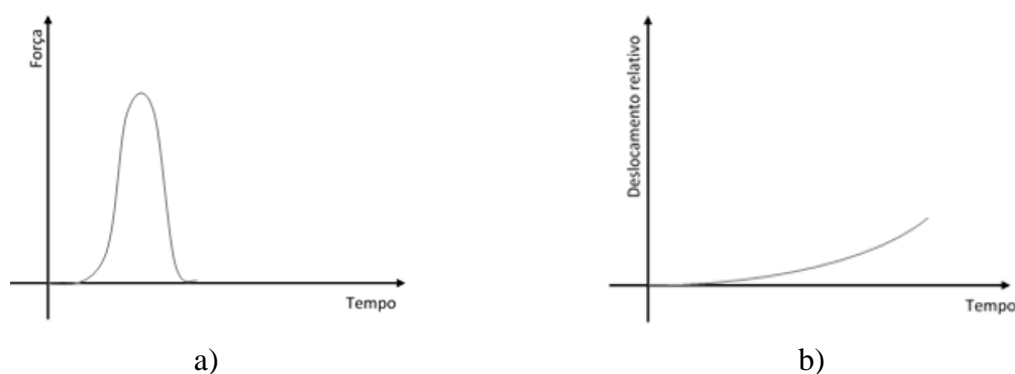


Figura 42 - Perfil genérico esperado: a) Força ao longo do tempo; b) Deslocamento relativo ao longo do tempo.

5.2 Instrumentação

Tal como indicado anteriormente neste trabalho é utilizada uma torre de queda (Figura 43) desenvolvida especificamente para este tipo de ensaios e encontra-se no Laboratório de Estruturas (LEST) de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Esta torre permite uma massa variável do martelo (com um mínimo de 14 kg) e uma altura de queda até 3 metros.

O perfil de força é medido na extremidade da tira de FRP, onde a carga é aplicada, com recurso a uma célula de carga para aplicações dinâmicas – VETEK VZ101BH (Figura 44a). Esta célula de carga foi previamente calibrada em regime estático. Para registar o perfil de força é utilizado

um sistema de aquisição da National Instruments (Figura 44b). Este sistema de aquisição de dados é composto por um chassis SCXI-1000DC, uma placa de controlo e ligação ao PC SCXI-1600 e módulos de aquisição SCXI-1520+1314. A placa de controlo SCXI-1600 limita a frequência de aquisição a 200 kS/s (200 registos por milissegundo), o que foi considerado suficiente mesmo quando numa fase posterior foram usados 4 canais limitando a frequência de aquisição a 50 kHz por canal. O software de aquisição foi também desenvolvido propositadamente para estes ensaios em LabView e regista os dados durante um período de tempo predeterminado.

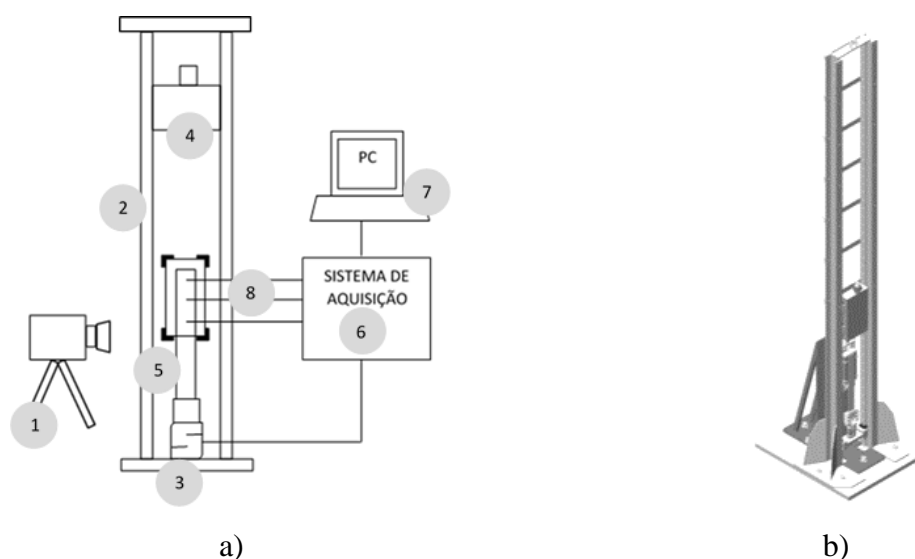


Figura 43 - a) Setup do ensaio pull-out: 1) Equipamento de vídeo de alta velocidade; 2) Torre de queda; 3) Célula de carga; 4) Martelo; 5) Provete; 6) Sistema de aquisição de dados; 7) Computador; 8) Extensómetros. b) Representação da Torre de Impacto.



Figura 44 - Registo do perfil de Força: a) VETEK VZ101BH; b) Sistema de aquisição da Natitonal Instruments (NI).

A resposta dos provetes foi registada de duas formas diferentes. Foi utilizado equipamento de vídeo de alta velocidade – PHOTRON FastCam APX-RS (Figura 45) com uma frequência de aquisição máxima de 250 000 fps (frames per second). Este equipamento permitiu adquirir em vídeo o comportamento do provete na zona inicial de colagem, primeira zona a ser solicitada. A medição do deslocamento relativo foi possível utilizando alvos no provete (Figura 46a), tanto no reforço FRP como no tijolo, e executando um varrimento do vídeo com software de tracking – TEMA Tracking Software (v: 3.1-005). A segunda forma de registo da resposta dos provetes é com recurso a extensómetros colocados ao longo do reforço (Figura 46b). Os extensómetros usados são BFLA-5-8-3L da TML, iguais aos utilizados nos ensaios estáticos por Ghiassi (2013), e são conectados ao mesmo sistema de aquisição da célula de carga. Para reduzir custos todos os ensaios foram executados com recurso ao vídeo de alta velocidade e apenas alguns ensaios foram executados com extensómetros para validação dos resultados obtidos com o equipamento de vídeo.

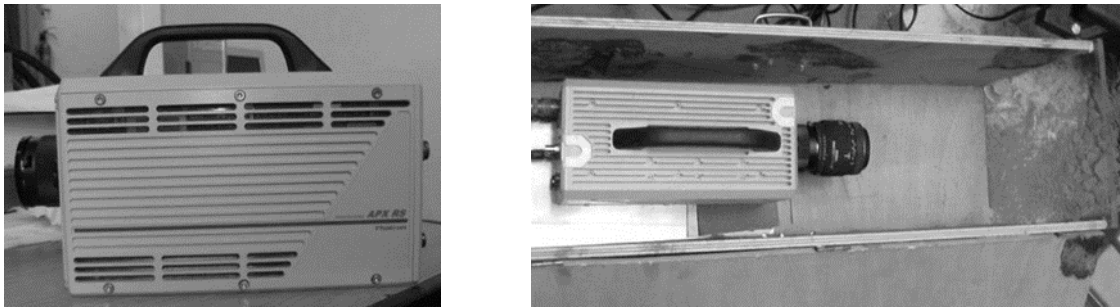


Figura 45 - PHOTRON FastCam APX-RS.

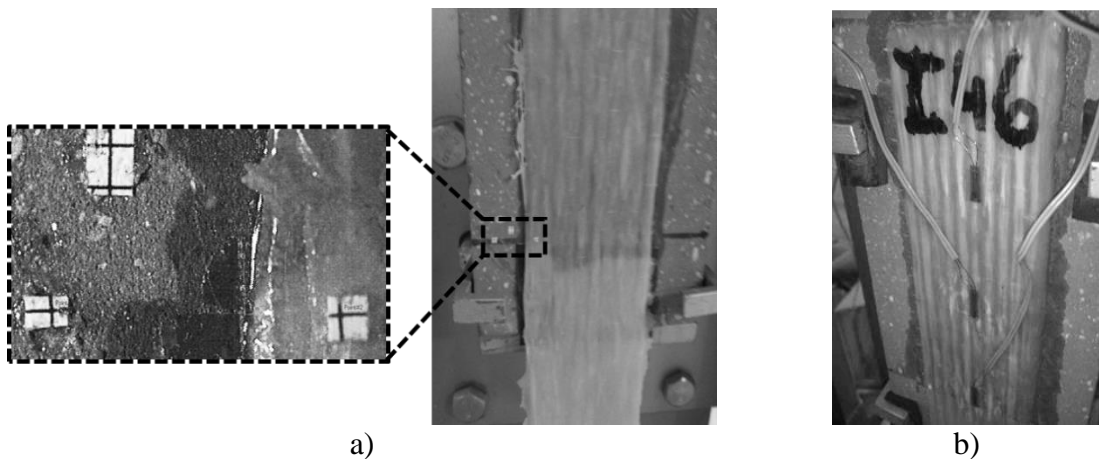


Figura 46 - Registo da resposta dos provetes: a) Alvos para registo de vídeo;
b) Extensómetros ao longo do reforço.

5.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental é de extrema importância neste tipo de ensaios dinâmicos em que a duração do ensaio é inferior a um segundo. Depois do provete preparado, sendo colocados os alvos e os extensómetros, nos provetes em que foram colocados, o provete tem que ser colocado na torre de queda. Prendem-se as chapas metálicas da extremidade do reforço ao adaptador da torre (Figura 47a), de seguida o provete é colocado na torre e o tijolo é fixado ao suporte do provete e a extremidade do reforço é fixada à célula de carga, onde será aplicada a força (Figura 47b). Estando o provete na sua posição, todos os sistemas são verificados e ajustados, incluindo a posição e o foco do equipamento de vídeo. Posiciona-se o martelo a uma altura desejada (Figura 47c) e ligam-se as luzes (1000 watts) necessárias para o equipamento de vídeo. É necessário ter especial atenção a luminosidade. Por um lado, esta é necessária para a aquisição de vídeo, por outro lado o aumento da temperatura no provete é considerável ao final de algum tempo. Ao fim de 3 minutos com as luzes apontadas ao provete, este registava uma temperatura superficial superior a 40°C. Por esta razão as luzes são apenas ligadas imediatamente antes do ensaio de forma a não influenciar a resposta deste. De seguida o equipamento de vídeo é colocado em modo de trigger ou “REC READY” (Figura 47d) e o sistema de aquisição da célula de carga é iniciado. O acionamento do martelo e o início do registo de vídeo são sincronizados e operados manualmente. No final do ensaio os dados são gravados para posterior análise. Como se pode verificar este é um processo complexo de coordenação, que exige dois operadores, uma vez que é necessário uma sincronização de atos e equipamentos num curto espaço de tempo.

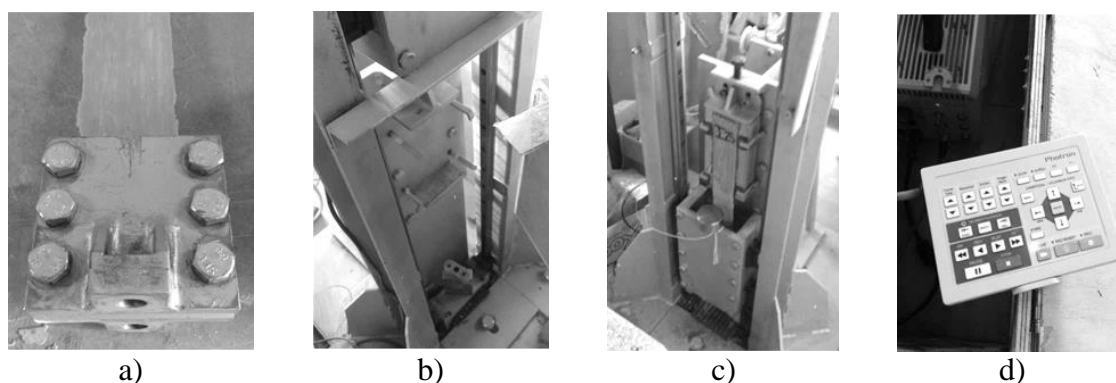


Figura 47 - Procedimento de ensaio: a) Extremidade do reforço; b) Suporte do provete na torre; c) Posicionamento do martelo; d) Comando para operação do equipamento de vídeo.

5.4 Análise e discussão de resultados

Um total de 30 provetes foram ensaiados na torre de queda com um martelo de 14 kg e fazendo variar a altura de queda entre os 14 e os 36 cm. Não foi possível estender o estudo a alturas de queda superiores pois, como será visto nos resultados obtidos, esta gama de alturas foi suficiente para atingir o máximo da célula de carga, razão pela qual alguns dos ensaios não foram considerados válidos e não se encontram apresentados neste documento. Como descrito anteriormente, para cada ensaio é necessário obter os perfis de força (Figura 48a) e deslocamento (Figura 48b). Com estes dois perfis é possível construir curvas força-deslocamento relativo (Figura 49) através das quais é possível calcular o FID. A Figura 50 mostra alguns exemplos de modos de rotura típicos obtidos, em tudo semelhantes aos obtidos em regime estático (Ghiassi, 2013).

Para estes testes a frequência de aquisição do perfil de força foi fixado em 24 kHz e a frequência de aquisição do perfil de deslocamento foi fixado em 12 kHz. Estes valores são dependentes da luminosidade no local de ensaio e da resolução do equipamento de vídeo que são colocadas no máximo possível na altura do ensaio.

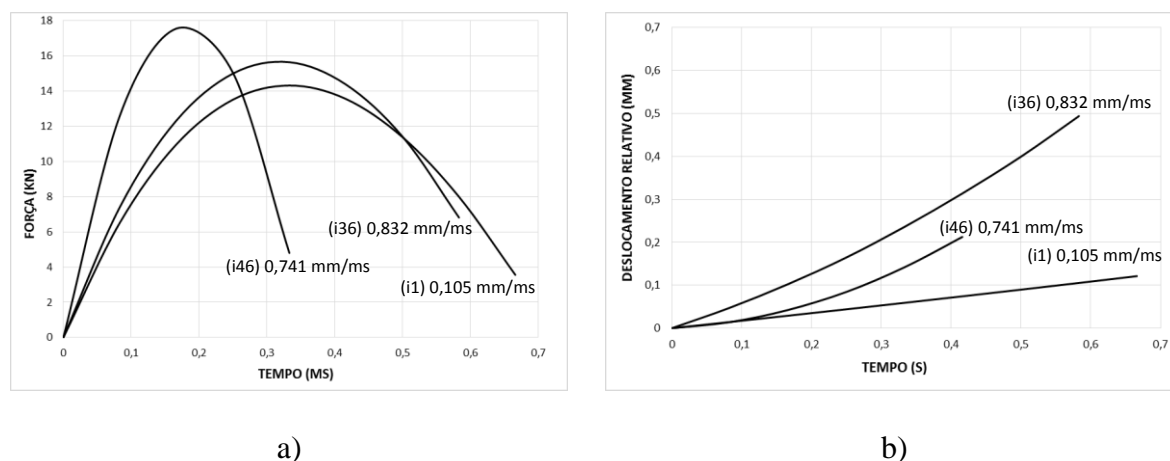


Figura 48 - Exemplos de registos dos ensaios: a) Perfil de força; b) Perfil de deslocamento relativo.

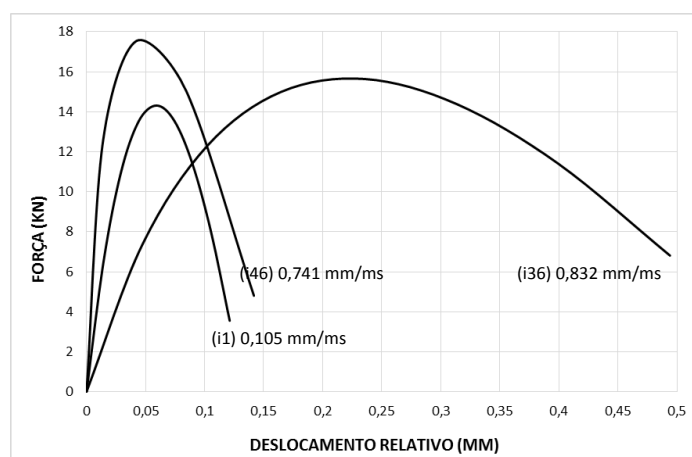


Figura 49 - Exemplos de curvas força-deslocamento relativo.



Figura 50 - Modos de rotura típicos dos ensaios dinâmicos para diferentes velocidades de deformação, com arrancamento total ou parcial do reforço GFRP.

Na Tabela 10 são expostos os resultados obtidos nos sistemas de reforço tijolo-GFRP. Por limitações da célula de carga, não foi possível estudar o comportamento dos sistemas betão-CFRP em que se estima que a força seja superior. Como pode ser observado na tabela, a força máxima variou entre os 12,65 kN e os 18,73 kN o que resulta num FID de 1,37 e 2,03 para velocidades de deformação de 0,06 mm/ms e 1,32 mm/ms, respetivamente. Colocando estes resultados num gráfico que mostre a evolução do FID função da velocidade de deformação (Figura 51) podemos observar que, tal como era expectável, a velocidade de deformação influencia a força máxima de corte nestes sistemas de reforço. Para uma velocidade de deformação na ordem dos 1 mm/ms obtemos o dobro da força de corte máxima relativamente ao valor em regime estático.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios em impacto em sistemas GFRP-tijolo.

Provete (I)	PHOTRON		CELULA DE CARGA	FID	Destacamento
	Max Deslocamento Rel. (mm)	Velocidade de Deslocamento (mm/ms)	Força Máxima (kN)		
37	0,19	0,06	12,65	1,37	Parcial de 5cm
41	0,32	0,07	14,97	1,62	Parcial de 5cm
7	0,17	0,08	14,66	1,59	Parcial de 7cm
25	0,14	0,09	13,16	1,43	Parcial de 5cm
1	0,29	0,10	14,94	1,62	Parcial de 6cm
20	0,45	0,13	14,85	1,61	Parcial de 6cm
40	0,49	0,15	13,79	1,50	Parcial de 7cm
26	0,41	0,25	16,81	1,82	Total
3	0,53	0,44	17,66	1,92	Parcial de 5cm
31	0,76	0,57	16,65	1,81	Total
46	0,84	0,74	17,15	1,86	Total
44	0,87	0,77	17,64	1,91	Total
36	0,58	0,83	15,64	1,70	Total
30	1,00	0,87	17,29	1,88	Total
49	1,28	1,32	18,73	2,03	Total

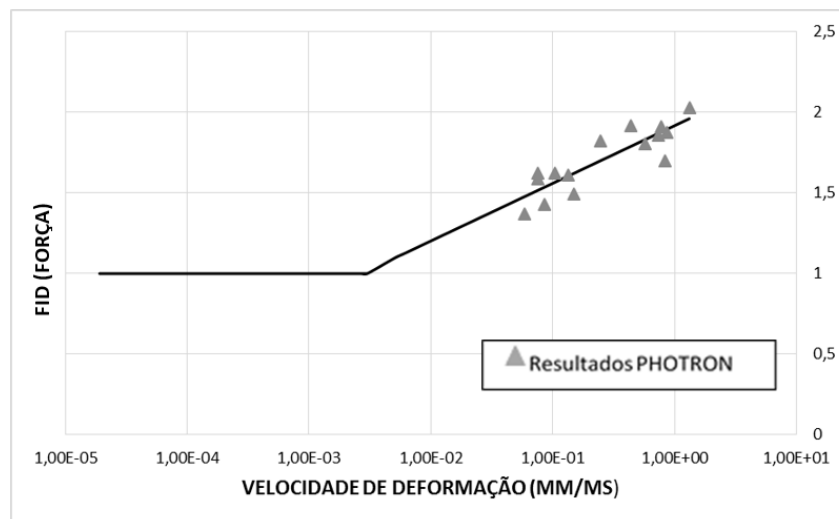


Figura 51 - FID para a capacidade de carga do sistema de reforço tijolo-GFRP em função da taxa de deformação.

A relação empírica que traduz a influência das velocidades de deformação na capacidade de corte destes sistemas de reforço tijolo-GFRP pode ser traduzida da seguinte forma:

$$\begin{cases} FID = 1, & 1,908E - 05 < \dot{\delta} < 2,71E - 03 \\ FID = 0,1554\ln(\dot{\delta}) + 1,9184, & 2,71E - 03 \leq \dot{\delta} \leq 1,32 \end{cases} \quad (4)$$

Esta relação log-linear tem um R^2 de 75% o que foi considerado representativo dada a natureza destes ensaios e os materiais envolvidos.

Além destes resultados, foram também colocados extensómetros em alguns provetes de forma a validar o procedimento experimental. Em provetes seleccionados, foram colocados 3 extensómetros por provete espaçados de 50 mm tal como indicado na Figura 52. A Figura 53 apresenta dois exemplos de resultados obtidos com os extensómetros, um exemplo em que houve destacamento total do reforço (Figura 53a) e um exemplo em que houve desacatamento parcial do reforço (Figura 53b). Estes resultados, além de poderem servir de validação dos resultados apresentados anteriormente, permitem também obter uma informação importante relativamente ao comprimento efetivo de ligação. Como pode ser observado na Figura 53, quando o primeiro extensómetro se encontra em “patamar” de extensão máxima o extensómetro seguinte encontra-se com valor muito reduzido e próximo de zero. Sabendo que os extensómetros se encontram afastados de 50 mm é possível considerar o comprimento efetivo de ligação (“effective bond length”) igual ou inferior a 50 mm. Esta informação permite concluir que todos os ensaios em que houve destacamento parcial do reforço, mas que em que este destacamento foi superior a 50 mm foi atingida a força máxima de corte, permitindo que os resultados sejam também considerados nesta análise.

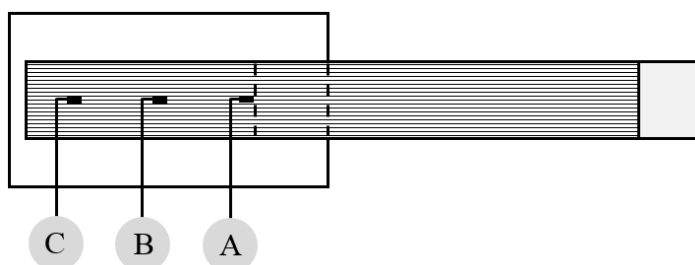


Figura 52 - Configuração da disposição dos extensómetros: extensómetro A, posição $x=00$ mm; extensómetro B, posição $x=50$ mm; extensómetro C, posição $x=100$ mm.

Conhecendo a distribuição das extensões ao longo do reforço e ao longo do tempo (Figura 54a) é possível determinar o perfil do deslocamento relativo (Figura 54b), esta metodologia foi apresentada por Oliveira et al (2010) e usada por Ghiassi (2013):

$$\delta = \int \varepsilon(x) dx \quad (5)$$

Obtendo o perfil de deslocamento relativo é possível comparar este com o obtido com o equipamento de vídeo de alta velocidade. Na Tabela 11 é possível observar os resultados dos ensaios em que foram utilizados ambos os sistemas de aquisição de deslocamento. Em termos de deslocamento relativo máximo os resultados são bastante próximos na generalidade, exceto no provete I30 em que o deslocamento relativo máximo obtido com recurso ao equipamento de vídeo foi sensivelmente o dobro do obtido com recurso a extensómetros. Em termos de velocidade de deformação os resultados são também bastante semelhantes sendo a diferença máxima no provete I40 onde a velocidade de deformação obtida com os extensómetros é cerca de 35% inferior à obtida com o equipamento de vídeo.

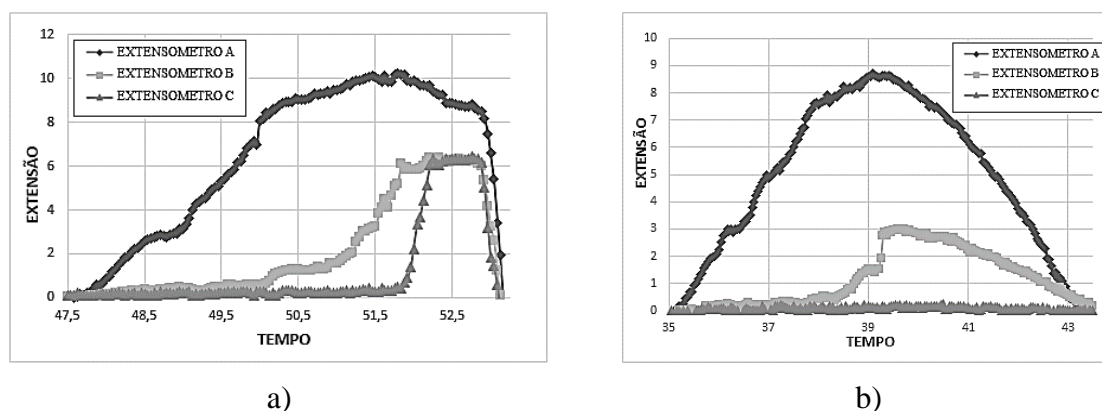


Figura 53 - Exemplos de perfis extensões ao longo do tempo: a) Destacamento completo do reforço; b) Destacamento parcial de 60 mm do reforço.

Adicionando os resultados obtidos com extensometria aos resultados obtidos com o equipamento de vídeo (Figura 55) é possível observar que os resultados da extensometria se encontram na gama de valores obtida com o equipamento de vídeo. Tendo em conta apenas os resultados obtidos com extensometria a relação empírica log-linear que traduz a evolução dos resultados tem um R^2 superior a 95%. Claro que a amostragem em questão reduzida, no entanto

parece que é possível obter resultados melhores com recurso a extensómetros ao longo do reforço. Esta técnica aumenta consideravelmente os custos de cada ensaio, como referido.

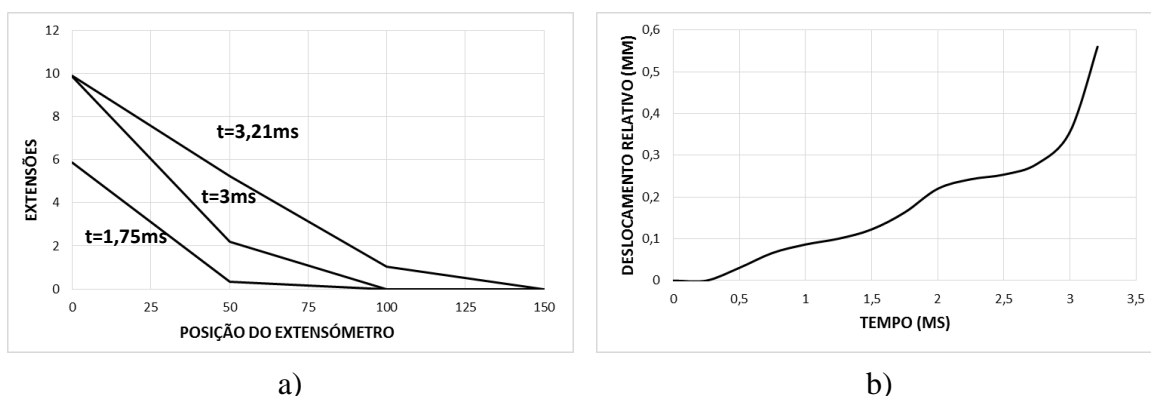


Figura 54 - Extensometria: a) Distribuição de extensão ao longo do reforço a diferentes instantes; b) Perfil de deslocamento relativo obtido com extensometria.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios com os dois sistemas de aquisição de deslocamento.

Provete	Extensómetros			PHOTRON			FID
	Max Desl. (mm)	Vel. Desl. (mm/ms)	Vel. Deformação (/s)	Max Desl. (mm)	Vel. Desl. (mm/ms)	Max Força (kN)	
I41	0,31	0,1	2,6	0,32	0,07	14,97	1,62
I40	0,36	0,23	2,5	0,49	0,15	15,96	1,73
I46	0,86	0,7	3,7	0,84	0,74	17,15	1,86
I30	0,56	0,98	7,4	1,00	0,87	17,29	1,88

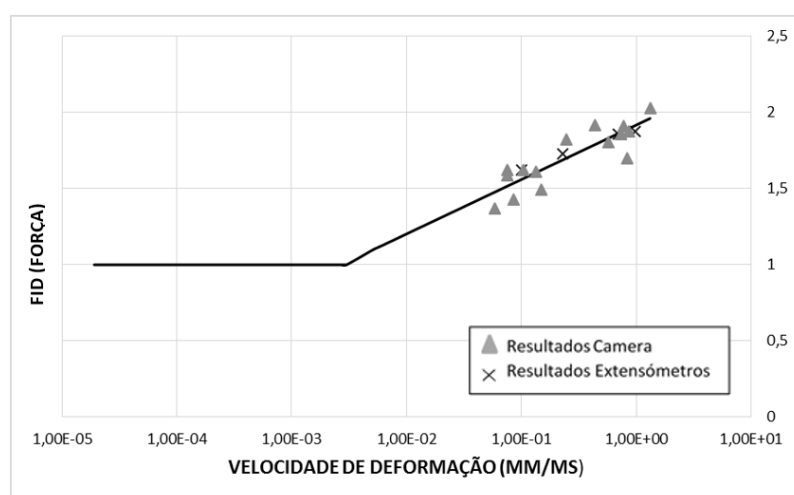


Figura 55 - FID para a capacidade de carga do sistema de reforço tijolo-GFRP em função da taxa de deformação, inclui resultados com extensometria.

Capítulo 6

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas campanhas experimentais para estudar o comportamento de aderência de sistemas de reforço com FRP quando sujeito a ações extremas. Pretendia-se estudar o comportamento de aderência entre o reforço em FRP (vidro ou carbono) quando aplicado em tijolo ou betão, sujeitos a elevadas temperaturas e impactos.

Para estudar a influência das elevadas temperaturas no comportamento de ligação destes sistemas de reforço foram preparados provetes dos dois sistemas em estudo, tijolo-GFRP e betão-CFRP, e estes foram expostos a temperaturas constantes de 70°C, 100°C, 280°C e 500°C por períodos de tempo diferentes entre os 60 minutos e os 240 minutos. No total foram preparados 100 provetes, 50 de cada sistema de reforço em estudo, tendo sido realizados dois ensaios por provete. Foi também aplicada uma camada de 10 mm de argamassa para proteção do reforço em metade dos provetes para avaliar a influência desta no sistema de reforço.

Relativamente ao sistema tijolo-GFRP a relação entre a temperatura de transição vítrea da resina epóxida utilizada e as temperaturas de exposição correspondem a 1Tg, 1,4Tg, 4Tg e 7Tg.

Foi possível observar uma ligeira melhoria da capacidade de ligação nas amostras expostas a temperaturas de 70°C e 100°C. Este aumento da capacidade pode ter sido devido a um fenómeno de “re-cura” da resina após exposição. Este fenómeno foi também observado por outros autores como Ghiassi (2013) e Klamer (2006). Para a temperatura correspondente a 280°C foi possível observar um decréscimo de capacidade da ligação, sendo que sem argamassa o reforço ficou completamente deteriorado a partir das 2h30min. Com camada de argamassa foi possível observar um decréscimo de capacidade de 21% e 72% para as 2h30min e 4h de exposição, respetivamente. Neste caso o modo de rotura alterou para a interface entre o substrato e o reforço. Foi possível observar também que a camada de 10 mm de argamassa de proteção do reforço é capaz de reduzir a temperatura no reforço, protegendo assim a resina.

No sistema betão-CFRP, verificou-se uma maior degradação da ligação entre o reforço e o substrato. Tal, deve-se a uma maior relação entre a temperatura de transição vítrea da resina epóxida utilizada e as temperaturas de exposição (1,6T_g, 2,3T_g, 6,4T_g e 11,4T_g) e por não se ter polido a superfície de ligação, como se realizou no sistema de tijolo-GFRP com recurso a uma retificadora. Este fator, vem reforçar a importância do tratamento da superfície como já vinha a ser comprovado por Horiguchi e Saeki (1997) e Willis (2009). Quanto à sua capacidade de ligação, à imagem do que se observou no sistema tijolo-GFRP, foi possível observar um aumento de capacidade para as temperaturas de 70°C e 100°C, possivelmente devido a um fenómeno de “re-cura”, com a diferença de esse aumento ser mais acentuado para a temperatura de 70°C. Para os provetes expostos a 280°C, o reforço queimou estando associado grandes decréscimos de capacidade de ligação. Nos provetes expostos sem qualquer proteção a ligação foi inexistente enquanto nos casos em que uma camada de argamassa protetora foi aplicada verificaram-se perdas de 90%, comprovando mais uma vez a eficácia da camada protetora de argamassa simples em reduzir a temperatura no esforço. Em relação aos modos de rotura, maioritariamente deram-se pela interface do reforço e substrato, apresentando na face de destacamento uma camada de resina. Em algumas amostras foi possível observar betão ou o reforço de fibra de carbono expostos em certos pontos. Para os provetes sujeitos às exposições mais gravosas, era expectável modo de rotura dar-se pelo FRP, tal não aconteceu devido a uma imperfeição na colagem de discos uma vez que o adesivo envolveu a parte lateral do reforço aumentou consideravelmente a sua resistência de ligação.

Para o estudo da influência das velocidades de deformação no comportamento de aderência destes sistemas de reforço foram executados ensaios de corte direto com auxílio de uma torre

de queda desenvolvida para esse propósito. Com recurso a equipamento de vídeo de alta velocidade e extensometria foi possível captar a resposta dos provetes. Fazendo variar a altura de queda do martelo foi possível introduzir no sistema velocidades de deformação entre os 0,06 mm/ms e 1,32 mm/ms. Apesar de terem sido preparados mais de 100 provetes dos dois sistemas de reforço em estudo, apenas foi possível executar 30 provetes do sistema tijolo-GFRP. A célula de carga instalada na torre de queda mostrou-se com capacidade reduzida para estender o estudo aos restantes provetes.

De todos os provetes ensaiados nem todos puderam ser aproveitados para análise. Por um lado houve falhas no sistema de aquisição e na sincronização que impossibilitaram a aquisição de dados em alguns ensaios, por outro lado os limites de força para a célula de carga em questão eram muito próximos, isto é, alguns ensaios ou excediam a força máxima da célula, saturando os resultados obtidos, ou eram sujeitos a cargas demasiado baixas em que o destacamento do reforço foi inferior ao comprimento efetivo de ligação, não podendo assim ser incluídos na presente análise.

Dos resultados obtidos do sistema tijolo-GFRP foi possível observar que as velocidades de deformação influenciam a capacidade máxima da ligação destes sistemas de reforço. Para velocidades de deformação na ordem dos 1,0 mm/ms temos um aumento de capacidade de duas vezes a capacidade em regime estático (velocidade de deformação cerca de 10^{-5}). Os resultados obtidos com extensometria permitiram determinar o comprimento efetivo de ligação, sendo este considerado igual ao obtido em regime estático e igual a 50 mm e verificar que não varia com a carga aplicada no provete, como já tinha sido comprovado por Al-Zubaidy et al (2012). Estes resultados permitiram também validar os resultados obtidos com o equipamento de vídeo de alta velocidade. A relação empírica que traduz a influência das velocidades de deformação na capacidade da ligação deste sistema de reforço foi determinada e apresentada segundo uma relação log-linear em regime dinâmico e constante e igual a 1 em regime estático. Relativamente aos modos de rotura, estes foram semelhantes aos obtidos em regime estático, não havendo influência das velocidades de deformação nesse aspeto, como outros autores já haviam concluído (Al-Zubaidy et al, 2012). A rotura, destacamento total ou parcial do reforço, ocorreu sempre no tijolo.

No que se refere a trabalhos futuros, relativamente ao estudo da influência das elevadas temperaturas no comportamento de aderência destes sistemas de reforço, alguns aspetos que poderão ser estudados em maior detalhe:

- Temperaturas adicionais entre os 100°C e os 280°C devem ser consideradas. Nesta gama de temperaturas existe uma alteração de comportamento do sistema de reforço.
- A espessura da camada de proteção em argamassa deve ser estudada pelo que neste trabalho apenas uma camada com 10 mm foi aplicada e esta mostrou-se capaz de influenciar a resposta do sistema.
- A utilização de outros materiais para proteção do reforço pode também ser considerada.

Relativamente ao estudo da influência das velocidades de deformação no comportamento de aderência destes sistemas de reforço, alguns aspetos que poderão ser estudados em maior detalhe:

- O equipamento deve ser alterado, nomeadamente a célula de carga, para uma de maior capacidade permitindo assim alargar o estudo para velocidades de deformação superiores às estudadas neste trabalho.
- A influência das velocidades de deformação no sistema betão-CFRP deve ser estudada, aquando da alteração do equipamento, estando os provetes já preparados para ensaiar.
- A utilização de um maior número de extensómetros ao longo do reforço pode também ser considerada. Os resultados obtidos com extensometria são bastante dependentes do número de extensómetros utilizados.

Outras técnicas de reforço podem também ser consideradas para estudo recorrendo à mesma torre de queda, por exemplo NSM (“Near Surface Mounted”). Outros materiais de reforço podem também ser considerados, por exemplo SRG (“Steel Reinforced Grouts”).

7 REFERÊNCIAS

- [1] Abdelrahman, S. Rizkalla, 1998. “Design of concrete members prestressed by FRP”, texto de apoio do curso “Desing and Retrofit of Structures with Fiber Composites”, the Canadian Network of Centre of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Canada), ICCI’98, Arizona; p.63.
- [2] Abanilla M., Li Y., Karbhari VM., 2006. “Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening”, *Composites Part B Engineering*, 37(2-3):p.37:200-12.
- [3] ACI 440R-96, 1996. "State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures", American Concrete Institute.
- [4] ACI 546, 2001. “Concrete Repair Guide (ACI 546R-96 (Reapproved 2001))”, American Concrete Institute.
- [5] ACI 440, 2000. “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, American Concrete Institute.
- [6] ASHBY, M.F., 1987. "Technology of the 1900s: advanced materials and predictive design", *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, 322(1567):p.393-407.
- [7] ASTM D4541, 2009. “Standard tests method for pull-off adhesion strength of coatings using portable adhesion testers”.
- [8] AL-Zubaidy H., Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mihaidi, 2011. “Mechanical Behaviour of Normal Modulus Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) and Epoxy under Impact Tensile Loads”, *Procedia Engineering*, 10:p.2453-2458.
- [9] AL-Zubaidy H., Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mihaidi, 2012. “Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads”, *Composite Structures*, 94(2):p.510-518.
- [10] Bizindavyi L, Neal KW, 1999. “Transfer length and bond strength for composites bonded to concrete”, *Journal of Composites for Construction*, 3(4):p153-60.
- [11] Cabral H., 2010. “Ensaio de Arrancamento de Laminados Compósitos Aderentes a Superfícies de Betão”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa (FCT), Lisboa.*
- [12] Cai, Z.H., 2008. “Research on bond property of FRP-to-concrete interface under elevated temperatures”, *Master’s thesis, Tongji University, Shanghai, China.*
- [13] CEB-FIP (Comité Euro-International du béton), *Model Code 1990*, Redwoods Books, rowbridge, Wiltshire, UK.
- [14] Chajes MJ, Finch WW, Januszka TF, Thomson TA, 1996. “Bond and force transfer of composite Material plates bonded to concrete”, *ACI Structures Journal*, 93:p.208-17.
- [15] Concrete Society, 2000. “Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using FRP Composite Materials”, *Technical Report N°55*, Berkshire, UK.

- [16] Dai, J., Gao, W., and Teng, J., 2013. "Bond-Slip Model for FRP Laminates Externally Bonded to Concrete at Elevated Temperature", *Journal of Composites for Construction*, 17(2), p.217–228.
- [17] Dias, A., 2013 "Caraterização da alvenaria submetida a impacto", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Do Minho, Guimarães.
- [18] Eurocódigo 0, 2009. "Bases para o projecto de estruturas", Instituto Português da Qualidade. Caparica.
- [19] Eurocódigo 2, 2009. "Projecto de estruturas de betão", Instituto Português da Qualidade. Caparica.
- [20] F. M. Fernandes, P. B. Lourenço, F. Castro, 2010. "Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties", *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*, p.29-48.
- [21] Fedele R, Milani G, 2010. "A numerical insight into the response of masonry reinforced by FRP strips. The case of perfect adhesion", *Composite Structures*, 92(10):p2345-57.
- [22] Ferreira, F., 2003. "Análise do Comportamento Dinâmico de Componentes Estruturais sob Solicitações Generalizadas", Dissertação de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto.
- [23] Gao, W.Y., Teng, J.G., and Dai, J.G., 2012. "Effect of temperature variation on the full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints", *Journal of Composites for Construction*, ASCE.
- [24] Ghiassi B., 2013. "Durability analysis of bond between composite materials and masonry substrates", Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- [25] Gibson, A.G., 2003. "The cost effective use of fibre reinforced composites offshore", Research Report 039, Prepared by the University of Newcastle Upon Tyne, UK, for the Health and Safety Executive.
- [26] Halliwell S., Reynolds T., 2004. "Effective Use of Fibre Reinforced Polymers Materials in Construction", FBE Report 8, Centre for Composites in Construct., UK.
- [27] Horiguchi T., 1997. "Effect of Test Methods and Quality of Concrete on bond strength of CFRP Sheet", *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Proceedings of Third International Symposium, Vol.1, p.265-270.
- [28] Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2007. "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.", Norma Portuguesa NP EN 206-1, Lisboa.
- [29] J.P. Firmo, 2010. "Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

-
- [30] JCI TC952, 1998, "Continuous fiber reinforced concrete", relatório técnico do JCI, comité técnico em betão reforçado com fibras contínuas (TC952), Tokyo, Japão.
- [31] J.R. Correia, 2004. "Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP). Aplicação de Vigas Mistas GFRP-Betão na Construção", Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [32] J.R. Correia, 2012. "Compósitos de Matriz Polimérica", Ciência e Engenharia de Materiais de Construção, capítulo 11, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [33] Juvandes, L.F.P., 1999. "Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP", Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto.
- [34] Juvandes L., Marques A. T. e Figueiras J.A., 1996-a, "Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão", relatório técnico, Universidade do Porto, Porto.
- [35] K. -H. Min, S. -H. Cho, D. -Y. Yoo & Y. -S. Yoon, 2010. "Behaviors of FRP sheet reinforced concrete to impact and static loading", Korea Concrete Institute.
- [36] Kinloch AJ, 1979. "Interfacial fracture mechanical aspects of adhesive bonded joints - a review", *The Journal of Adhesion*, 10(3):p.193-219.
- [37] Klamer, E., 2006. "The influence of temperature on concrete structures strengthened with externally bonded CFRP", Research Report, Journal Adhesive Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands.
- [38] Klamer, E., 2009. "Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP", Phd Thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [39] Kralj B, Pande GN, Middleton J., 1991. "On the mechanics of frost damage to brick masonry", *Computers & Structures*, 41(1):p.41:53-66.
- [40] Lee LH, 1991. "Adhesive bonding", Plenum Press, New York, p.239-290.
- [41] Lee YJ, Boothby TE, Bakis CE, Nanni A, 1999. "Slip modulus of FRP sheets bonded to concrete *Journal of Composites for Construction*, 3:p.161-67.
- [42] Leone, M., Matthys, S., and Aiello, M.A., 2009. "Effect of elevated service temperature on bond between FRP EBR systems and concrete", *Composites Part B: Engineering*, 40(1):p.85-93.
- [43] Maeda T, Asano Y, Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, 1997. "A study on bond mechanism of carbon fiber sheet", *Proc of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.*" p.279-286.
- [44] MALEK, A. M., 1997. "Analytical study of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced plastic plates (fabrics)", Tese de Doutoramento, Universidade de Arizona, Dep. Eng. Civil e Eng. Mecânica, Tucson, Arizona.
- [45] Maruccio, C., 2010. "Numerical Analysis of FRP Strengthened Masonry Structures", Dissertação de Doutoramento em Engenharia de Estruturas, Università di Roma "La Sapienza" (Italia) e Universidade do Minho.
-

- [46] MEIER, U., 1997-a. "Repair using advanced composites", proceedings of the International Conference of Composite Construction - Conventional and Innovative, IABSE, Innsbruck, Austria, p.113-124.
- [47] M. S. S., Ribeiro, 1997. "Processos tradicionais de reparação da corrosão em estruturas de betão", Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, LNEC, Lisboa, p.317-337.
- [48] Mufti A, Erki M, Jaeger L., 1991. "Advanced composite materials with application to bridges", Montreal, Quebec, Canada: Canadian Soci Civil Eng. p.21-70.
- [49] Oliveira, D.V., Basilio, I., Lourenço, P.B., 2010. "Experimental bond behaviour of FRP sheets glued on brick masonry", *Journal of Composite for Construction*, 14(3):p.312-323.
- [50] P.A. Buchan, J.F. Chen, 2007. "Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review", *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6):p.509–522.
- [51] Pereira, J.M., 2014. "Security Evaluation and Design of Structures Subjected to Blast Loading", Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- [52] Riisgaard, B.; Ngo, T.; Mendis, P.; Georgakis, C.T.; Stang. H, 2007. "Dynamic Increase Factors for High Performance Concrete in Compression using Split Hopkinson Pressure Bar", *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS)*. Denmark.
- [53] Silva, I., 2012. "Caracterização Experimental da Alvenaria Submetida a Ações de Impacto", Dissertação em Engenharia Civil, Universidade Do Minho.
- [54] T. Keller, 1999. "Advanced Materials: An Introduction", *Structural Engineering International*, 9(4): p. 250.
- [55] T. Keller, 2003 "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", *International Association for Bridge and Structural Engineering*.
- [56] W. Smith, 1998. "Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", McGraw-Hill, Lisboa.
- [57] Willis CR, Yang Q, Seracino R, Griffith MC, 2009. "Bond behavior of FRP -to-clay brick masonry joints", *Engineering Structures*, 31(11):p.2580–2587
- [58] Wu, Z.S., Iwashita, K., Yagashiro, S., Ishikawa, T., and Hamaguchi, Y., 2005. "Temperature effect on bonding and debonding behavior between FRP sheets and concrete", *Journal of the Society of Materials Science*, 54(5):p.474-480.
- [59] Yuan H, Teng JG, Seracino R, Wu ZS, Yao J., 2004. "Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints", *Engineering Structures*, 26(5):p.553–65.

Anexo A – Caracterização da resistência à compressão do betão aos 28 dias

	Peso [kg]	Força [kN]	Tensão [MPa]	Provete
A1	3,52	388,6	49,47808871	CILINDRO
A2	3,48	307,1	39,10118642	CILINDRO
A3	3,5	298,4	37,99346801	CILINDRO
A4	7,66	898	39,91111111	CUBO
A5	7,66	963	42,8	CUBO
B1	3,4	248,3	31,6145379	CILINDRO
B2	3,46	258,1	32,86231265	CILINDRO
B3	3,46	276,1	35,15414383	CILINDRO
B4	7,6	960	42,66666667	CUBO

Dimensões:	Amassadura A	Cilindro	42,19091
Cilindro		Cubo	41,35556
9,9cm diâmetro	Amassadura B	Cilindro	33,21033
19,5 cm altura		Cubo	42,66667
Area [m ²]	0,007854	Média	37,70062
			42,01111
Cubo 15/15,2 cm lado			
Area [m ²]	0,0225		

Classes de resistência à compressão segundo o Eurocódigo 2:

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ [MPa]	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ [MPa]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Anexo B – Catálogos dos fornecedores com as propriedades dos materiais utilizados

MAPEWRAP G UNI-AX

**MapeWrap G
UNI-AX**

TECHNICAL DATA (typical values)	
PRODUCT IDENTIFICATION	
Type of fibre:	glass Type E - CR (corrosion resistant)
Consistency:	uni-directional fabric
Density (kg/dm ³):	2.62
Customs class:	7019 40 00
MAPEWRAP G UNI-AX 900/30 AND MAPEWRAP G UNI-AX 900/60	
Weight (g/m ²):	900
Fabric equivalent thickness (mm):	0.48
Fabric cross area per unit width (mm ² /m):	342.2
Tensile strength (MPa):	2,560
Tensile modulus of elasticity (GPa):	80.7
Elongation (%):	3-4
FINAL PERFORMANCE	
Bonding to concrete (MPa):	> 3 (concrete failure)

MAPEWRAP 31 RESIN

MapeWrap 31

TECHNICAL DATA (typical values)

PRODUCT IDENTITY

	Component A	Component B
Consistency:	paste	liquid
Colour:	yellow	transparent yellow
Specific gravity (g/cm ³):	1.05	1.12
Brookfield viscosity (mPa-s):	17000 (shaft 3 - rev. 5)	320 (shaft 2 - rev. 5)

APPLICATION DATA (at +23°C - 50% R.H.)

Mix ratio:	component A : component B = 4 : 1
Mix consistency:	gelatine paste
Colour of mix:	yellow
Specific gravity of the mix (kg/m ³):	1,060
Brookfield viscosity (mPa-s):	7,000 (shaft 3 - rev. 5)
Workability time: - at +10°C: - at +23°C: - at +30°C:	60' 40' 20'
Setting time: - at +10°C: - at +23°C: - at +30°C:	90' 50' 30'
Application temperature:	from +5°C to +30°C
Adhesion to concrete (N/mm ²):	> 3 (after 7 days at +23°C - concrete failure)
Tensile strength (ASTM D 638) (N/mm ²):	40
Tensile elongation (ASTM D 638) (%): - after 28 days:	1.80
Compressive strength (ASTM D 695) (N/mm ²):	70
Flexural strength (ISO 178) (N/mm ²):	70
Modulus of elasticity under compression (ASTM D 695) (N/mm ²):	1,400
Modulus of elasticity in flexion (ISO 178) (N/mm ²):	3,000



S&P C-SHEET 240

Technical Data Sheet



S&P C-Sheet 240

Sheet of carbon fibre for **dry and wet lay up**

Technical data (unidirectional)	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²	600 g/m ²
Elastic modulus [kN/mm ²]	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 240
Tensile strength [N/mm ²]	≥ 4'500	≥ 4'300	≥ 4'300	≥ 4'300
Fibre weight [g/m²] (main direction)	200	300	400	600
Weight per unit area of sheet [g/m ²]	230	330	430	630
Density [g/cm ³]	1.77	1.79	1.79	1.79
Elongation at rupture [%]	1.75	1.70	1.70	1.70
Design thickness (fibre weight/density)[mm]	0.113	0.168	0.223	0.335
Theoretical design cross-section 1000 mm width [mm ²]	113	168	223	335
Reduction factor for design (manual lamination / UD sheet)	1.2 (recommended by S&P)	1.2 (recommended by S&P)	1.2 (recommended by S&P)	1.2 (recommended by S&P)
Tensile force of 1000 mm width ultimate [kN]	420	600	800	1'200
Tensile force of 1000 mm width at 0.6% ε for design (flexural) [kN]	135	200	265	400
Tensile force of 1000 mm width at 0.4% ε for design (confinement) [kN]	90	135	180	270
Delivery: (Special sheets upon request)	Width: 300 or 600 mm Length roll: 100 m	Width: 300 or 600 mm Length roll: 100 m	Width: 300 or 600 mm Length roll: 100 m	Width: 300 mm Length roll: 100 m
Application:	<ul style="list-style-type: none"> • Flexural enhancement (low quality of substrate) • Axial load enhancement of columns / Replacement of stirrups in columns 			

S&P RESIN 55

Technical Data Sheet



Approvals

Certified in accordance with EN 1504-4

Technical data

(The standard values below indicated are based on +20°C and 50% relative humidity of air.)

Density	1.11 kg/l		
Mixing ratio by weight	2:1 (resin to hardener)		
Application temperature	+8°C to +35°C		
Application time at	+ 10°C	3 h	
	+ 20°C	45 min	
	+ 30°C	30 min	
Dust-dry after	4 h		
Hardening time	7 days		
Glass transition temperature EMPA 461.427/2	44°C		
Tensile strength after ISO 527-2:1993(E) EMPA 461'427	14 days	35.8 MPa	
Elongation at break ISO 527-2:1993(E) EMPA 461'427	14 days	2.3 %	
Modulus of elasticity static ISO 7500-1:2004-11 (EMPA 461'427)	14 days	2'581.8 MPa	
Modulus of elasticity dynamic EMPA 461.427/2	14 days	+20 °C	2'515 MPa
	14 days	-20 °C	2'989 MPa
Pull off strength on concrete job-site tests	failure in concrete		
Pull off strength on steel In-house tests	> 15 N/mm ²		
Toxicity class	Comp. I	9	
Toxicity class	Comp. II	8	
Transport class / UN No.	Comp. I	III / 3082	
	Comp. II	III / 2735	

Packaging

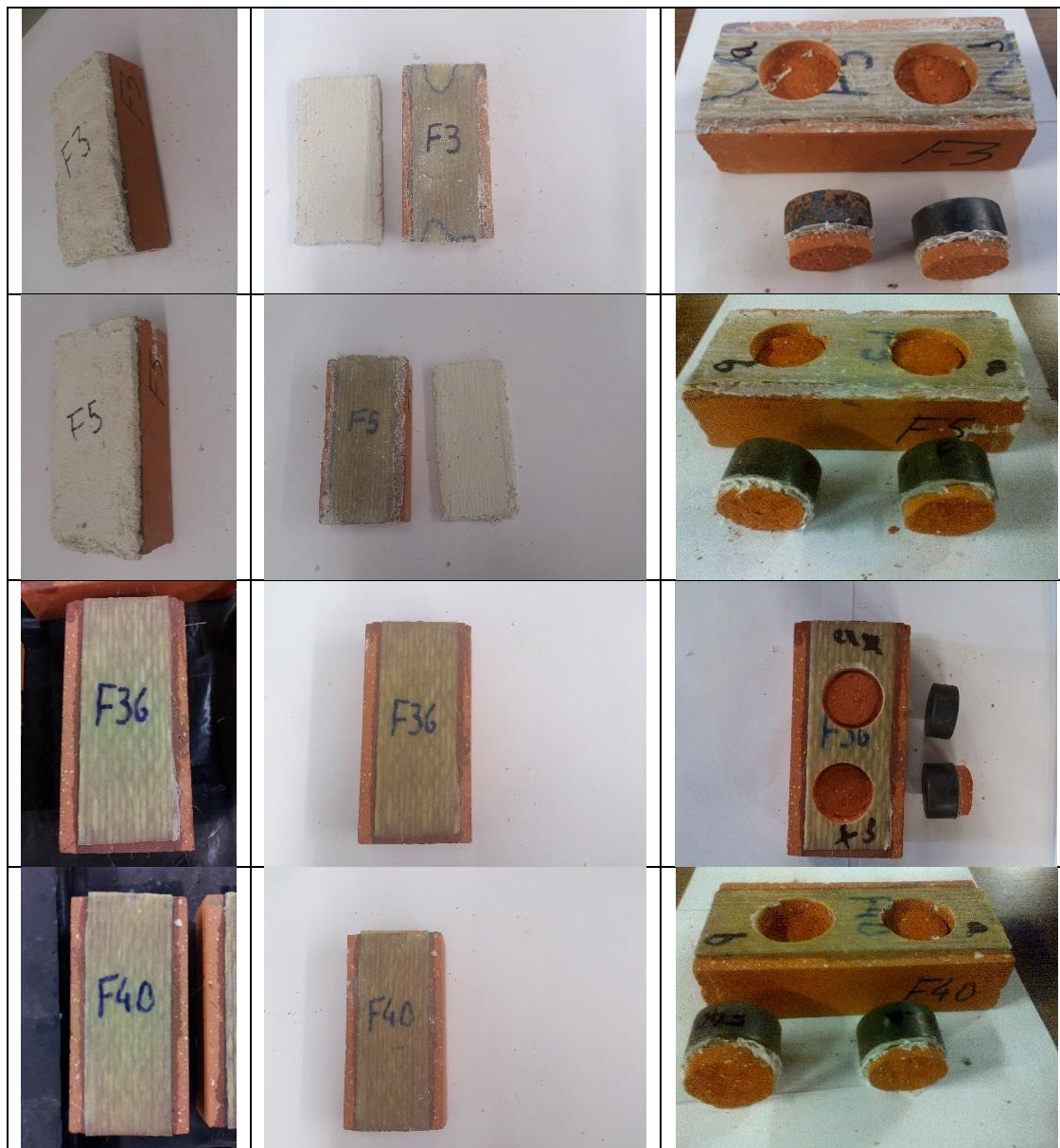
Units of 6 kg or container of 1'000 l

Storage

In original containers, at +5°C to +25°C, 24 months

Anexo C – Catálogo fotográfico do sistema Tijolo-GFRP submetido a elevadas temperaturas

70°C, 1h de exposição



70°C, 2,5h de exposição



70°C, 4h de exposição



100°C, 1h de exposição



100°C, 2,5h de exposição



100°C, 4h de exposição



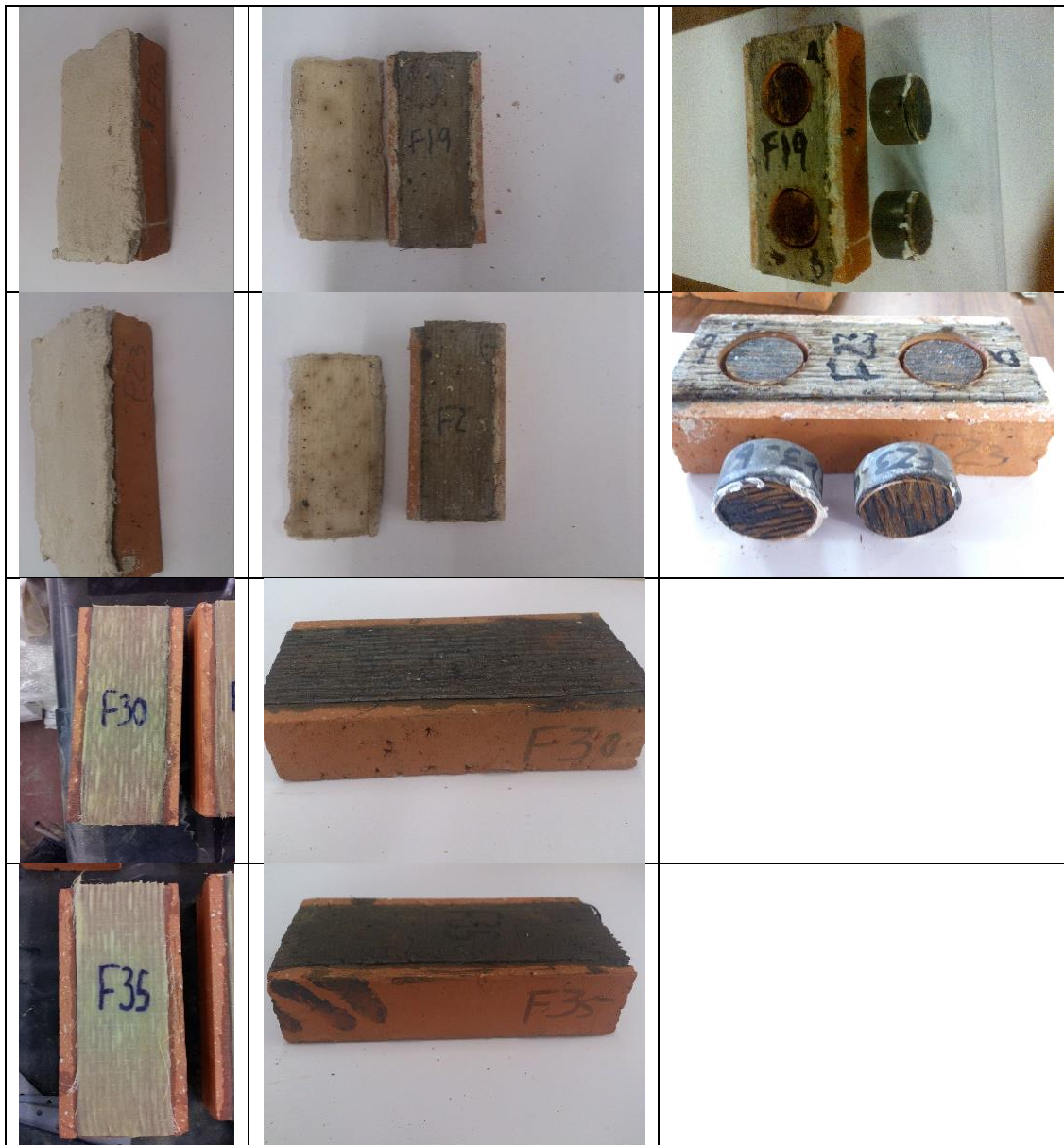
280°C, 1h de exposição



280°C, 2,5h de exposição



280°C, 4h de exposição



Anexo D – Catálogo fotográfico do sistema Betão-CFRP submetido a elevadas temperaturas

70°C, 1h de exposição



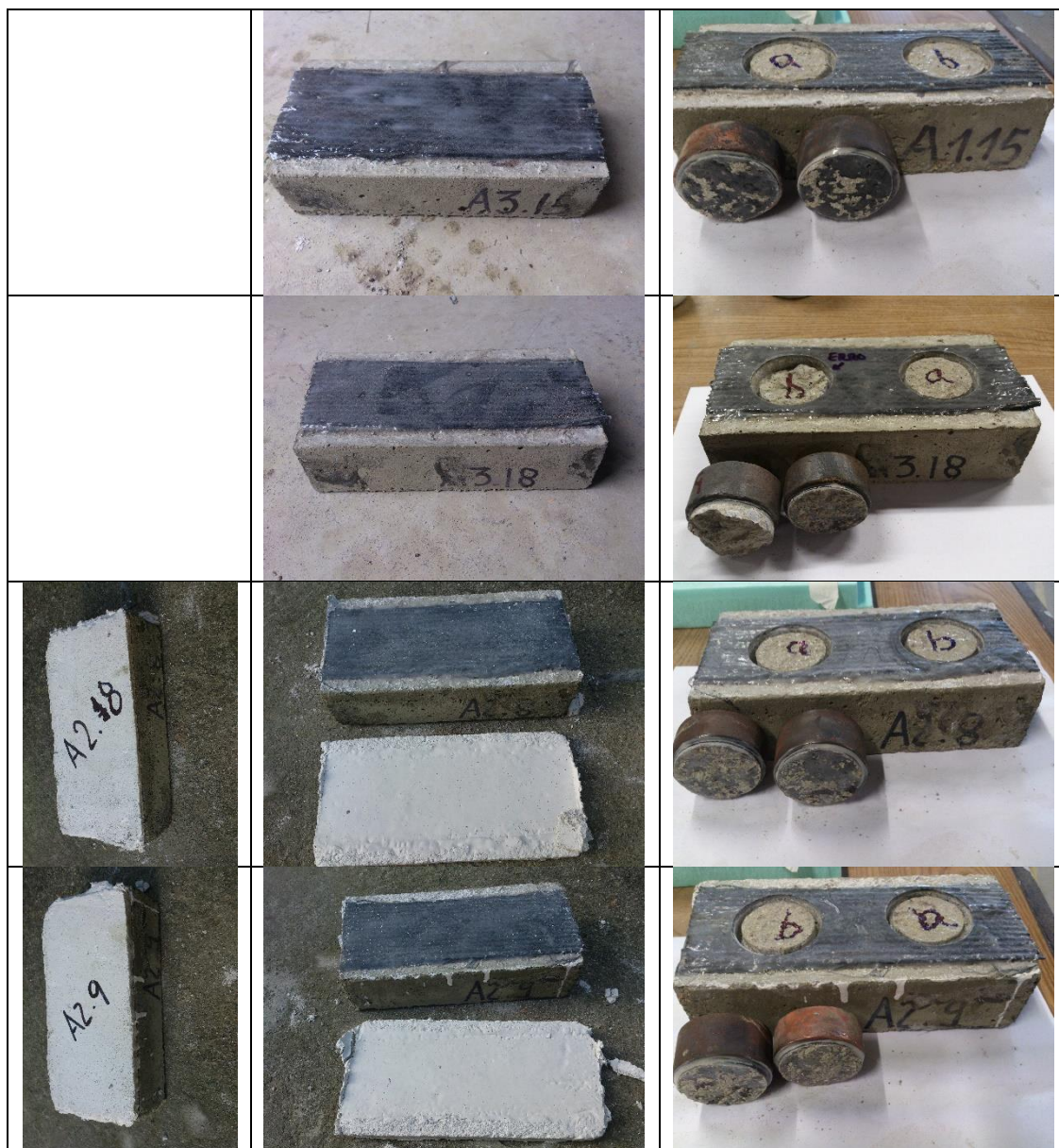
70°C, 2,5h de exposição



70°C, 4h de exposição



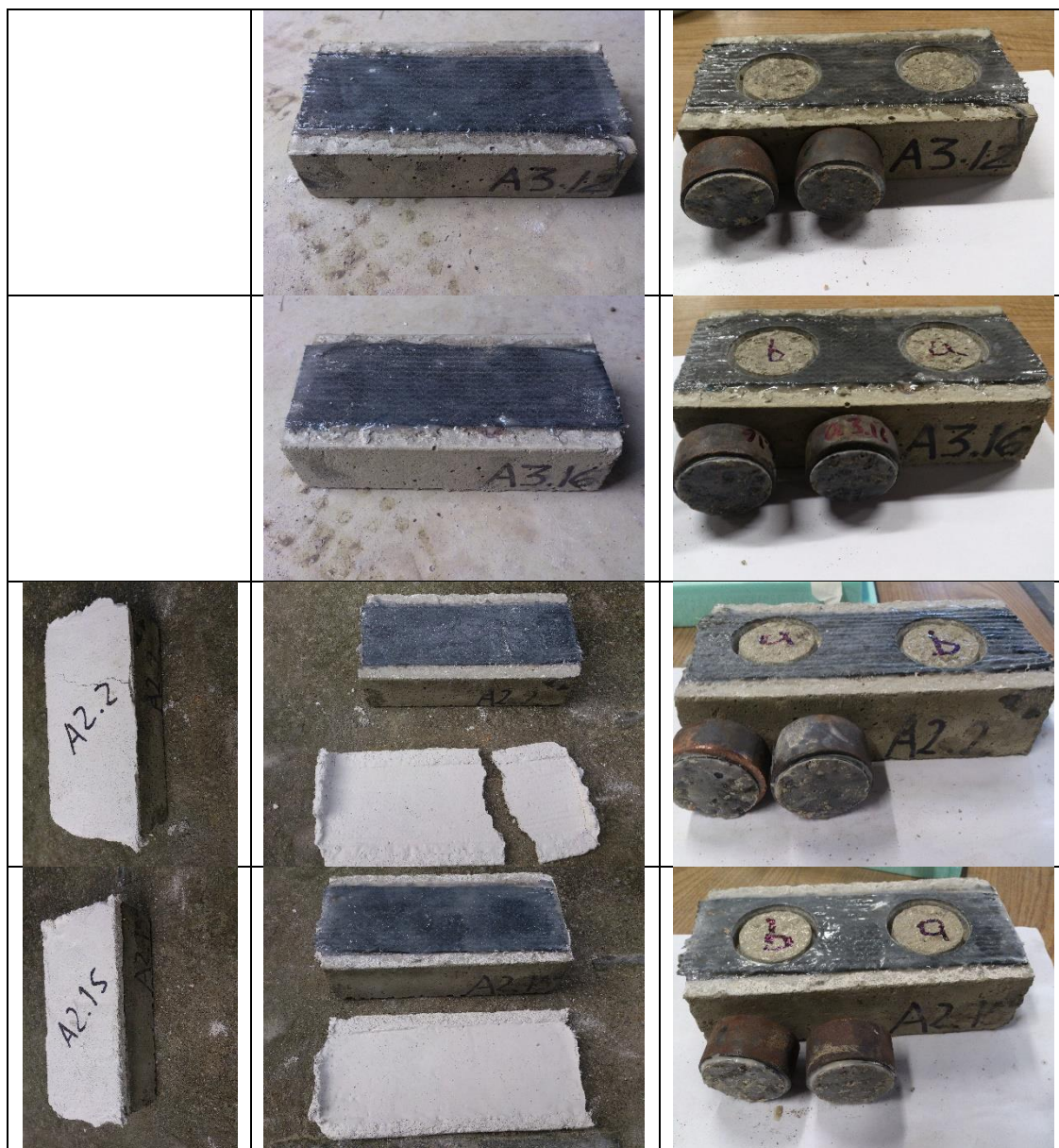
100°C, 1h de exposição



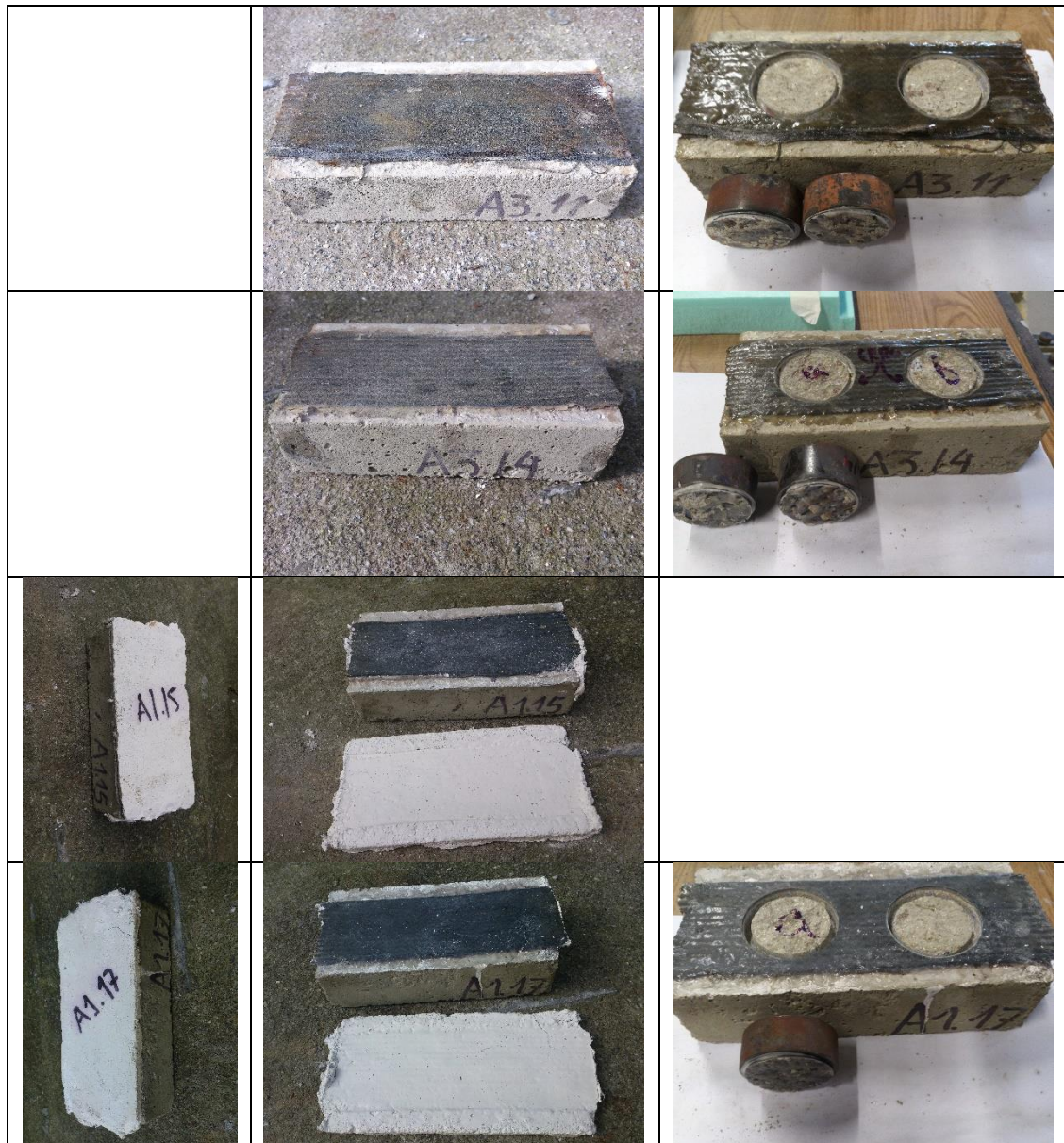
100°C, 2,5h de exposição



100°C, 4h de exposição



280°C, 1h de exposição



280°C, 2,5h de exposição



280°C, 4h de exposição

