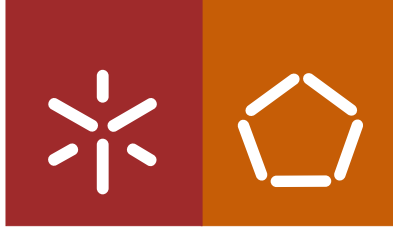


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Manuela Meunier Campos dos Reis Maia

**Aderência entre alvenaria antiga e
materiais compósitos sob condições
de degradação ambiental**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Manuela Meunier Campos dos Reis Maia

**Aderência entre alvenaria antiga e
materiais compósitos sob condições
de degradação ambiental**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Daniel Oliveira

outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Nome

Manuela Meunier Campos dos Reis Maia

Endereço eletrónico: a54262@alunos.uminho.pt

Número do Bilhete de Identidade: 13619618

Título dissertação

ADERÊNCIA ENTRE ALVENARIA ANTIGA E MATERIAIS COMPÓSITOS SOB CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

Orientador:

Daniel Vitorino Castro Oliveira Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado:

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Este estudo não é apenas resultado de um empenho individual, mas sim de um conjunto de esforços que o tornaram possível e sem os quais teria sido muito mais difícil chegar ao fim desta etapa, que representa um importante marco na minha vida pessoal e profissional. Desta forma, manifesto a minha gratidão a todos os que estiveram presentes nos momentos de angústia, de ansiedade, de insegurança, de exaustão e de satisfação.

Agradeço ao meu orientador científico, Dr. Daniel Oliveira, ao Eng. Bahman Ghiassi e ao Eng. Hamid, alunos de doutoramento da Universidade do Minho, pelo apoio na realização dos provetes e na execução dos ensaios, assim como por toda a disponibilidade na escrita da presente dissertação.

Agradeço igualmente à equipa técnica do laboratório de Estruturas de Engenharia Civil (LEST) da Universidade do Minho por todo o apoio na realização dos ensaios.

Por último, um agradecimento muito especial à minha família mais próxima e amigos que me ajudaram na realização deste trabalho. Agradeço em especial à minha mãe, pelo esforço realizado durante estes anos de curso, assim como pelo amor, apoio e compreensão que sempre soube dar. Obrigada por me proporcionarem o melhor durante todos estes anos.

RESUMO

Devido à importância histórica do patrimônio cultural para qualquer país, não só socialmente mas também do ponto de vista técnico, tem surgido um crescente interesse no estudo do seu comportamento. Como qualquer outra estrutura, ao longo da sua vida útil, as construções históricas estão sujeitas à deterioração devido a ações ambientais e acidentais como terremotos, assentamentos diferenciais e rutura de elementos estruturais devido à falta de resistência mecânica. Pelas razões expostas, é importante perceber e interpretar o seu comportamento e a evolução do dano que eventualmente possa existir para se poder avaliar a necessidade duma intervenção estrutural.

O uso de materiais compósitos FRP utilizados para reforçar componentes de alvenaria estrutural, tem como objetivo aumentar a resistência e/ou rigidez dos elementos estruturais para diferentes condições de carga. A durabilidade destes materiais e principalmente as propriedades da ligação destes materiais à alvenaria são pouco conhecidas por serem de recente utilização em engenharia civil. Deste modo, a motivação para a realização desta dissertação surge com o aumento do número de reforços de estruturas através de aplicação de materiais compósitos de matriz polimérica para os quais, por terem um período ainda curto de aplicação, é ainda desconhecido o desempenho das ligações FRP/alvenaria. Em particular, o real conhecimento do desempenho destas ligações quando expostas às adversidades ambientais tais como ambientes salinos, húmidos ou secos, gelo/degelo ou a temperaturas altas é ainda incompleto.

Esta dissertação apresenta os resultados preliminares de uma campanha experimental que teve como objetivo investigar os efeitos da água sobre o comportamento da ligação GFRP e tijolos de barro. Com o propósito de caracterizar a distribuição de esforços na interface FRP-alvenaria foram realizados ensaios dos provetes dos componentes (tijolo, primário, resina e GFRP) de referência e expostos à água para diferentes idades de exposição. Realizam-se ensaios à tração no primário, na resina e na manta de GFRP, e ensaios de compressão nos tijolos. Nos provetes reforçados (tijolo reforçado com manta de GFRP) de referência e dos expostos à água para diferentes idades de exposição, executam-se ensaios de arrancamento (“pull-off”) e ensaios de aderência (“bond”). Para este agente ambiental, foram estudados diversos parâmetros e comparados com a situação de referência (sem qualquer

envelhecimento acelerado) tais como a tensão de aderência máxima da ligação, a força máxima transmitida ao compósito de GFRP, a extensão máxima e os deslocamentos relativos entre materiais.

Palavras-chave: Alvenaria; Reforço estrutural; Aderência; Compósitos de GFRP colados exteriormente; Durabilidade.

ABSTRACT

Given the historical importance of cultural heritage to any country, not only socially but also from a technical standpoint, there has been a growing interest in studying their behavior. Like any other structure throughout its service life, historic buildings are subjected to deterioration due to environmental or accidental actions such as earthquakes, differential settlement and rupture of the structural elements due to lack of mechanical strength. For these reasons, it is important to understand and interpret the behavior and evolution of the damage for assessing the need for structural intervention.

The use of FRP composites for strengthening masonry structural components, aims to increase the strength and/or stiffness of the structural elements for different loading conditions. The durability of these materials and especially the bond between them and the masonry substrate are not well known in civil engineering applications and the knowledge about their ageing is still very few. The motivation of this study lies on the fact that several structures have been retrofitted or reinforced with FRP composites and the long-term performance of the FRP-to-masonry interfaces is still unknown. In particular, the knowledge on the performance of interfaces when exposed to severe environmental conditions (such as salt, wet and dry conditions, freeze and thaw cycles and high temperatures) is scarce.

The present work presents the preliminary results of an experimental campaign aimed to investigate the effect of water on the bond behavior between GFRP and clay bricks. With the aim of characterizing the stress distribution at the interface, FRP-tests were performed. Mechanical characterization of masonry components (brick primary resin and GFRP) has been performed by conducting tensile tests on epoxy, primer and GFRP coupon and compressive tests on brick specimens. For strengthened specimens (reinforced with GFRP) pull-off and shear debonding (pull out) tests are performed. The tests were performed on reference (no water immersion) and specimens immersed for different periods of time. Various parameters were studied and compared with the baseline (no water immersion) results such as the maximum adhesion tension of the interface, the maximum force transmitted to the composite GFRP, and the maximum FRP slip.

Keywords: Masonry; Strengthening; Bond; Externally bonded; Durability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos da Tese.....	5
1.2. Metodologia	5
1.3. Organização da tese.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1.Introdução	7
2.2. Durabilidade de aplicações de reforço FRP em estruturas de alvenaria	7
2.3. Fatores ambientais que influenciam a aderência e o desempenho da técnica de colagem alvenaria-FRP.....	8
2.3.1. Influência da temperatura.....	8
2.3.2. Influência da humidade	9
2.4. Estudos realizados sobre os efeitos da água.....	11
2.5. Envelhecimento acelerado.....	13
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	15
3.1. Materiais.....	15
3.2. Provetes	16
3.2.1. Tijolo	16
3.2.2. Primário e Resina epoxídica.....	17
3.2.3. Tiras de GFRP	19
3.2.4. Tijolo-FRP.....	20
3.2.4.1.Tijolo - FRP para os testes de arrancamento.....	20
3.2.4.2. Tijolo – FRP para os testes de aderência.....	21
3.3. Testes de imersão por água	23
3.3.1. Provetes dos componentes.....	23
3.3.2. Provetes reforçados com GFRP	24
3.4. Caracterização mecânica	24
3.4.1. Tijolo	24

3.4.2. Primário, Resina e GFRP	25
3.4.3. Tijolo-FRP.....	27
3.4.3.1. Tijolo – FRP para os testes de arrancamento	27
3.4.3.2. Tijolo – FRP para os testes de aderência.....	28
4. DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS	31
4.1. Tijolo.....	31
4.1.1. Cubos de tijolo de referência.....	31
4.1.2. Cubos de tijolo imersos	32
4.1.2.1. Série n.º 1	32
4.1.2.2. Série n.º 2	33
4.2. Primário.....	34
4.2.1. Primário de referência	34
4.2.2. Primário imerso	36
4.2.2.1. Série n.º 1	36
4.2.2.2. Série n.º 2	37
4.3. Resina epoxídica	38
4.3.1. Resina epoxídica de referência.....	38
4.3.2. Resina epoxídica imersa.....	39
4.3.2.1. Série n.º 1	39
4.3.2.2. Série n.º 2	41
4.4. Tiras de GFRP	42
4.4.1. Tiras de GFRP de referência	42
4.4.2. Tiras de GFRP imersas.....	44
4.4.2.1. Série n.º 1	44
4.4.2.2. Série n.º 2	45
4.5. Análise comparativa.....	46
4.5.1. Modos de rutura	46
4.5.2. Comportamento.....	47
4.5.3. Parâmetros de comparação.....	47
5. Degradação da ligação	49
5.1. Testes de arrancamento	49
5.1.1. Ensaios com os provetes reforçados de referência	49
5.1.2. Ensaios com os provetes reforçados sujeitos à imersão na água.....	50
5.1.2.1. Série n.º 1	50
5.1.2.2. Série n.º 2	51
5.1.3. Análise comparativa.....	53
5.2. Testes de aderência entre o tijolo e o GFRP	54

5.2.1. Ensaios com os provetes reforçados de referência	54
5.2.2. Ensaios com os provetes reforçados sujeitos a imersão na água.....	56
5.2.2.1. Série n.º 1	56
5.2.2.2. Série n.º 2	57
5.2.3. Análise comparativa.....	59
6. CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação dos materiais compósitos de FRP (Juvandes, 1999).....	2
Figura 2 – Constituição dos materiais compósitos de FRP (Nanni, 2004).....	3
Figura 3 – Fibra de vidro (à esquerda), de aramida (ao centro) e de carbono (à direita) (PUC, s.d).	4
Figura 4 – Efeitos da humidade no comportamento de uma resina (Juvandes e Figueiras).....	10
Figura 5 – Sequência da execução dos cubos de tijolo.	17
Figura 6 – Sequência da execução dos provetes de primário.	18
Figura 7 – Esquema ilustrativo da forma dos provetes de resina.	18
Figura 8 – Esquema ilustrativo da forma dos provetes de GFRP.....	19
Figura 9 – Sequência da aplicação de uma intervenção de reforço.....	21
Figura 10 – Sequência da aplicação de uma intervenção de reforço.....	22
Figura 11 – Ensaio de compressão.	25
Figura 12 – Ensaio de tração nos provetes de primário, de resina e de GFRP.	26
Figura 13 – Procedimento geral do ensaio de arrancamento (Cabral, 2012).	27
Figura 14 – Configuração dos ensaios de arrancamento.	28
Figura 15 – Ensaio de aderência.	29
Figura 16 – Posicionamento dos LVDT's e o referencial considerado para os provetes reforçados.	30
Figura 17 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo de referência.	31
Figura 18 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo da série n.º 1.	33
Figura 19 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo da série n.º 2.	34
Figura 20 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário de referência.....	35
Figura 21 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário da série n.º 1.....	36
Figura 22 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário da série n.º 2.....	37
Figura 23 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina de referência.....	39
Figura 24 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina da série n.º 1.	40
Figura 25 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina da série n.º 2.	41
Figura 26 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP de referência.....	43
Figura 27 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP da série n.º 1.....	44
Figura 28 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP da série n.º 2.....	45
Figura 29 – Modos de rutura.	46
Figura 30 – Modos de rutura nos provetes de GFRP.	47
Figura 31 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento da série dos provetes de referência.....	49
Figura 32 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento dos provetes da série n.º 1.....	51

Figura 33 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento dos provetes da série n.º 2.....	52
Figura 34 – Modos de rutura nos provetes reforçados.	53
Figura 35 – Histograma com os resultados normalizados dos testes de arrancamento.	53
Figura 36 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes reforçados de referência.....	54
Figura 37 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes da série n.º 1.	56
Figura 38 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes da série n.º 2.	58
Figura 39 – Modos de rutura nos provetes reforçados.	59
Figura 40 – Histograma com os resultados normalizados dos testes de aderência.	59
Figura 41 – Gráfico com os deslocamentos relativos para as três extremidades.	60
Figura 42 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR2 de referência.	69
Figura 43 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR3 de referência.	69
Figura 44 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado ORG2 de referência.	70
Figura 45 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado ORG4 da série n.º 1.	70
Figura 46 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR5 da série n.º 2.	71
Figura 47 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR6 da série n.º 2.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da resina e da fibra de vidro.....	16
Tabela 2 – Programa experimental.....	23
Tabela 3 – Programa experimental.....	24
Tabela 4 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo de referência.	32
Tabela 5 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo da série n.º 1.....	33
Tabela 6 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo da série n.º 2.....	34
Tabela 7 – Resultados obtidos referentes aos provetes de primário de referência.	35
Tabela 8 – Resultados referentes aos provetes de primário da série n.º 1.....	37
Tabela 9 – Resultados referentes aos provetes de primário da série n.º 2.....	38
Tabela 10 – Resultados referentes aos provetes de resina epoxídica de referência.	39
Tabela 11 – Resultados referentes aos provetes de resina da série n.º 1.	40
Tabela 12 – Resultados referentes aos provetes de resina da série n.º 2.	42
Tabela 13 – Resultados referentes aos provetes de GFRP de referência.	43
Tabela 14 – Resultados referentes aos provetes de GFRP da série n.º 1.....	44
Tabela 15 – Resultados referentes aos provetes de GFRP da série n.º 2.....	46
Tabela 16 – Propriedades mecânicas normalizadas.	48
Tabela 17 – Resultados referentes aos provetes reforçados de referência.	50
Tabela 18 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 1.....	51
Tabela 19 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 2.....	52
Tabela 20 – Resultados referentes aos provetes reforçados de referência.	55
Tabela 21 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 1.....	57
Tabela 22 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 2.....	58
Tabela 23 – Deslocamentos relativos médios na extremidade carregada para as diferentes séries.	61
Tabela 24 – Valores da força máxima da ligação para os provetes com a superfície original e para os provetes com a superfície regularizada.	61
Tabela 25 – Designações e dimensões dos provetes de tijolo.	72
Tabela 26 – Designações e dimensões dos provetes de primário.....	72
Tabela 27 – Designações e dimensões dos provetes de resina.	73
Tabela 28 – Designações e dimensões dos provetes de GFRP.	74

1. INTRODUÇÃO

Como produto industrializado para construção, o tijolo cerâmico de furação surge no século XIX no início da Revolução Industrial. As características deste material, relativamente ao conforto do espaço construído (isolamento acústico, isolamento térmico, impermeabilidade, resistência a intempéries, possibilidade de diversificação estética), à facilidade de aplicação (facilidade de transporte, disponibilidade de materiais, facilidade de encontrar mão-de-obra), às propriedades físicas e mecânicas adequadas à construção de edificações (resistência ao fogo, capacidade resistente), permitiu uma expansão notável da alvenaria de tijolo cerâmico.

As estruturas de alvenaria têm sido usadas desde sempre na construção, mas o seu envelhecimento, a degradação do material, os assentamentos e as alterações estruturais têm levado à necessidade do seu reforço para garantir um desempenho adequado. Deste modo, devem ser previstos materiais de reforço com as características mais adequadas atendendo a fatores económicos, fatores de segurança e fatores funcionais. Nas últimas décadas tem ocorrido diversas investigações efetuadas por vários autores para encontrarem materiais com características apropriadas para os novos projetos de engenharia, materiais mais resistentes, duráveis e pouco deformáveis. O desenvolvimento tecnológico possibilitou o aparecimento dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP) que têm vindo a suscitar bastante interesse na engenharia civil uma vez que em outras áreas já tinham demonstrado a sua grande versatilidade e viabilidade de utilização. A indústria da Construção Civil tem, ao longo da sua história, aplicado materiais e desenvolvido técnicas que, inicialmente, foram propostos e utilizados em outros setores específicos onde a disponibilidade para o financiamento da investigação e da experimentação tem sido mais relevante. Desde 1940, que os materiais compósitos têm desempenhado papéis estruturais importantes no campo da engenharia militar, aeroespacial, naval e automobilística, entre outros (Juvandes *et al.*, 1996). A Figura 1 apresenta algumas das áreas referidas para a aplicação dos materiais compósitos FRP. Devido ao seu êxito nestas áreas, os materiais compósitos despertaram, posteriormente, o interesse da engenharia civil em os aplicar, nomeadamente, sob a forma de produtos Compósitos Reforçados com Fibras de sigla FRP (Juvandes *et al.*, 1996).

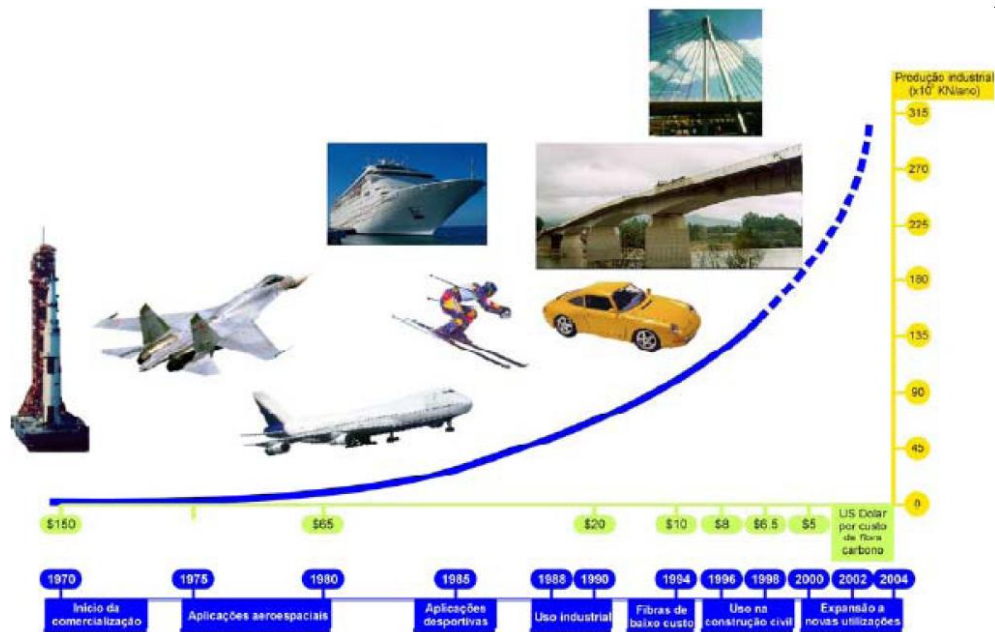


Figura 1 – Aplicação dos materiais compósitos de FRP (Juvandes, 1999).

Os materiais compósitos de FRP, tal como se pode observar na Figura 2, são constituídos essencialmente por fibras embebidas numa matriz polimérica (resina). As fibras, que são o agente estrutural dos materiais compósitos de FRP, apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, têm módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil (comportamento linear elástico sem patamar de cedência). Os parâmetros que influenciam o comportamento das fibras são a forma, a orientação, o grau de concentração e a composição química. A resina num sistema compósito é a componente que tem como objetivo unir as fibras, garantindo assim a transmissão das cargas entre elas, manter a correta posição das fibras quando solicitadas, e ainda protegê-las da agressividade do meio envolvente. Esta parte do material compósito é também conhecida como matriz, ligante ou ainda resina polimérica, devido à sua constituição química (Bank, 2006). 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. Este comportamento deve-se à composição química das resinas, no caso da termoendurecível as cadeias ligam-se de forma muito mais organizada que na termoplástica, formando uma rede tridimensional, e garantindo assim uma maior resistência química e mecânica da resina, bem como um melhor

comportamento mediante altas temperaturas. As resinas termoendurecíveis são por estes motivos as mais utilizadas no ramo da engenharia civil. Dentro das resinas termoendurecíveis existem as poliésteres, as vinilésteres e ainda as epoxídicas. As resinas epoxídicas são as preferidas para aplicação em reforço de estruturas devido às suas excelentes propriedades adesivas, elevada resistência e módulo de elasticidade, baixa retração e elevada durabilidade (Bank, 2006; Schwartz, 1984). Os problemas da resina epoxídica são a sua elevada fragilidade e a redução de algumas das suas propriedades na presença de humidade. As resinas epoxídicas utilizadas são, em regra, compostas por dois elementos, a resina de epóxido e o endurecedor. Para se obter um bom produto epóxido a mistura destas duas componentes deve ser feita nas quantidades exatas, geralmente fornecidas pelo fornecedor, e de forma cuidada para que qualquer molécula do endurecedor estabeleça ligação com as moléculas da resina. O endurecimento do adesivo vai ser função da densidade destas ligações químicas, mas também da estrutura química da resina ainda líquida, do agente de endurecimento e das condições em que se dá a reação, tais como a temperatura, tempo e humidade (Juvandes, 2002). As resinas são materiais quimicamente complexos, o seu comportamento está diretamente relacionado com temperaturas, quantidades de material a fazer, humidade, e ainda a forma de aplicação e o tempo que se demora na operação.

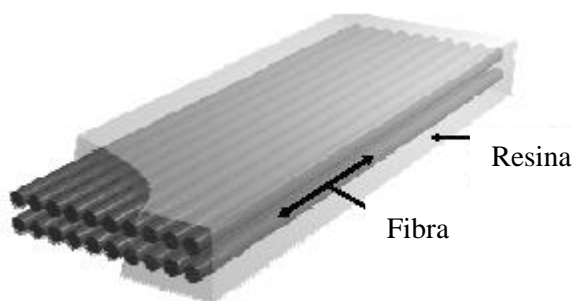


Figura 2 – Constituição dos materiais compósitos de FRP (Nanni, 2004).

A Figura 3 apresenta as fibras mais utilizadas, as de vidro, as de aramida e as de carbono. As fibras de vidro apresentam, além da referida elevada tensão de rutura, um bom comportamento como isolante elétrico e térmico, e são ainda as fibras mais baratas do mercado. As fibras aramídicas apresentam dificuldades de moldagem, têm baixa resistência à compressão, são sensíveis à fluência, à ação dos raios ultravioletas e às temperaturas elevadas. As fibras de carbono possuem excelentes propriedades mecânicas, em particular, do módulo de elasticidade em tração que é muito elevado. Para além de serem mais leves, as fibras de carbono apresentam, em termos de rigidez e de capacidade máxima resistente, valores que

superam largamente os dos dois materiais mais comuns em aplicações da engenharia civil, o betão e o aço (Barros, 2007).

A investigação efetuada ao longo deste trabalho está centrada nas fibras de vidro.



Figura 3 – Fibra de vidro (à esquerda), de aramida (ao centro) e de carbono (à direita) (PUC, s.d).

O uso de materiais compósitos FRP utilizados para reforçar componentes de alvenaria estrutural, tem como objetivo aumentar a resistência e/ou rigidez dos elementos estruturais para diferentes condições de carga. A atratividade dos materiais compósitos não se baseia apenas em atributos de desempenho como elevada rigidez e resistência à tração, bom comportamento à fadiga, elevada resistência à corrosão, mas também ao seu reduzido peso específico, à facilidade de aplicação, à disponibilidade quase ilimitada em termos de geometria, que tornam a aplicação deste material altamente atraente e economicamente viável para ser usado em trabalhos de reparação/reforço. No entanto, a utilização dos FRP's na construção tem sido prejudicada pela falta de conhecimento, relativamente à durabilidade no desempenho ao longo do tempo dos FRP's e na ligação entre o FRP e o material a ser reforçado. A investigação sobre o comportamento da ligação a longo prazo tem relevância substancial, pois as falhas prematuras de aderência têm de ser evitadas. A eficácia e a confiança associada às técnicas de reforço externo de componentes de alvenaria dependem do comportamento a longo prazo da ligação entre os materiais compósitos e o substrato de alvenaria. A eficácia do comportamento em serviço do sistema reforçado pode ser afetado sob condições de degradação ambiental que incluem ciclos de temperatura e/ou humidade, a exposição a ambientes marinhos, dióxido de carbono ou raios ultravioletas. Estes podem afetar a integridade tanto da interação entre o substrato e o polímero como a integridade do material polímero em si, provocando uma redução no desempenho global (Silva, 2011).

1.1. Objetivos da Tese

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho foi definida uma investigação na qual é proposta uma técnica de reforço com GFRP num tijolo, que se baseia na colagem de mantas de GFRP na superfície do tijolo. De forma geral, os objetivos definidos para este trabalho são os seguintes: verificar o estado atual da informação disponível na área do reforço de estruturas de alvenaria com materiais compósitos de GFRP, com particular destaque para a vertente do comportamento da aderência entre o GFRP e o substrato de alvenaria; caracterizar o comportamento dos provetes dos componentes e dos provetes reforçados quando sujeito à imersão em água e comparar com a situação de referência; compreender e retirar conclusões dos resultados obtidos; enriquecer o conhecimento no tema “aderência entre alvenaria histórica e materiais compósitos sob condições de degradação ambiental”.

1.2. Metodologia

Na presente dissertação será desenvolvida uma campanha experimental em diversos tijolos reforçados com mantas de GFRP sujeitos à imersão em água. A campanha de ensaios foi realizada no laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Será avaliada a degradação da ligação (tijolo-GFRP) através de dois parâmetros, resistência à tração da ligação e resistência ao corte da ligação.

1.3. Organização da tese

Este trabalho é constituído por seis capítulos. Após esta introdução, no Capítulo 2, descreve-se de forma resumida o resultado do trabalho de pesquisa bibliográfica sobre o tema deste trabalho. De seguida apresenta-se o programa experimental, descrevendo-se as características dos materiais ensaiados, a execução e os modelos destes materiais, a quantidade de provetes que possuem as séries, e a caracterização mecânica dos provetes. Nos Capítulos 4 e 5 descrevem-se os principais resultados obtidos nos provetes dos componentes e nos provetes reforçados, respetivamente. No capítulo 6 é efetuada uma análise geral dos resultados obtidos no programa experimental apresentado no Capítulo 3, salientando-se as principais conclusões sobre o comportamento da ligação tijolo-GFRP. Por fim refere-se as referências bibliográficas e os anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Introdução

Os materiais compósitos têm demonstrado ser uma alternativa interessante para a reabilitação e reforço de estruturas, proporcionando vantagens significativas para as aplicações de restauro muitas vezes não atingíveis com materiais convencionais. No entanto, a utilização dos FRP's na construção tem sido prejudicada pela falta de conhecimento, relativamente à durabilidade no desempenho ao longo do tempo dos FRP's e na ligação entre o FRP e o material a ser reforçado. A durabilidade destes materiais e principalmente da ligação destes materiais à alvenaria são pouco conhecidas por serem de recente utilização em engenharia civil. Determinada condição ambiental pode afetar as propriedades mecânicas, físicas ou químicas de certos materiais. As alterações mecânicas da resistência à tração, da resistência ao corte interlaminar, da resistência da ligação e do módulo de elasticidade são os melhores indicadores indiretos da eficácia, sob condições de degradação ambiental, do reforço com compósitos de FRP (Silva, 2011).

2.2. Durabilidade de aplicações de reforço FRP em estruturas de alvenaria

No caso de reforço externo de componentes de alvenaria, a eficácia e a confiança associada a estas técnicas depende muito do comportamento a longo prazo da ligação entre os materiais compósitos e o substrato de alvenaria. De modo que é necessário avaliar a durabilidade da ligação para os agentes de degradação ambiental.

Para que o recurso à técnica de reforço por colagem exterior seja capaz de aumentar a capacidade resistente de uma estrutura de forma eficaz, é fundamental que ocorra uma correta transferência de esforços entre o FRP e a alvenaria. Para tal, torna-se importante estudar os principais fatores que influenciam os mecanismos de aderência entre os materiais envolvidos no reforço. Atualmente, os mecanismos de degradação da alvenaria, das resinas e das fibras são conhecidos individualmente. A dificuldade surge quando se juntam os materiais para funcionar em conjunto, mais especificamente na ligação entre o material compósito e a alvenaria. Na maioria das vezes, o elemento condicionante no uso deste tipo de reforço são as resinas, as quais sofrem mais alterações na sua constituição quando comparadas com as fibras,

na medida em que estas praticamente não sofrem alteração/degradação face à exposição ambiental.

2.3. Fatores ambientais que influenciam a aderência e o desempenho da técnica de colagem alvenaria-FRP

A eficácia do comportamento em serviço do sistema reforçado e da ligação alvenaria/FRP pode ser afetada sob condições de degradação ambiental que incluem ciclos de temperatura e/ou humidade, a exposição a ambientes marinhos, dióxido de carbono ou raios ultravioletas. Contudo, será dada maior importância aos dois primeiros agentes de degradação mencionados, uma vez que, por um lado são os mais comuns quando se estuda o comportamento a longo prazo destes materiais aplicados no reforço estrutural e, por outro, são os que se encontram mais referenciados pela generalidade dos autores consultados.

2.3.1. Influência da temperatura

A temperatura ambiente é um fator que merece extrema importância no âmbito do reforço exterior por colagem, na medida em que as resinas são as principais afetadas por esta. Para temperaturas elevadas todo o sistema pode ficar comprometido, uma vez que as resinas assumem um papel importante, não só no que diz respeito à ligação do compósito à superfície da alvenaria como na distribuição das tensões às fibras de reforço. A partir de uma certa temperatura, o comportamento do reforço com material compósito tende a piorar. A razão para tal acontecer denomina-se por temperatura de transição vítrea (T_g), a qual é conhecida por ser a temperatura acima da qual as cadeias moleculares da resina se começam a mover e tornam a sua estrutura mais flexível, resultando numa redução da capacidade de colagem, ou até na rutura do sistema de reforço devido à má distribuição das tensões às fibras e consequente sobrecarga individual dos filamentos (Marreiros, 2005). Por outro lado, segundo Juvandes (1999), as baixas temperaturas tornam as resinas mais rígidas e mais sensíveis à rutura por fadiga (solicitações cíclicas), no entanto, geralmente a rigidez e a resistência do compósito mantêm-se inalteráveis. Por outro lado, quando se reforça uma estrutura através de colagem exterior, estão a unir-se três materiais (fibra, resina e alvenaria) com diferentes coeficientes de dilatação térmica. Ao submeter-se a estrutura a grandes variações de temperatura, o desempenho do sistema de reforço pode ser substancialmente afetado, na medida em que os materiais envolvidos apresentam diferentes comportamentos face à

temperatura. Pode-se então afirmar que os ciclos térmicos são mais gravosos do que a existência de temperaturas constantemente elevadas (fib, 2001; Grace, 2004; Marreiros, 2005).

2.3.2. Influência da humidade

Vários estudos constataram que a presença de humidade é, possivelmente, o ambiente mais prejudicial que pode ser encontrado pelo epóxi, usados como adesivos para aplicações na engenharia civil.

A absorção de quantidades limitadas de água pode ser benéfica em termos de melhoria na dureza e na deformação plástica da resina curada. No entanto, a presença de uma quantidade de água excessiva é geralmente considerada prejudicial, provocando uma redução no módulo de elasticidade e na capacidade de reforço. A presença de humidade indesejável no compósito pode iniciar mudanças estruturais dentro da matriz, nas fibras de reforço e na interface reforço/alvenaria, podendo provocar uma deterioração da eficácia do desempenho em serviço da intervenção estrutural. Este fator ambiental surge como o mais importante na análise do desempenho do reforço exterior por colagem, na medida em que, todas as resinas, devido à pequena fissuração que se vai desenvolvendo ao longo do tempo, tornam-se passíveis de absorver água. O acesso deste fator ao compósito processa-se de várias formas, nomeadamente, por capilaridade na interface resina-fibra ou ao longo do eixo longitudinal da fibra, por difusão no interior da matriz polimérica (resina) ou através da penetração em vazios e fendas existentes na estrutura (fib, 2001). Devido à incorporação de água no material compósito, o principal efeito que se faz sentir ao nível da matriz da resina é a redução da temperatura de transição vítrea (T_g). Convém referir que este efeito na resina epóxida pode ser parcialmente reversível por secagem do sistema. No entanto, o mesmo não acontece com as resinas poliéster e viniléster, as quais podem, ou não, ser reversíveis dependendo da temperatura e do tempo de exposição a que estão sujeitas, no entanto, sabe-se que estas absorvem mais água em comparação com as epóxidas (fib, 2001). Na Figura 4 apresenta-se o comportamento de uma resina sujeita à humidade.

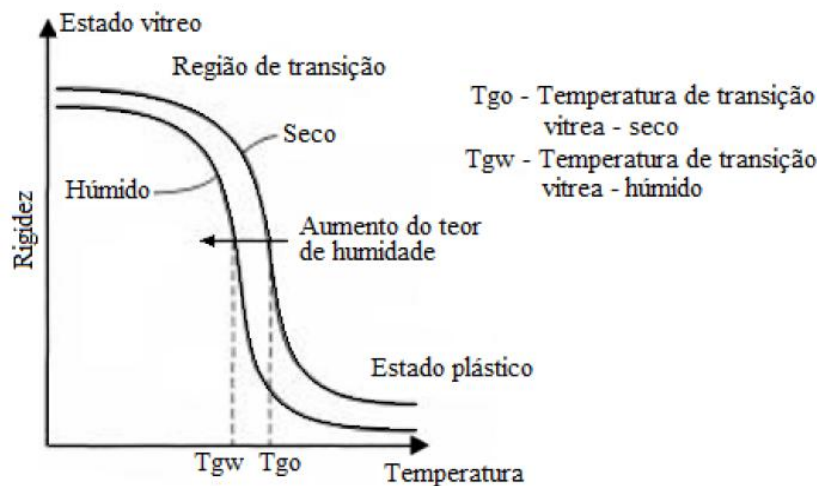


Figura 4 – Efeitos da humidade no comportamento de uma resina (Juvandes e Figueiras).

Em relação à redução da Tg, pode-se observar na Figura 4 que existe um estado inicial da temperatura de transição (T_{go} – seco) do polímero e a rigidez diminui devido ao aumento da temperatura à qual se expõe o material, fazendo com que a resina passe de um estado vítreo para um estado plástico, no qual a cadeia molecular da resina se começa a mover e a tornar-se mais flexível. A questão mais importante surge quando existe a penetração de humidade, pois devido a esta, passa-se a ter uma temperatura de transição mais reduzida (T_{gw} – húmido). Ou seja, o aumento do teor de humidade leva à diminuição da temperatura de transição vítrea, fazendo com que o polímero perca rigidez a temperaturas mais baixas, de acordo com o referido anteriormente (Soares e Martins, 2006).

O principal efeito da água presente num ambiente húmido é a sua difusão para a matriz da resina. Em particular, a matriz de epóxi é capaz de absorver quantidades significativas de água devido à presença de grupos polares capazes de atrair moléculas de água. Os efeitos da exposição à humidade sobre uma resina epóxi curada a frio incluem: (a) plastificação, o que diminui a sua temperatura de transição vítrea (Tg) e afeta as suas propriedades mecânicas; (b) cura adicional, promovida pela redução de Tg, o que provoca um novo aumento de Tg em si e o fortalecimento do sistema; (c) degradação das reações ao longo do tempo de imersão, com reduções graves no desempenho do sistema. Além disso, o aumento de água pode provocar dilatação da matriz epóxi, que pode produzir tensões internas para o compósito, que são parcialmente atenuadas por um efeito de plastificação. A humidade também pode penetrar ao longo da interface fibra-matriz, provocando efeitos degradantes para

a ligação fibra-matriz (Karbhari, 2002; Rinaldi e Maura, 1993; Guo e Kagawa, 2000; Kueseng *et al.*, 2001).

O efeito da água sobre um compósito depende também da configuração dos tecidos (número e disposição das camadas) e da direção da aplicação da carga. Diferentes estudos experimentais têm demonstrado que as propriedades mecânicas à tração de uma única camada do compósito na direção da fibra são altamente dependentes das propriedades das fibras, que não são afetadas, no caso das fibras de carbono, por absorção de água (Frigione *et al.*, 2004; Tavakkolizadeh e Saadatmanesh, 2004; Frigione e Sciolti, 2006). Quando se utilizam laminados compostos por várias camadas, o papel da interface entre as camadas adjacentes torna-se crucial. Uma vez que a resina da matriz é responsável pela adesão entre as camadas e é geralmente mais suscetível à degradação pela água, são encontradas maiores reduções na resistência à tração nas amostras compostas por um grande número de camadas (Abanilla *et al.*, 2006a; Abanilla *et al.*, 2006b).

2.4. Estudos realizados sobre os efeitos da água

No estudo efetuado por Silva (2011) foi realizado um programa experimental de forma a investigar o comportamento mecânico dos materiais básicos que compõe os sistemas reforçados (tijolo, primário, resina e FRP) e, principalmente, avaliar a aderência entre o material compósito GFRP e o substrato de alvenaria sem e após exposição a diferentes condições de humidade relativa. De forma a avaliar a aderência da ligação alvenaria-GFRP foram realizados ensaios de arrancamento (“pull-off”), testes de corte com pré-compressão e testes de aderência (“bond”) entre a manta de GFRP e o tijolo em diversos provetes reforçados. Nos testes de aderência entre a manta de GFRP e o tijolo utilizou-se provetes secos e provetes com diferentes quantidades de teor de água, de modo a se verificar o efeito da água sobre a capacidade aderente dos materiais compósitos à alvenaria. Com a realização desta investigação experimental, o autor concluiu que a presença de água influencia a resistência da ligação dos provetes, especialmente os que tinham adesivos com maior absorção de água de saturação; que qualquer perda na junta de ligação devido a absorção de água pode ser restaurada com uma secagem; os provetes sujeitos à humidade relativa acrescida mostraram uma tendência contrária, ou seja, menor resistência quando comparados com os provetes imersos, mesmo tendo, em princípio, um teor de água menor que estes; a água afeta a resistência dos materiais compósitos e a eficácia do reforço. Constatou também que nos testes de aderência a delaminação tendia a dar-se não pelo perímetro da zona de

colagem mas sim pelo perímetro do primário, externo a essa camada; existe um insuficiente aproveitamento da resistência fornecida pelo material compósito, pois a rutura dá-se pelo tijolo.

No trabalho realizado por Sciolti *et al.*, (2010) foram analisados dois sistemas comerciais de FRP: polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) e polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). O sistema CFRP continha fibras de carbono unidirecionais de alta resistência enquanto o sistema de GFRP continha fibras alcalinas resistentes. Ambos os sistemas são aplicados à superfície a ser reforçada usando diferentes resinas epóxi, através do procedimento indicado pelos fornecedores. Esta resina epóxi é utilizada tanto para a matriz do compósito como para aderir o FRP à superfície a ser reforçada. Ambas as amostras de CFRP e GFRP foram fabricadas de acordo com as recomendações relativas à análise térmica e para testes de imersão em água. De forma a avaliar o efeito da água sobre as propriedades mecânicas dos materiais em análise, foram realizados testes mecânicos nos materiais compósitos e nas resinas epoxídicas em diferentes tempos de imersão até à saturação, e em diferentes tempos de cura antes da sua imersão, de forma a avaliar e quantificar o processo de cura à temperatura ambiente. Os principais resultados decorrentes da investigação experimental realizada são os seguintes: o tempo de cura necessário para as três resinas epoxídicas investigadas para alcançar uma condição imutável é de ordem de várias semanas (mais de vinte), ou seja, muito para além dos tempos de cura sugeridos pelos fornecedores (vários dias); o CFRP e o GFRP mostraram um efeito menor do tempo de cura nas suas propriedades mecânicas, atribuído ao facto que as propriedades mecânicas de resistência de uma única camada de um compósito no sentido das fibras são altamente dependentes das propriedades das fibras; a influência da presença de água nas propriedades térmicas e mecânicas das resinas é bastante grave, devido aos efeitos da plastificação. As propriedades mecânicas são altamente afetadas pela presença de água, com grandes perdas na rigidez e na resistência, mesmo após poucas semanas de imersão em água; a imersão em água tem um efeito insignificante sobre as propriedades de resistência mecânica na direção das fibras do CFRP. Deve-se salientar que a eficácia duma aplicação utilizando FRP's, baseada em epóxi curada a frio, como reforço pode ser gravemente afetada pela deterioração da resina da matriz, devido à sua cura incompleta ou devido à presença de água no estado líquido ou humidade, que também é responsável na ligação material compósito-superfície a ser reforçada.

2.5. Envelhecimento acelerado

A análise do comportamento a longo prazo, em serviço, de componentes de FRP-alvenaria envolve testes em laboratório, testes de campo e envelhecimento acelerado. Contudo, os testes de envelhecimento acelerado representam o método mais comum para testar a eficácia sob condições de degradação ambiental dos materiais de construção de modo que, no presente trabalho, foi este o método utilizado. As condições ambientais reais não podem ser simuladas com precisão ou reproduzidas em laboratório com base nos ensaios acelerados.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para uma boa avaliação da degradação da ligação (tijolo-GFRP) torna-se vital testar separadamente os componentes que constituem os provetes reforçados, o tijolo e o material compósito. Os materiais compósitos que integram os provetes, para a análise do comportamento da aderência, são o primário, a resina e o GFRP. Um material compósito é conseguido com a aplicação de três componentes: primário, “putty” e resina. Estes componentes têm como função proporcionar o preenchimento dos vazios, uma regularização e a aderência, respetivamente. Apesar dos fabricantes recomendarem a aplicação de putty para garantir uma superfície mais lisa e uma regularização dos pequenos defeitos, no presente trabalho optou-se pela dispensa deste componente pois a superfície dos tijolos utilizados foi regularizada.

Nesta secção é apresentado o programa experimental que teve como objetivo principal investigar os efeitos da água sobre o comportamento da ligação GFRP-tijolos de barro. Com este propósito foram realizados ensaios dos provetes dos componentes (tijolo, primário, resina e GFRP) de referência e expostos à água para diferentes idades de exposição, realizam-se ensaios à tração no primário, na resina e no GFRP, e ensaios de compressão nos tijolos. Nos provetes reforçados (tijolo reforçado com GFRP) de referência e dos expostos à água para diferentes idades de exposição, executam-se ensaios de arrancamento (“pull-off”) e ensaios de aderência (“bond”).

De seguida apresentam-se as características dos materiais ensaiados, a execução e os modelos destes materiais, a quantidade de provetes que constituem as séries, e a caracterização mecânica dos provetes dos componentes e dos provetes reforçados.

3.1. Materiais

No presente trabalho o primário e a resina utilizados foram, respetivamente, o MapeWrap 1 e MapeWrap 31. Estes materiais são compostos por dois componentes, o primário ou a resina (componente A) e o endurecedor (componente B). Para se prepararem estes materiais é necessário colocar o componente B no componente A e misturar até se conseguir uma homogeneidade. No primário, a relação da mistura é de três partes do

componente A e uma parte do componente B e na resina, é de quatro partes do componente A e uma parte do componente B, medidas em peso. Depois de misturado o produto, é necessário que a sua aplicação seja a mais rápida possível.

O material utilizado para reforçar a alvenaria foi um polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). A fibra utilizada foi o Mape Wrap G UNI-AX, que é um tecido em fibra de vidro unidirecional. Após a impregnação do tecido e a cura da resina fica formado o material compósito.

Na Tabela 1 apresenta-se as características mecânicas da resina e da fibra de vidro fornecidas pelo fabricante. As propriedades do primário e o módulo de elasticidade da resina não estão indicados pois não são dados pelo fabricante.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da resina e da fibra de vidro.

Propriedades	Primário	Resina	Fibra de Vidro
Resistência tração (MPa)	-	40	2560
Módulo de elasticidade (GPa)	-	-	80.7
Extensão (%)	-	1.8	3-4

3.2. Provetes

De seguida apresentam-se a execução e a descrição das características dos provetes dos componentes e dos provetes reforçados com GFRP. Nos provetes reforçados existem duas formas distintas para a execução do reforço, pois realizaram-se dois tipos de ensaios para estes provetes, os ensaios de arrancamento e os ensaios de aderência.

3.2.1. Tijolo

A forma dos provetes de tijolo teve como referência as normas EN 772-1 e UNI EN 8942-3. A Figura 5 apresenta a sequência da execução dos cubos de tijolo para os ensaios de compressão. Primariamente, com o auxílio de uma máquina de corte (Figura 5 a), foram obtidos três cubos de tijolo por cada tijolo de origem (Figura 5 b). De seguida obteve-se as

dimensões da secção transversal ($b_1 \times t_1$ e $b_2 \times t_2$) e, posteriormente, determinou-se as dimensões da secção transversal média ($b_m \times t_m$) para os diversos provetes.



a) Máquina de corte.

b) Provetes para os ensaios de compressão.

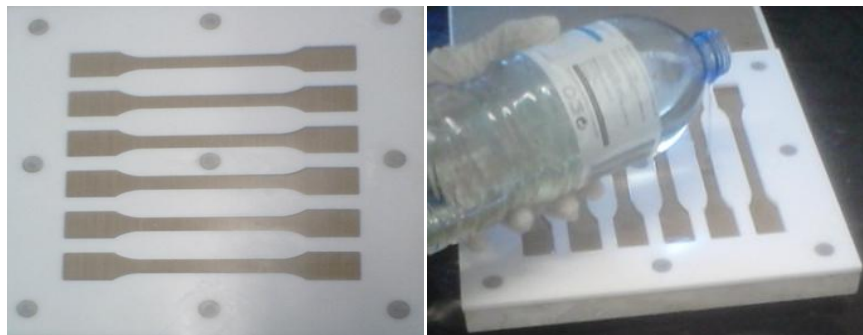
Figura 5 – Sequência da execução dos cubos de tijolo.

No total foram testados 9 cubos que tinham secção transversal de $b_m \times t_m$. As designações e as dimensões dos provetes de referência, dos provetes imersos por água durante um e durante dois meses podem ser observadas em anexo.

3.2.2. Primário e Resina epoxídica

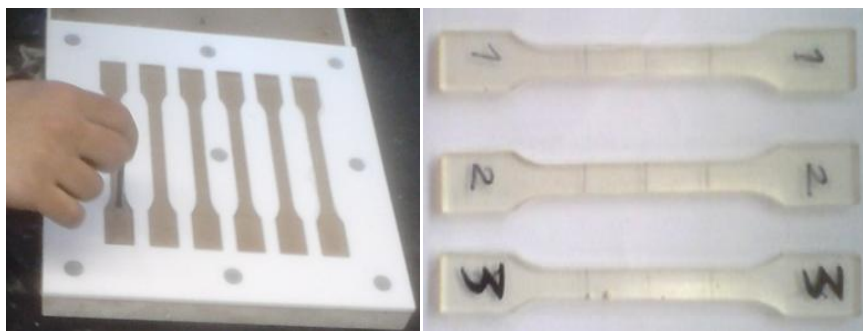
A forma dos provetes de primário e dos provetes de resina seguem a norma ISO 527-1. A Figura 6 apresenta a sequência da execução dos provetes de primário para os ensaios de tração. Devido à sua consistência fluída, foi utilizado um molde em látex (Figura 6 a). Após a colocação do primário no molde (Figura 6 b), foi necessário espalhar corretamente o primário para que não houvesse a formação de vazios indesejados (Figura 6 c). Posteriormente, foi colocado um transparente sobre o molde que ficou sujeito a um ferro circular, à semelhança de um rolo, para expelir qualquer excedente de primário do molde. Após a passagem do rolo, apenas os formatos dos provetes continham primário. Os provetes foram curados no ambiente do laboratório obtendo-se, assim, os provetes de primário. Posteriormente, realizou-se a marcação dos mesmos num espaço de 50 mm, com auxílio de um marcador, de forma a se obter, nesse espaço, a leitura de diversos parâmetros através da utilização do “clip gauge” (Figura 6 d). Após a marcação dos provetes obteve-se as dimensões, para as diferentes

marcas, da secção transversal retangular ($b_1 \times t_1$, $b_2 \times t_2$ e $b_3 \times t_3$) e, posteriormente determinou-se as dimensões da secção transversal média ($b_m \times t_m$) para os diversos provetes.



a) Molde em látex.

b) Molde com primário.



c) Retirar bolhas indesejadas.

d) Provetes de primário.

Figura 6 – Sequência da execução dos provetes de primário.

A metodologia utilizada para a obtenção dos provetes de resina epoxídica foi semelhante à metodologia utilizada para os provetes de primário desde o tempo de cura à forma dos provetes. Na Figura 7 mostra-se a forma dos provetes de resina.



Figura 7 – Esquema ilustrativo da forma dos provetes de resina.

No total foram executados onze provetes de primário e treze provetes de resina que tinham secção transversal retangular de $b_m \times t_m$, de comprimento total 170 mm e 20 mm de largura total. As designações e as dimensões dos provetes de referência, dos provetes imersos por água durante um e durante dois meses podem ser observadas em anexo.

3.2.3. Tiras de GFRP

A forma dos provetes de GFRP teve como referência a norma ISO 527-1. A Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo da forma das tiras de GFRP para os ensaios de tração. Os provetes de GFRP foram obtidos a partir da impregnação das mantas. Após secagem, os provetes foram cortados, com um dispositivo de corte, de forma a se obter as medidas desejadas. As extremidades possuem mais quatro camadas (duas na face superior e 2 na face inferior). Estas quatro camadas adicionais, que possuem 35 mm de largura, foram coladas com a mesma resina e na direção paralela às restantes. Este acréscimo de camadas tem como função funcionar como um sistema de amarração para impedir o escorregamento dos provetes nas amarras, contribuindo para que a rutura ocorra no comprimento de monitorização, ou seja, na zona central onde se situava o “clip gauge”. Os provetes foram curados no ambiente do laboratório obtendo-se, assim, os provetes de GFRP. Após a execução destes provetes realizou-se a sua marcação num espaço de 50 mm, com auxílio de um marcador, de forma a se obter, nesse espaço, a leitura de diversos parâmetros através da utilização do “clip gauge”. De seguida obteve-se as dimensões, para as diferentes marcas, da secção transversal retangular ($b_1 \times t_1$, $b_2 \times t_2$ e $b_3 \times t_3$) e, posteriormente determinou-se as dimensões da secção transversal média ($b_m \times t_m$) para os diversos provetes.



Figura 8 – Esquema ilustrativo da forma dos provetes de GFRP.

No total foram executados 12 provetes de GFRP que tinham secção transversal retangular de $b_m \times t_m$, de comprimento total 200 mm e 15 mm de largura total. As designações e as dimensões dos provetes de referência, dos provetes imersos por água durante um e

durante dois meses podem ser observadas em anexo. Para estes provetes adotou-se uma espessura média constante de valor 48 mm.

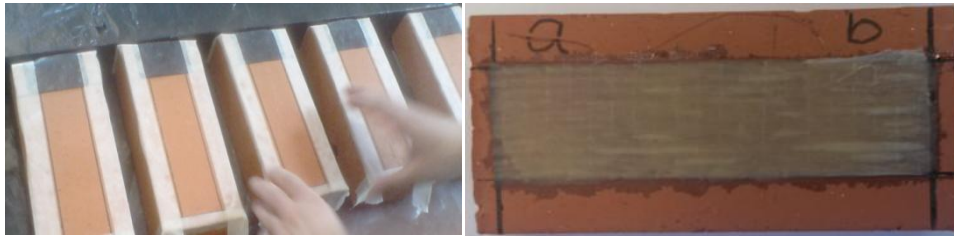
3.2.4. Tijolo-FRP

Na presente dissertação foram realizados diferentes provetes reforçados com GFRP para os testes de arrancamento e para os testes de aderência. Para os testes de aderência utilizaram-se provetes reforçados com diferentes superfícies de tijolo, os provetes reforçados constituídos pela superfície original e os provetes reforçados constituídos pela superfície regularizada. De seguida apresenta-se a execução dos diferentes provetes reforçados para os respetivos testes que foram submetidos.

3.2.4.1. Tijolo - FRP para os testes de arrancamento

A forma dos provetes reforçados para os testes de arrancamento segue a norma ASTM D4541-09. A Figura 9 apresenta a sequência da aplicação do reforço em alvenaria antiga do presente programa experimental com mantas de GFRP para os testes de arrancamento. Após a limpeza dos tijolos, estes foram colocados no forno e, posteriormente, foram limpos com auxílio de uma máquina de pressão de ar. De seguida, procedeu-se ao corte das mantas de fibra de vidro e à delimitação da área de colagem (Figura 9 a). Preparou-se e aplicou-se na superfície do tijolo o primário MapeWrap 1 para preencher os poros das superfícies dos tijolos de modo a melhorar a aderência desta com a resina epóxi. Preparou-se e colocou-se na superfície do tijolo e na manta de GFRP a primeira camada de resina epóxi MapeWrap 31. Posteriormente, colocou-se o GFRP na superfície do tijolo com recurso a um amassador e aplicou-se a última camada de resina epóxi. Após a cura do material compósito no laboratório obteve-se os provetes reforçados (Figura 9 b). Realizou-se dois cortes circulares em cada provete reforçado (Figura 9 c), com auxílio duma caroteadora, de forma a limitar a área de ligação a ser testada. Por último, colou-se a pastilha metálica (Figura 9 e) para aplicação da carga nas áreas a serem testadas.

No total foram executados 6 provetes reforçados para os testes de arrancamento.



a) Delimitação da área de colagem. b) Provete reforçado.



c) Realização dos cortes circulares. d) Área de ligação a ser testada.



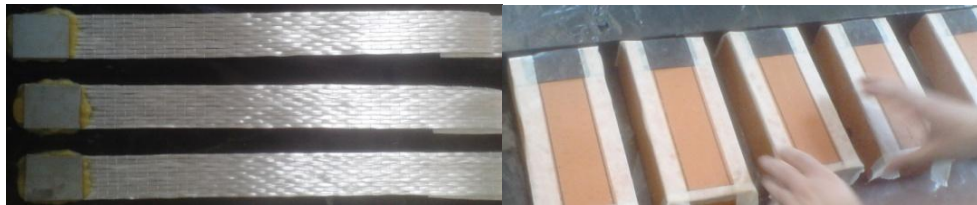
e) Colocação de panos e cola adesiva. f) Colocação do pull-head.

Figura 9 – Sequência da aplicação de uma intervenção de reforço.

3.2.4.2. Tijolo – FRP para os testes de aderência

A Figura 10 apresenta a sequência da aplicação do reforço em alvenaria antiga do presente programa experimental com mantas de GFRP para os testes de aderência. Após a regularização da face e da limpeza dos tijolos estes foram colocados no forno e, posteriormente, foram limpos com auxílio de uma máquina de pressão. É de salientar que a superfície dos tijolos não foi regularizada em todos eles. De seguida procedeu-se ao corte das mantas de fibra de vidro e à colagem das placas de alumínio nas mantas de fibra (Figura 10 a),

e à delimitação da área de colagem (Figura 10 b). Preparou-se e aplicou-se na superfície do tijolo o primário MapeWrap 1 (Figura 10 c) para a preencher os poros das superfícies dos tijolos de modo a melhorar a aderência desta com a resina epóxi. Preparou-se e colocou-se na superfície do tijolo e na manta de GFRP a primeira camada de resina epóxi MapeWrap 31. Por último, colocou-se o GFRP na superfície do tijolo com recurso a um amassador (Figura 10 d) e aplicou-se a última camada de resina epóxi (Figura 10 e). Após a cura do material compósito no laboratório obteve-se os provetes reforçados (Figura 10 f). Como determinada quantidade de tijolos não possuem a superfície regularizada tem-se dois tipos de provetes reforçados, os provetes com a superfície original designados por ORG e os provetes com a superfície regularizada do tijolo designados por GR.



a) Mantas de GFRP.

b) Delimitação da área de colagem.



c) Aplicação do primário.

d) Aplicação da manta de GFRP.



e) Aplicação da resina epóxi.

f) Provetes reforçados.

Figura 10 – Sequência da aplicação de uma intervenção de reforço.

No total foram executados 12 provetes reforçados, 7 possuem a superfície original e 5 possuem a superfície regularizada, para os testes de aderência.

3.3. Testes de imersão por água

Após a execução dos provetes de tijolo, de primário, de resina, de GFRP e dos provetes reforçados com GFRP, foram definidas diferentes séries. Determinada quantidade dos diferentes tipos de provetes não foram expostos à água de forma que foram designados como provetes de referência. Os restantes provetes foram colocados num recipiente com água, numa câmara climática constantemente a renovar o ar cuja temperatura e humidade relativa são de, aproximadamente, 20 °C e 55 % respetivamente. Foram definidas diferentes séries, cada uma representa um determinado número de provetes que estiveram diferentes períodos de tempo imersos na água. Realizou-se uma campanha de ensaios constituída por três séries designadas por referência, série n.º 1 (S1) e série n.º 2 (S2). As séries são constituídas, respetivamente, por provetes de referência, por provetes que estiveram imersos na água durante um mês e durante dois meses. Após o referido intervalo de tempo foram então submetidos aos respetivos testes.

Nas secções seguintes apresenta-se o programa experimental para os provetes dos componentes e para os provetes reforçados com GFRP. Com este programa experimental pretendeu-se avaliar a influência da água nos provetes dos componentes (tijolo, primário, resina e GFRP) e, principalmente, no vínculo tijolo-GFRP.

3.3.1. Provetes dos componentes

Na Tabela 2 está detalhado o programa experimental dos provetes dos componentes, que indica o número de provetes dos componentes ensaiados que constituem as diferentes séries.

Tabela 2 – Programa experimental.

Série	Número de provetes			
	Cubos de Tijolo	Primário	Resina	GFRP
Referência	3	3	3	4
S1	3	4	5	4
S2	3	4	5	4

3.3.2. Provetes reforçados com GFRP

Na Tabela 3 está detalhado o programa experimental dos provetes reforçados, onde se indica o número de provetes ensaiados, realizados para os testes de arrancamento e para os testes de aderência, que constituem as séries.

Tabela 3 – Programa experimental.

Série	Número de provetes		
	Testes de arrancamento	Testes de aderência	
		Superfície Original	Superfície Regularizada
Referência	2	2	3
S1	2	3	0
S2	2	2	2
Total	6	7	5

3.4. Caracterização mecânica

De seguida descreve-se o procedimento de ensaio dos provetes para as séries de referência, S1 e S2.

3.4.1. Tijolo

A avaliação da resistência à compressão dos cubos de tijolo foi efetuada experimentalmente. Para tal, realizaram-se ensaios de compressão (Figura 11) nos cubos das diferentes séries.



Figura 11 – Ensaios de compressão.

Os testes de compressão nos cubos de tijolo foram efetuados numa máquina Lloyd, de modelo LR50K plus, que consistem na aplicação de valores crescentes de forças de compressão até à sua rutura. Os ensaios foram controlados a partir do deslocamento axial, com uma velocidade de aplicação de carga de 0.03 mm/s, de acordo com as normas EN 772-1 e UNI EN 8942-3. A partir da realização destes testes e dos cálculos efetuados, foi possível a obtenção da relação tensão-extensão axial, a resistência à compressão (f_c) e a extensão (ϵ) para a carga máxima, para os diversos provetes. Após a obtenção destes resultados determinou-se os valores médios da resistência à compressão e da extensão para a carga máxima nas diferentes séries. A comparação do comportamento das várias séries foi realizada a partir destes parâmetros.

3.4.2. Primário, Resina e GFRP

A avaliação da resistência à tração dos provetes de primário, de resina e de GFRP foi efetuada experimentalmente. Para tal, realizaram-se ensaios de tração (Figura 12) nos provetes de referência e nos provetes com certa percentagem de teor em água. Os testes à tração nos provetes de primário (Figura 12 a) e nos provetes de resina (Figura 12 b) foram efetuados na máquina Lloyd de modelo LR50K plus, enquanto os provetes de GFRP foram testados numa máquina de tração universal de modelo PCH-F/2000 (Figura 12 c), que consistem na aplicação de valores crescentes de forças de tração até à sua rutura. Os ensaios

destes provetes seguem a norma ISO 527-1 e foram realizados a partir de controlo dos deslocamentos, com uma velocidade de ensaio de 2 mm/min.



a) Ensaio nos provetes de primário. b) Ensaio nos provetes de resina.



c) Ensaio de tração nos provetes de GFRP.

Figura 12 – Ensaio de tração nos provetes de primário, de resina e de GFRP.

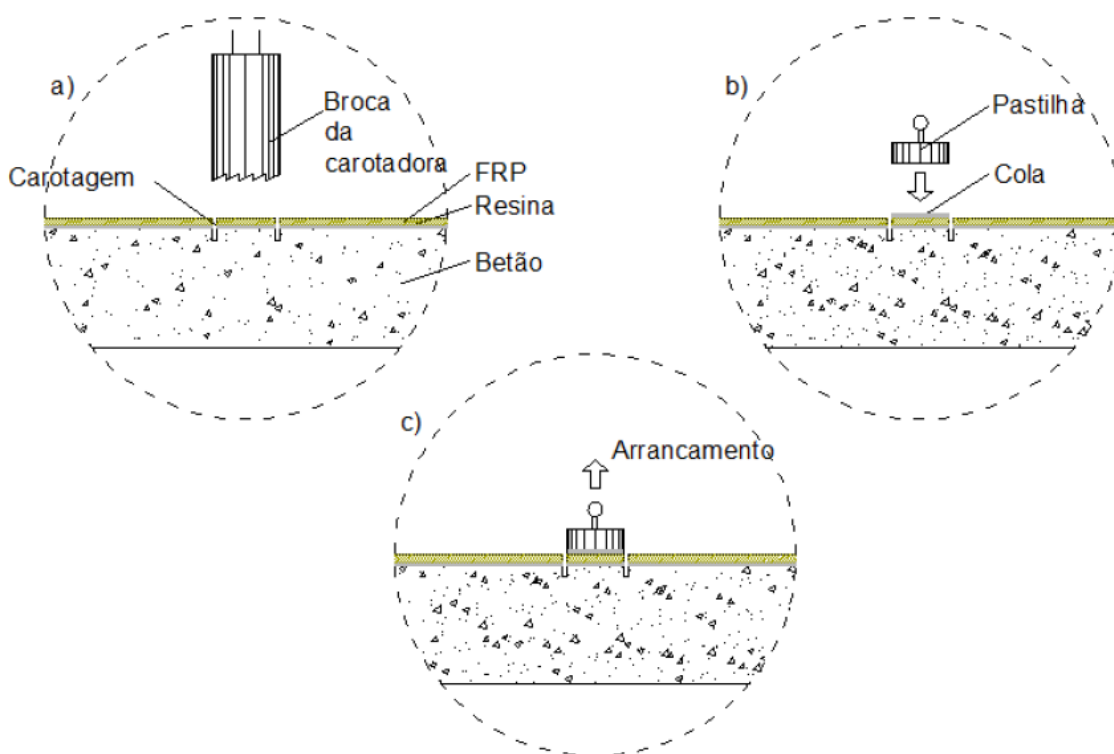
Foi possível a obtenção da relação tensão-extensão axial até à rutura do provete, a resistência à tração (f_t), o módulo de elasticidade (E) e a extensão média (ϵ) (aquando da aplicação da carga máxima) para os diversos provetes. Após a obtenção destes resultados determinou-se, em termos médios, os valores da resistência à tração, do módulo de

elasticidade e da extensão média nas diferentes séries. A comparação do comportamento das várias séries foi realizada a partir destes parâmetros.

3.4.3. Tijolo-FRP

3.4.3.1. Tijolo – FRP para os testes de arrancamento

Na Figura 13 é possível observar o procedimento geral dos ensaios de arrancamento. Primariamente, realizaram-se dois cortes circulares, com auxílio da carotadora, para a obtenção de duas áreas de ligação (procedimento indicado em 3.2.4.1). De seguida, efetuou-se a colagem da pastilha metálica e, por último, realizaram-se os ensaios de arrancamento nas duas áreas a serem testadas. Neste tipo de ensaio é fundamental haver carotagem para que as tensões sejam distribuídas apenas pela zona delimitada pelo carote e pastilha, ocorrendo a rutura na zona pretendida.



a) Abertura do carote; b) Colagem da pastilha; c) Arrancamento da pastilha.

Figura 13 – Procedimento geral do ensaio de arrancamento (Cabral, 2012).

A Figura 14 apresenta a configuração dos ensaios de arrancamento utilizada que tiveram como base a norma ASTM D4541-09. Foram realizados a partir do controlo da força,

com uma velocidade de 0.003 mm/s. Estes ensaios consistem na medição da resistência à tração perpendicular à ligação ($f_{tm,p}$) ou seja, a tensão necessária para arrancar uma pastilha metálica (secção circular) previamente colada com uma resina epoxídica ao GFRP. A partir da realização destes ensaios foi possível obter a tensão à tração da ligação para os diversos instantes de tempo até ao arrancamento da pastilha. Após a obtenção da tensão de arrancamento determinou-se a média deste parâmetro para cada série e, assim, realizou-se a comparação das séries.

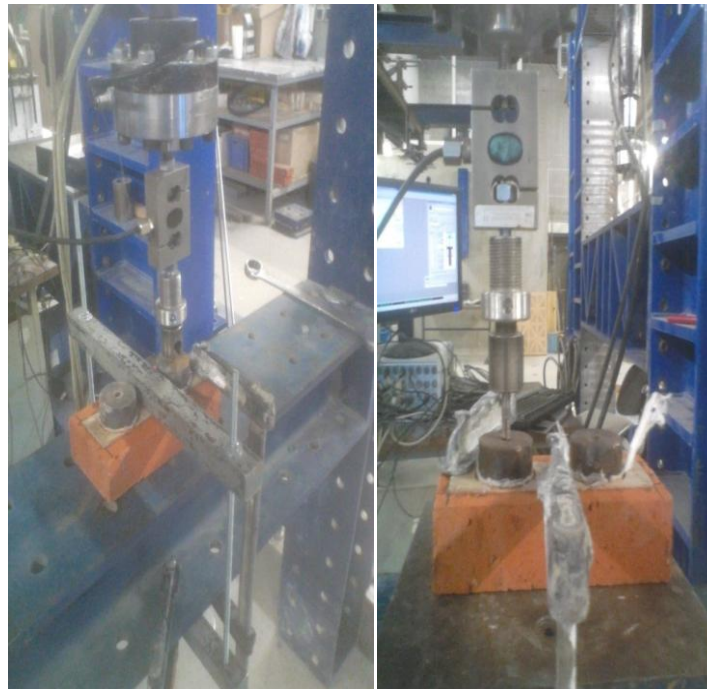
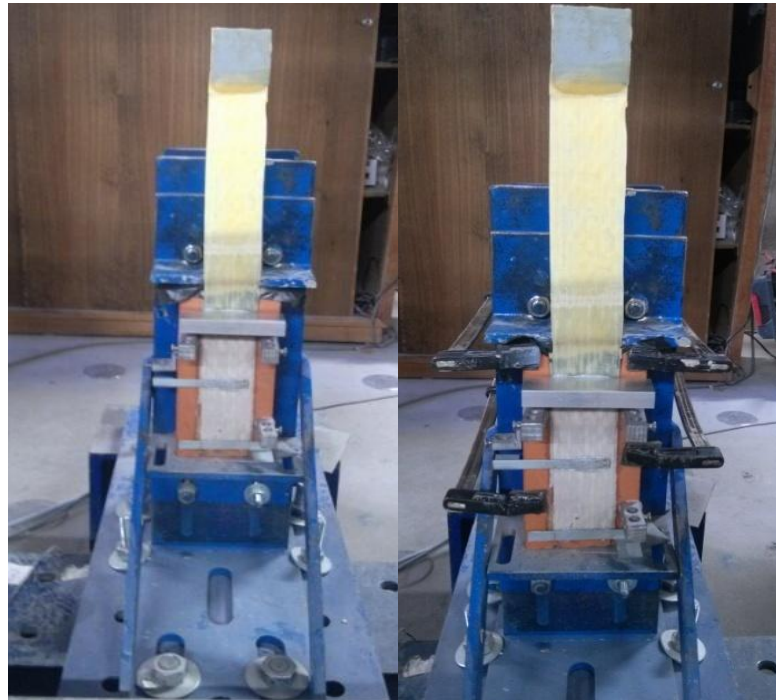


Figura 14 – Configuração dos ensaios de arrancamento.

3.4.3.2. Tijolo – FRP para os testes de aderência

A Figura 15 apresenta a configuração seguida nos ensaios de aderência, que consistem na aplicação de uma carga tangencial paralela à superfície onde se pretendeu quantificar a aderência, e realizaram-se sob controlo de deslocamento à velocidade de 0.005 mm/s. Observa-se a fixação dos provetes através da utilização dum sistema de metal (Figura 15 a) e a utilização de grampos para impedir a possível rotação dos provetes durante a realização do ensaio (Figura 15 b). Foram utilizados quatro LVDT's para medir o deslocamento relativo entre o tijolo e a extremidade livre, o deslocamento relativo entre o tijolo e a extremidade média, e o deslocamento relativo entre o tijolo e a extremidade carregada (Figura 15 c). Após a colocação da instrumentação os provetes foram, então, submetidos aos ensaios de aderência (Figura 15 d).



a) Fixação no sistema de metal. b) Utilização de grampos.



c) Colocação dos LVDT's. d) Realização do ensaio.

Figura 15 – Ensaio de aderência.

A Figura 16 apresenta o posicionamento dos LVDT's relativamente ao provete reforçado. O LVDT1 e o LVDT2 localizados, respetivamente, na extremidade livre (1) e na posição (2) mediram o deslocamento relativo entre o tijolo e o GFRP nas respetivas posições

($\delta_{1-1'}$ e $\delta_{2-2'}$). O LVDT3 e o LVDT4 situam-se na extremidade carregada (3) e mediram o deslocamento relativo entre o tijolo e o GFRP na mesma ($\delta_{3-3'}$).

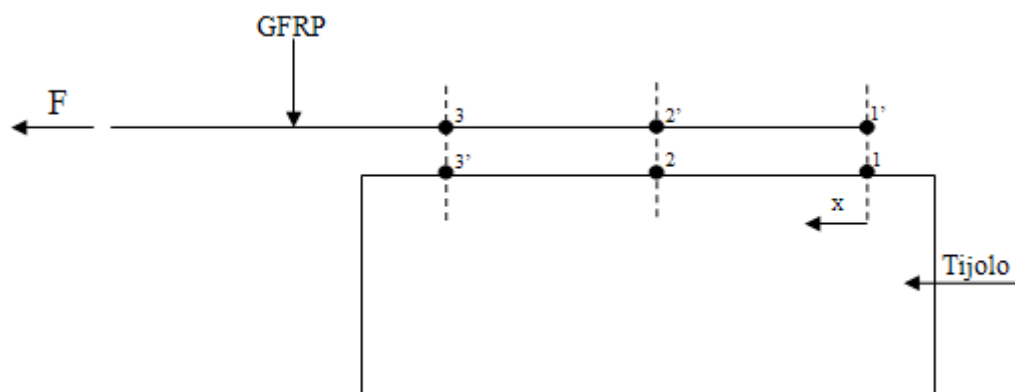


Figura 16 – Posicionamento dos LVDT's e o referencial considerado para os provetes reforçados.

Com realização dos ensaios de aderência foi possível obter o comportamento da ligação entre o tijolo e o reforço FRP, nomeadamente em termos de força de corte na interface FRP-tijolo (F_c) versus o deslocamento relativo entre o tijolo e o GFRP para as três extremidades ($\delta_{1-1'}$, $\delta_{2-2'}$ e $\delta_{3-3'}$). É de salientar que na extremidade carregada, como já referido, existem dois LVDT's (LVDT3 e LVDT4), portanto obteve-se o gráfico força de corte-deslocamento relativo médio entre o tijolo e o GFRP, ou seja, em termos de deslocamento relativo foi determinada a média dos deslocamentos obtidos pelo LVDT3 e pelo LVDT4. Também foi possível quantificar a força de corte na interface tijolo/GFRP e o deslocamento relativo, para a carga máxima, entre o tijolo e o GFRP nas diferentes extremidades para os diversos provetes reforçados submetidos aos testes de aderência. Após a obtenção destes resultados determinou-se os valores médios da força de corte e do deslocamento relativo nas três extremidades para cada série. Para a série de referência e para a série n.º 2 realizou-se a comparação, em termos médios, dos valores da força de corte aplicada na ligação nos provetes constituídos pela superfície original e nos provetes constituídos pela superfície regularizada. A comparação do comportamento entre as séries foi realizada a partir destes parâmetros.

4. DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta secção apresenta-se os resultados obtidos dos testes de compressão realizados nos provetes de tijolo e dos testes de tração efetuados nos provetes de primário, de resina e de GFRP para as diversas séries, e uma breve análise comparativa.

4.1. Tijolo

4.1.1. Cubos de tijolo de referência

Os resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo ensaiados estão apresentados na Figura 17 e na Tabela 4. Na Figura 17 está exposto o gráfico tensão-extensão axial e na Tabela 4 apresenta-se, resumidamente, os valores da resistência à compressão e a respetiva média dos três cubos de tijolo de referência (Z1, Z2 e Z3).

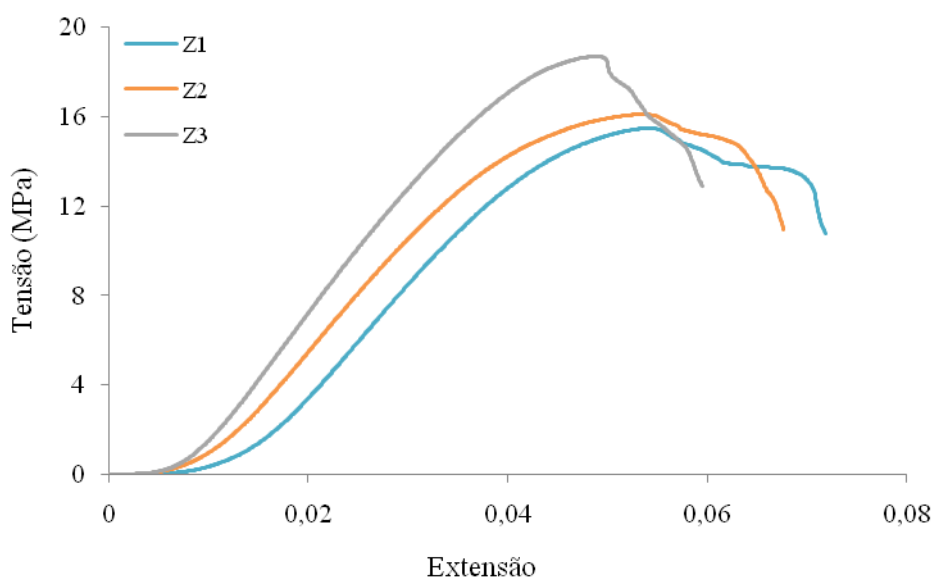


Figura 17 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo de referência.

Analisando a Figura 17 e a Tabela 4 verifica-se que os três provetes de referência possuem um comportamento semelhante, com uma relação pré-pico quase linear e com demonstração de ramo pós pico. Para estes provetes, a resistência à compressão média foi de 16,8 MPa e a extensão média foi de 5,2 %. O coeficiente de variação da resistência à compressão é reduzido.

Tabela 4 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo de referência.

Provete	f_c (MPa)
Z1	15.50
Z2	16.10
Z3	18.70
Média	16.80
Desvio Padrão	17.01
C.V. (%)	10.15

4.1.2. Cubos de tijolo imersos

4.1.2.1. Série n.º 1

Para esta série de ensaios foram testados três cubos de tijolo designados por Z4, Z6 e Z9. Através da execução dos ensaios de compressão nos mesmos foi possível obter os resultados exibidos na Figura 18 e na Tabela 5 que representam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de tijolo da série n.º 1. Os dados obtidos permitem concluir que os provetes desta série possuem um comportamento relativamente idêntico aos provetes de referência. A dispersão dos resultados foi bastante reduzida, a resistência à compressão média foi de 17.8 MPa e a extensão média foi de 5.4 %.

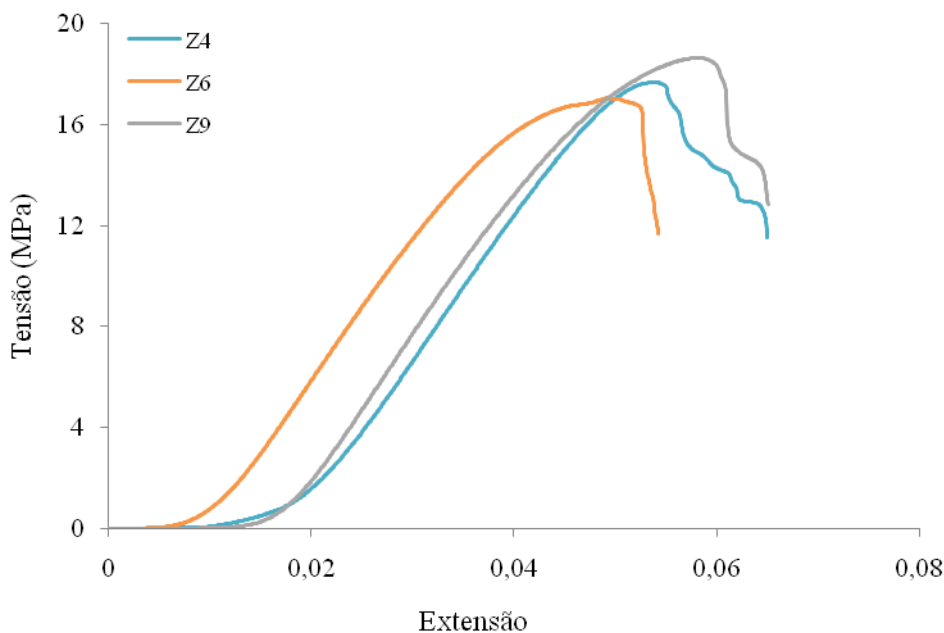


Figura 18 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo da série n.º 1.

Tabela 5 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo da série n.º 1.

Provete	f_c (MPa)
Z4	17.70
Z6	17.00
Z9	18.60
Média	17.80
Desvio Padrão	0.80
C.V. (%)	4.51

4.1.2.2. Série n.º 2

Nesta série de ensaios foram testados três cubos de tijolo designados por Z5, Z7 e Z8. A Figura 19 e a Tabela 6 apresentam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de tijolo da série n.º 2. A partir da análise dos resultados obtidos é possível concluir que o comportamento exibido pelos provetes desta série foi semelhante aos das restantes. O coeficiente de variação foi bastante reduzido e a resistência à compressão média foi de 15.9 MPa e a extensão média foi de 5.8 %.

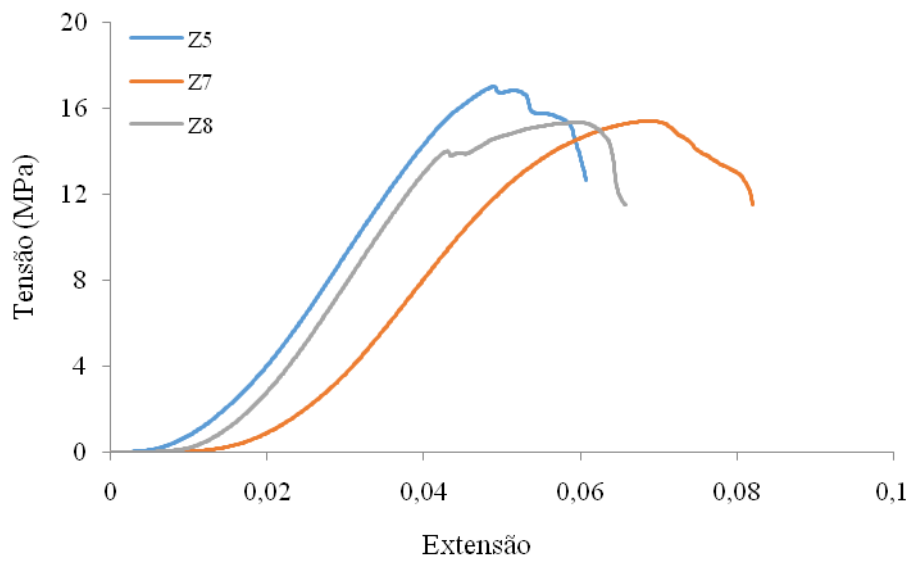


Figura 19 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de tijolo da série n.º 2.

Tabela 6 – Resultados obtidos referentes aos provetes de tijolo da série n.º 2.

Provete	f_c (MPa)
Z5	17.02
Z7	15.38
Z8	15.36
Média	15.92
Desvio Padrão	0.95
C.V. (%)	5.98

4.2. Primário

4.2.1. Primário de referência

Os resultados obtidos referentes aos provetes de primário ensaiados estão apresentados na Figura 20 e na Tabela 7. Na Figura 20 está exposto o gráfico tensão-extensão axial e na Tabela 7 apresenta-se, resumidamente, os valores da resistência à tração, o módulo de elasticidade e a médias destes dois parâmetros dos três provetes de primário de referência (P1, P2 e P3).

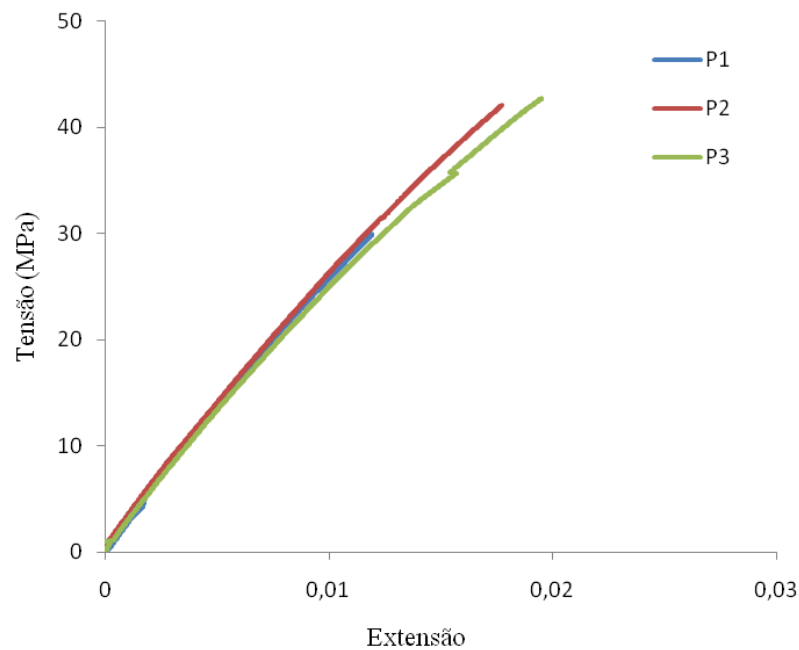


Figura 20 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário de referência.

Os dados obtidos permitem concluir que o comportamento demonstrado é tipicamente de uma material frágil, pois a carga máxima foi obtida na ruptura. Também se verificou que as curvas possuem um comportamento semelhante.

Tabela 7 – Resultados obtidos referentes aos provetes de primário de referência.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
P1	29.93	2.60
P2	42.10	3.00
P3	42.75	2.80
Média	38.26	2.80
Desvio Padrão	7.22	0.20
C.V. (%)	18.87	7.14

O coeficiente de variação, relativamente à resistência, foi acentuado devido ao comportamento exibido pelo provete P1. Este exibiu uma resistência e extensão muito

menores que os restantes, portanto devendo ser considerado um resultado anormal (“outlier”), a eliminar. A resistência média à tração atualizada foi de 42.4 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.8 GPa e a extensão média foi de 1.9 % (extensão para a carga máxima).

4.2.2. Primário imerso

4.2.2.1. Série n.º 1

Para esta série de ensaios foram testados três provetes de primário designados por P4, P5 e P7. Na Figura 21 e na Tabela 8 estão exibidos os resultados que representam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de primário da série n.º 1.

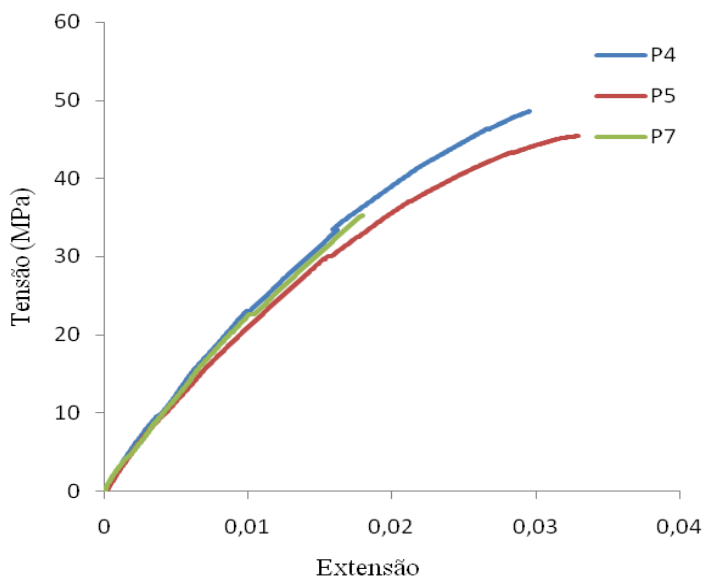


Figura 21 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário da série n.º 1.

Através da observação da Figura 21 e da Tabela 8 conclui-se que o comportamento obtido para esta série é idêntico ao da série dos provetes de referência. O coeficiente de variação, relativamente à resistência, não é reduzido mas não é tão acentuado como o da série referência, isto, devido ao comportamento exibido pelo provete P7. A resistência média à tração foi de 43.1 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.7 GPa e a extensão média foi de 3.1 %.

Tabela 8 – Resultados referentes aos provetes de primário da série n.º 1.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
P4	48.55	2.80
P5	45.49	2.60
P7	35.28	2.70
Média	43.11	2.70
Desvio Padrão	6.95	0.10
C.V. (%)	16.11	3.70

4.2.2.2. Série n.º 2

Nesta série foram ensaiados quatro provetes de primário designados por P3, P8, P9 e P10. Através da execução dos ensaios de tração nos mesmos foi possível obter os resultados exibidos na Figura 22 e na Tabela 9 que representam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de primário da série n.º 2.

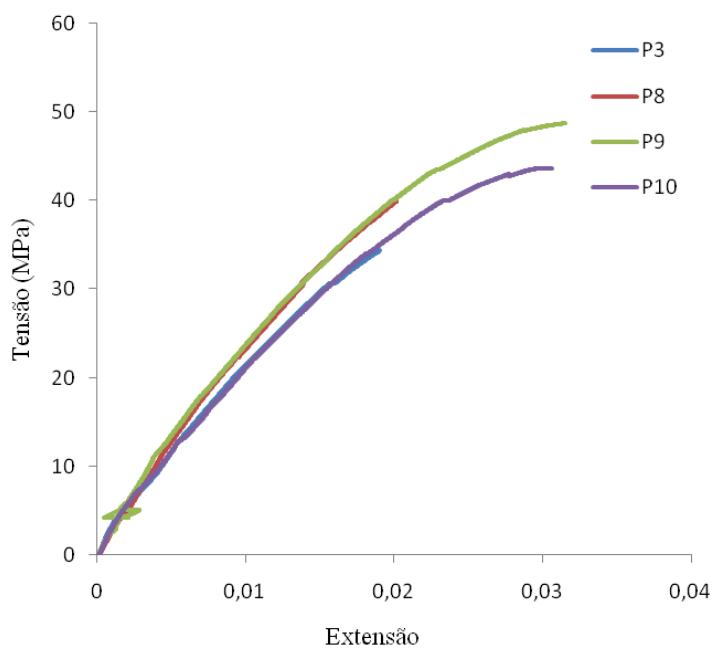


Figura 22 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de primário da série n.º 2.

A partir da análise da Figura 22 e da Tabela 9 é possível concluir que, nesta série, o comportamento exibido é semelhante aos das restantes. O coeficiente de variação para estes provetes é inferior relativamente aos provetes das restantes séries. A tensão de tração média foi de 41.7 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.8 GPa e a extensão média foi de 3.1 %.

Tabela 9 – Resultados referentes aos provetes de primário da série n.º 2.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
P3	34.35	2.80
P8	39.95	2.60
P9	48.72	2.90
P10	43.65	2.80
Média	41.67	2.78
Desvio Padrão	6.06	0.13
C.V. (%)	14.55	4.53

4.3. Resina epoxídica

4.3.1. Resina epoxídica de referência

Os resultados obtidos relativamente aos provetes de resina ensaiados estão apresentados na Figura 23 e na Tabela 10. Na Figura 23 apresenta-se o gráfico tensão-extensão axial e na Tabela 10 apresenta-se, resumidamente, os valores da resistência à tração, do módulo de elasticidade e a média destes dois parâmetros dos três provetes de resina de referência (E1, E2 e E3). Através da observação da Figura 23 verifica-se que o comportamento obtido é frágil, pois a carga máxima foi obtida na rutura. Na Tabela 10 verifica-se que a dispersão dos resultados é reduzida, a tensão média foi de 41.0 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.6 GPa e a extensão média foi de 2.1 %.

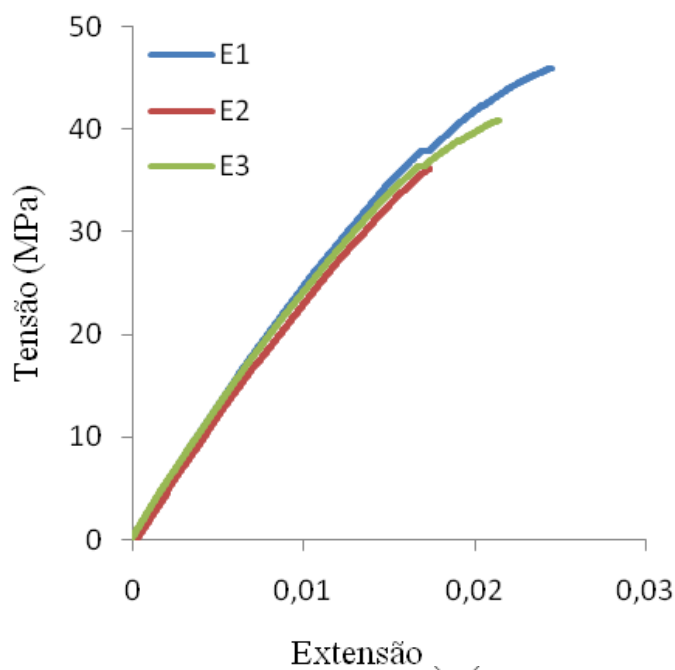


Figura 23 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina de referência.

Tabela 10 – Resultados referentes aos provetes de resina epoxídica de referência.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
E1	45.98	2.70
E2	36.23	2.40
E3	40.89	2.80
Média	41.03	2.63
Desvio Padrão	4.88	0.21
C.V. (%)	11.88	7.91

4.3.2. Resina epoxídica imersa

4.3.2.1. Série n.º 1

Para esta série de ensaios foram testados cinco provetes de resina designados por E4, E5, E6, E7 e E8. Através da execução dos ensaios de tração nos mesmos foi possível obter os

resultados exibidos na Figura 24 e na Tabela 11 que representam, respectivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de resina da série n.º 1.

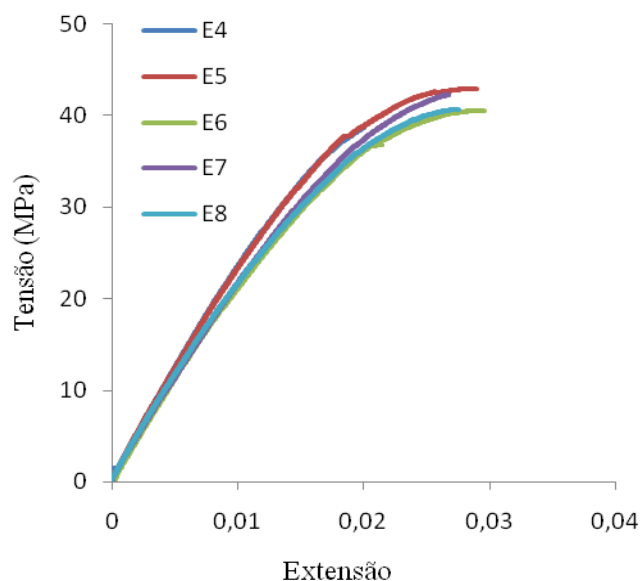


Figura 24 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina da série n.º 1.

Tabela 11 – Resultados referentes aos provetes de resina da série n.º 1.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
E4	38.69	2.50
E5	42.90	2.70
E6	40.55	2.40
E7	42.27	2.60
E8	40.70	2.60
Média	41.02	2.56
Desvio Padrão	1.65	0.11
C.V. (%)	4.02	4.45

Analisando a Figura 24 e a Tabela 11 verifica-se que o comportamento exibido nesta série é semelhante ao da série de referência e que os resultados obtidos apresentam-se muito pouco dispersos, logo o coeficiente de variação é bastante baixo. Também se pode concluir

que as curvas tiveram um comportamento semelhante. A resistência média à tração foi de 41.0 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.6 GPa e a extensão média foi de 2.6 %.

4.3.2.2. Série n.º 2

Para esta série de ensaios foram testados cinco provetes de resina designados por E9, E10, E11, E12 e E13. Na Figura 25 e na Tabela 12 exibem-se, respectivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de resina da série n.º 2. Os dados obtidos permitem concluir que o comportamento obtido nesta série é semelhante aos das restantes. A curva referente ao provete E9 não é perceptível pois está sobreposta pela curva E12. Na Figura 25 verifica-se que no troço inicial o comportamento exibido pelos provetes E9 e E12 é diferente do comportamento dos restantes provetes, possivelmente, devido a um erro na leitura dos resultados. Desta forma, os resultados obtidos destes dois provetes não foram considerados relativamente ao módulo de elasticidade. O coeficiente de variação, em relação à resistência e à extensão, foi bastante elevado devido ao comportamento exibido pelo provete E9. O provete E9 exibiu uma tensão e extensão muito menor que os restantes, portanto não foi considerado para a definição dos valores médios. Logo, a resistência média à tração foi de 43.6 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 2.5 GPa e a extensão média foi de 2.4 %.

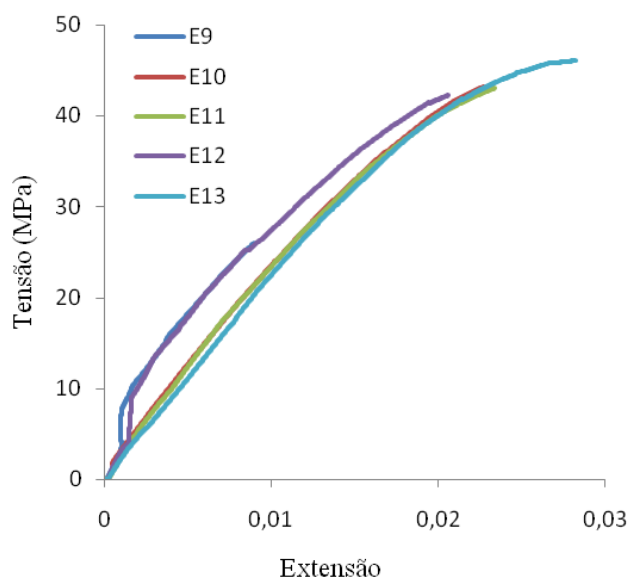


Figura 25 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de resina da série n.º 2.

Tabela 12 – Resultados referentes aos provetes de resina da série n.º 2.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
E9	26.04	-
E10	43.19	2.60
E11	43.02	2.60
E12	42.26	-
E13	46.03	2.40
Média	40.11	2.53
Desvio Padrão	7.99	0.12
C.V. (%)	19.93	4.56

4.4. Tiras de GFRP

4.4.1. Tiras de GFRP de referência

Na Figura 26 e na Tabela 13 estão expostos os principais resultados obtidos nos testes de tração efetuados nas quatro tiras de GFRP designadas por GE1, GE2, GE3 e GE4. Na Figura 26 está exposto o gráfico tensão-extensão axial e na Tabela 13 apresenta-se, resumidamente, os valores da resistência à tração, do módulo de elasticidade e a média destes dois parâmetros dos quatro provetes de GFRP de referência. Os dados obtidos permitem concluir que o comportamento é frágil, pois a carga máxima foi obtida na rutura. O coeficiente de variação da resistência à tração não é algo elevado devido ao comportamento exibido pelo provete GE1. A resistência média à tração foi de 1063.0 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 63.0 GPa e a extensão média foi de 2.0 % (extensão para a carga máxima).

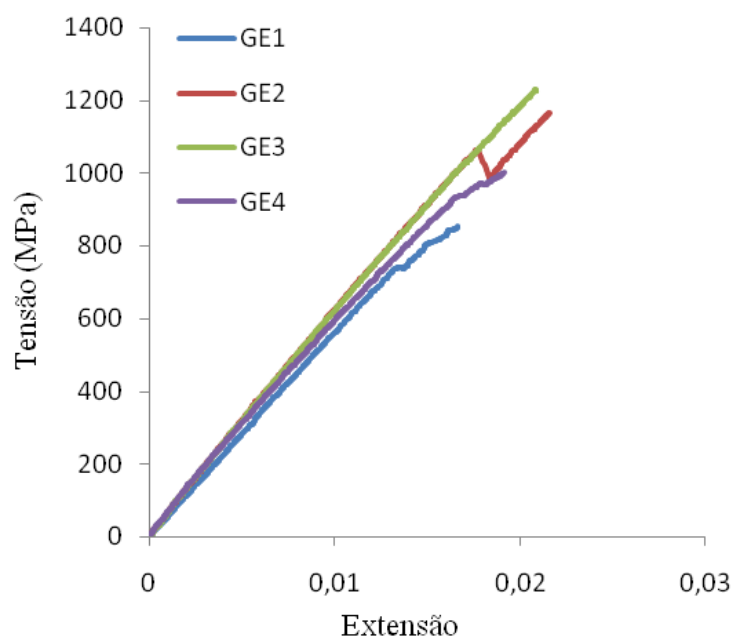


Figura 26 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP de referência.

Tabela 13 – Resultados referentes aos provetes de GFRP de referência.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
GE1	852.00	57.00
GE2	1170.00	65.00
GE3	1230.00	65.00
GE4	1000.00	65.00
Média	1063.00	63.00
Desvio Padrão	171.10	4.00
C.V. (%)	16.10	6.35

4.4.2. Tiras de GFRP imersas

4.4.2.1. Série n.º 1

Para esta série de ensaios foram testados quatro provetes de GFRP designados por GE5, GE6, GE7 e GE8. A Figura 27 e a Tabela 14 apresentam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de GFRP da série n.º 1.

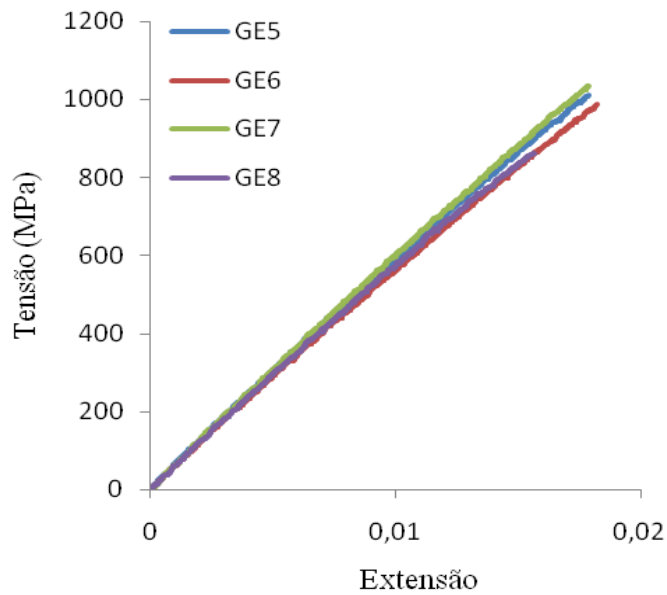


Figura 27 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP da série n.º 1.

Tabela 14 – Resultados referentes aos provetes de GFRP da série n.º 1.

Proвете	f_t (MPa)	E (GPa)
GE5	1010.06	62.00
GE6	986.93	60.00
GE7	1035.24	63.00
GE8	863.31	59.00
Média	973.88	61.00
Desvio Padrão	76.31	1.83
C.V. (%)	7.84	2.99

Nesta série o comportamento exibido é semelhante ao da série de referência e as curvas possuem um comportamento bastante similar, como se pode verificar na Figura 27. Através da análise da Tabela 14 verifica-se que o coeficiente de variação é baixo pelo que existe pouca dispersão nos resultados obtidos. A resistência média à tração foi de 973.9 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 61.0 GPa e a extensão média foi de 1.7 %.

4.4.2.2. Série n.º 2

Para esta série de ensaios foram testados quatro provetes de GFRP designados por GE10, GE11, GE12 e GE16. Através da execução dos ensaios de tração nos mesmos foi possível obter os resultados exibidos na Figura 28 e na Tabela 15 que representam, respetivamente, o comportamento e as principais propriedades dos provetes de GFRP da série n.º 2.

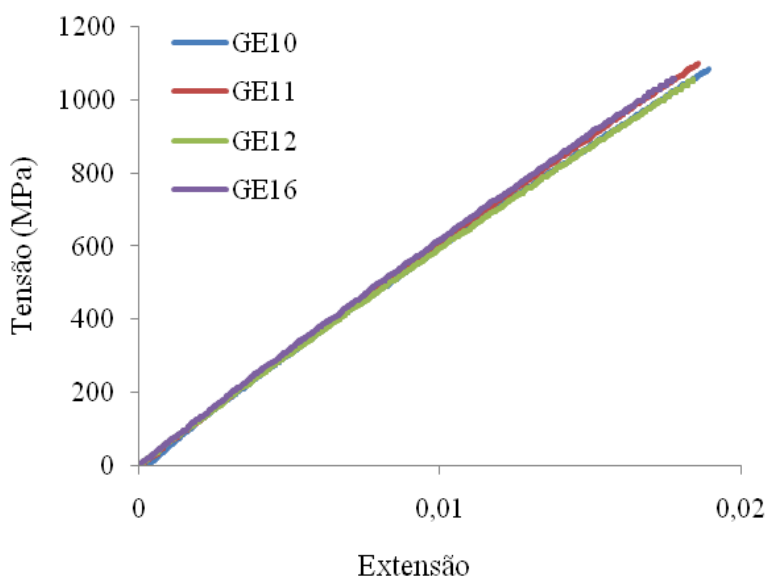


Figura 28 – Gráfico tensão-extensão axial dos provetes de GFRP da série n.º 2.

Analisando estes dados conclui-se que o comportamento obtido para esta série foi idêntico aos das restantes. A variação dos valores da resistência, da extensão e do módulo de elasticidade dos diversos provetes foi bastante baixa pelo que o coeficiente de variação também foi bastante reduzido. A resistência média à tração foi de 1076.4 MPa, o módulo de elasticidade médio foi de 62.0 GPa e a extensão média foi de 1.8 %.

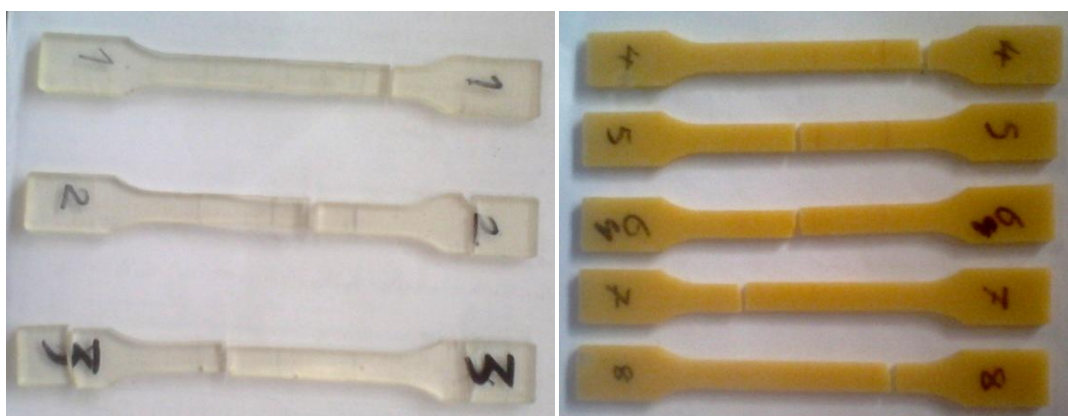
Tabela 15 – Resultados referentes aos provetes de GFRP da série n.º 2.

Provete	f_t (MPa)	E (GPa)
GE10	1084.28	61.00
GE11	1101.38	62.00
GE12	1060.00	62.00
GE16	1060.00	63.00
Média	1076.41	62.00
Desvio Padrão	20.20	0.82
C.V. (%)	1.88	1.32

4.5. Análise comparativa

4.5.1. Modos de rutura

Na Figura 29 apresenta-se os modos de rutura obtidos nos provetes de primário de referência (Figura 29 a) e nos provetes de resina da série n.º 1 (Figura 29 b) que, geralmente, foram semelhantes para as diversas séries. Nos provetes de primário e de resina, a rutura tende a dar-se na menor secção aparente (na zona central) como também nas secções que eventualmente possuam bolhas de ar que provocam a redução da área das secções que atravessam.



a) Provetes de primário.

b) Provetes de resina.

Figura 29 – Modos de rutura.

Na Figura 30 apresenta-se os modos de rutura obtidos pelos provetes de GFRP da série n.º 1 que, geralmente, foram semelhantes para todas as séries. Através da observação da Figura 30 verifica-se que a rutura não se deu numa única secção mas, sim, uma rutura quase paralela às fibras de vidro.

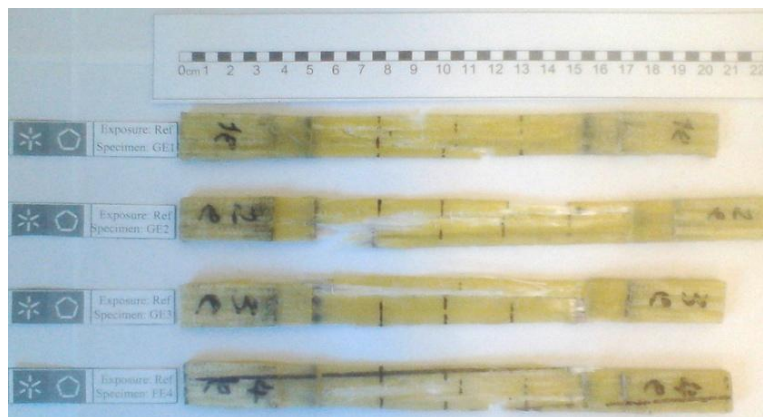


Figura 30– Modos de rutura nos provetes de GFRP.

4.5.2. Comportamento

Nos resultados obtidos verificou-se que os comportamentos exibidos nos provetes dos componentes foram semelhantes para as diferentes séries. O comportamento dos cubos de tijolo foi caracterizado por possuir uma relação pré-pico quase linear e com demonstração de ramo pós-pico com decréscimo acentuado da resistência à compressão. O comportamento obtido, nos provetes de primário, de resina e de GFRP, é típico de um material frágil, caracterizado por possuir uma relação pré-pico quase linear e sem demonstração de ramo pós-pico.

4.5.3. Parâmetros de comparação

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos nos provetes dos componentes da série n.º 1 e da série n.º 2 em comparação com a série dos provetes de referência, em termos médios e em percentagem. O sinal negativo e o sinal positivo representam, respetivamente, as reduções e os aumentos provocados pela imersão dos provetes por água.

Tabela 16 – Propriedades mecânicas normalizadas.

Provete	Resistência		Módulo de elasticidade		Extensão	
	Série n.º 1	Série n.º 2	Série n.º 1	Série n.º 2	Série n.º 1	Série n.º 2
Tijolo	(-) 0	(-) 5	-	-	(-) 0	(-) 0
Primário	(-) 0	(-) 2	(-) 4	(-) 1	(+) 63	(+) 63
Resina	(-) 1	(-) 0	(-) 3	(-) 4	(+) 24	(+) 14
GFRP	(-) 8	(-) 0	(-) 3	(-) 2	(+) 0	(+) 0

Através da análise da Tabela 16 conclui-se que:

- Nos provetes de tijolo, a resistência à compressão sofre uma redução de 5 % na série n.º 2;
- Nos provetes de primário e de resina, a resistência à tração diminuiu ligeiramente;
- Nos provetes de GFRP, a alteração dos valores da resistência foi mais significativa, cerca de 8 % na série n.º 1;
- Nos provetes de primário, de resina e de GFRP, os valores do módulo de elasticidade diminuíram ligeiramente em ambas as séries;
- A imersão dos provetes de tijolo e dos provetes de GFRP não provocou alterações nos valores da extensão;
- A alteração dos valores da extensão foi mais significativa relativamente à alteração dos valores da resistência e da rigidez;
- Certos provetes sujeitos à humidade relativa acrescida mostraram uma tendência contrária, ou seja, menor resistência quando comparados com os provetes imersos, mesmo tendo, em princípio, um teor de água menor que estes;
- Os materiais isolados exibiram pouca degradação.

5. Degradação da ligação

A aderência da ligação reforço-substrato foi avaliada, antes e após a imersão por água, através da realização dos testes de arrancamentos e dos testes de aderência. Nesta secção apresenta-se os resultados obtidos nos testes de arrancamentos e nos testes de aderência para os provetes das diferentes séries, e uma breve análise comparativa. É de salientar que nos testes de aderência apresentam-se, apenas, os comportamentos para dois provetes de cada série e os restantes apresentam-se em anexo.

5.1. Testes de arrancamento

5.1.1. Ensaios com os provetes reforçados de referência

Nesta série foram ensaiados dois provetes designados por GFRP1 e GFRP2 e cada provete foi sujeito a dois ensaios, ou seja, no total foram realizados quatro ensaios de arrancamento nos provetes reforçados. Na Figura 31 e na Tabela 17 são exibidos os resultados obtidos que descrevem a tensão de arrancamento nos provetes reforçados de referência.

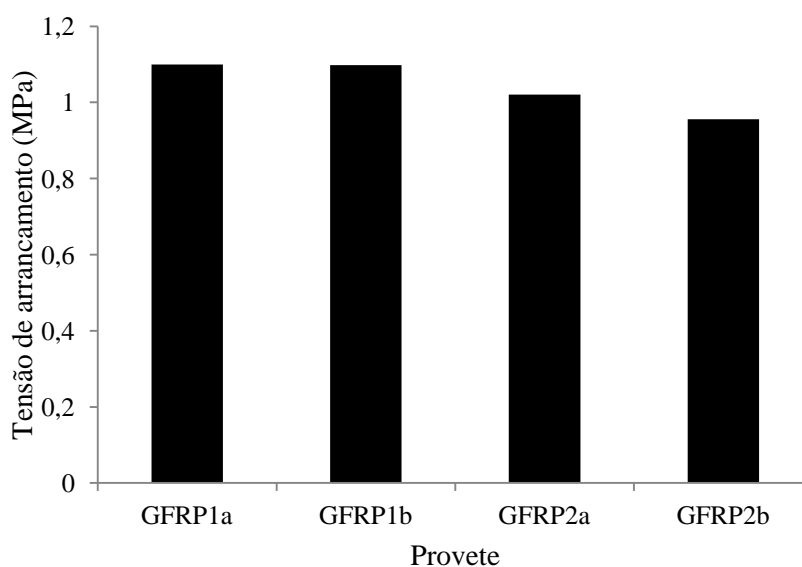


Figura 31 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento da série dos provetes de referência.

Através da observação dos resultados conclui-se que os provetes de referência mostraram uma reduzida dispersão na tensão de arrancamento, pelo que o coeficiente de variação foi também reduzido. A resistência média ao arrancamento foi de 1.0 MPa.

Tabela 17 – Resultados referentes aos provetes reforçados de referência.

Ensaio	$f_{tm,p}$ (MPa)
GFRP1a	1.10
GFRP1b	1.10
GFRP2a	1.02
GFRP2b	0.96
Média	1.04
Desvio Padrão	0.07
C.V. (%)	6.62

5.1.2. Ensaio com os provetes reforçados sujeitos à imersão na água

5.1.2.1. Série n.º 1

Nesta série foram ensaiados dois provetes designados por GFRP3 e GFRP4, ou seja, no total foram realizados quatro ensaios de arrancamento nos provetes reforçados. Na Figura 32 e na Tabela 18 podem-se observar os resultados obtidos através da execução dos ensaios nos provetes reforçados da série n.º 1. Os dados obtidos permitem concluir que os provetes desta série mostraram uma reduzida dispersão na tensão de arrancamento, pelo que o coeficiente de variação é também reduzido. A resistência média ao arrancamento foi de 1.0 MPa.

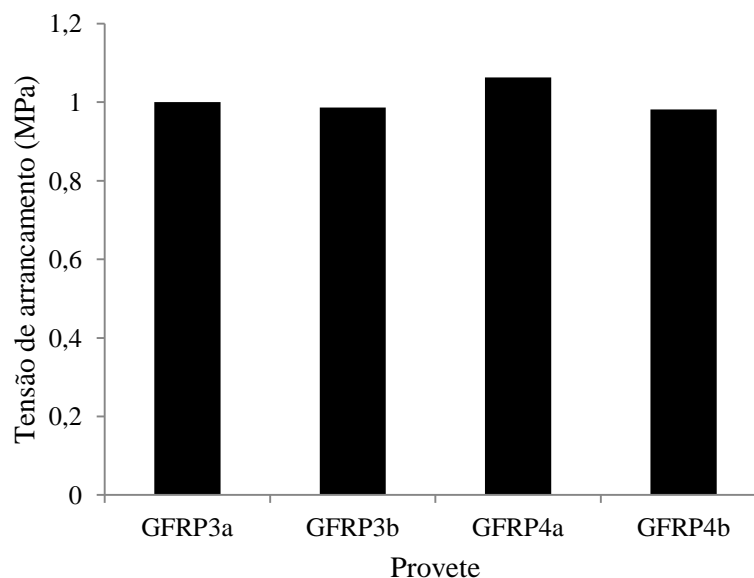


Figura 32 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento dos provetes da série n.º 1.

Tabela 18 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 1.

Ensaio	$f_{tm,p}$ (MPa)
GFRP3a	1.00
GFRP3b	0.99
GFRP4a	1.06
GFRP4b	0.98
Média	1.01
Desvio padrão	0.04
C.V. (%)	3.74

5.1.2.2. Série n.º 2

Nesta série foram ensaiados dois provetes designados por GFRP5 e GFRP6 pelo que deveriam ser apresentados os resultados de quatro ensaios. No entanto, não foi possível apresentar os resultados do ensaio GFRP5a pois ocorreram erros na realização deste ensaio.

Na Figura 33 e na Tabela 19 apresentam-se, resumidamente, as principais propriedades dos dois provetes reforçados.

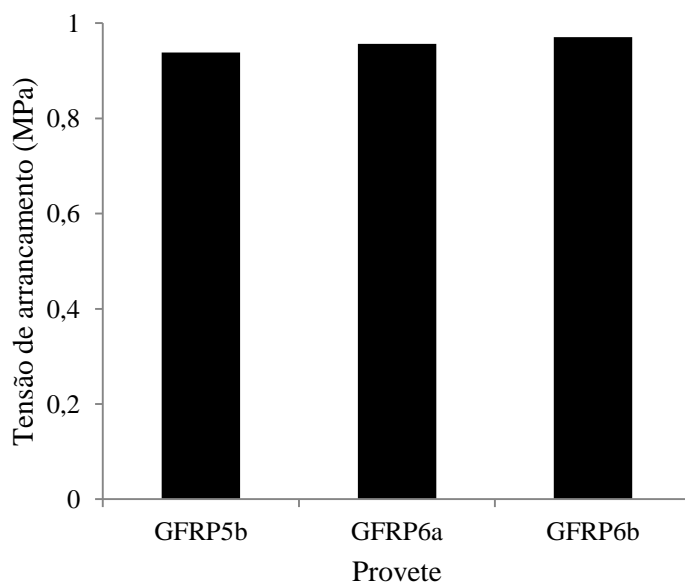


Figura 33 – Histograma com os resultados dos testes de arrancamento dos provetes da série n.º 2.

Os dados obtidos permitem concluir que os provetes desta série mostraram uma reduzida dispersão na tensão de arrancamento e que a resistência média ao arrancamento foi de 1.0 MPa.

Tabela 19 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 2.

Ensaio	$f_{tm,p}$ (MPa)
GFRP5b	0.94
GFRP6a	0.96
GFRP6b	0.97
Média	0.96
Desvio padrão	0.02
C.V. (%)	1.68

5.1.3. Análise comparativa

A Figura 34 apresenta o modo de rutura obtido em todos os provetes reforçados sujeitos aos ensaios de arrancamento. De acordo com a Figura 34, a fratura ocorre no substrato de tijolo pois foi o elemento mais fraco do sistema FRP/resina/tijolo sob uma carga de tração. Assim, a resistência à tração dos provetes testados depende da resistência à tração do substrato.

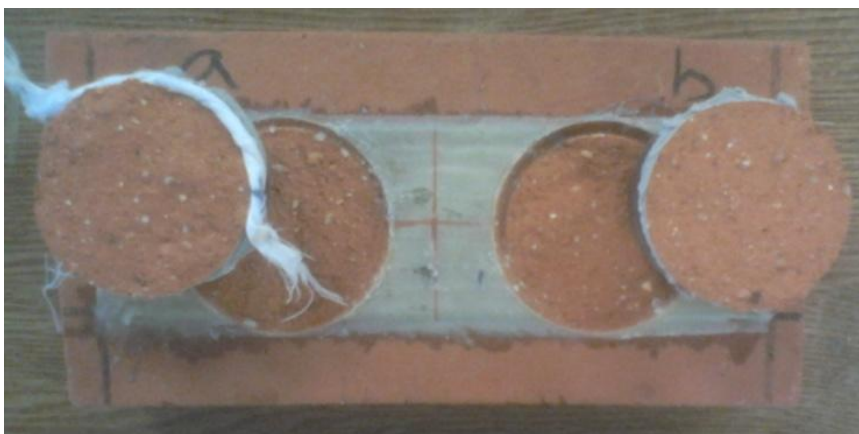


Figura 34 – Modos de rutura nos provetes reforçados.

Na Figura 35 apresenta-se, resumidamente, os valores médios normalizados da tensão de arrancamento obtidos para as diferentes séries, de forma a possibilitar a comparação entre elas.

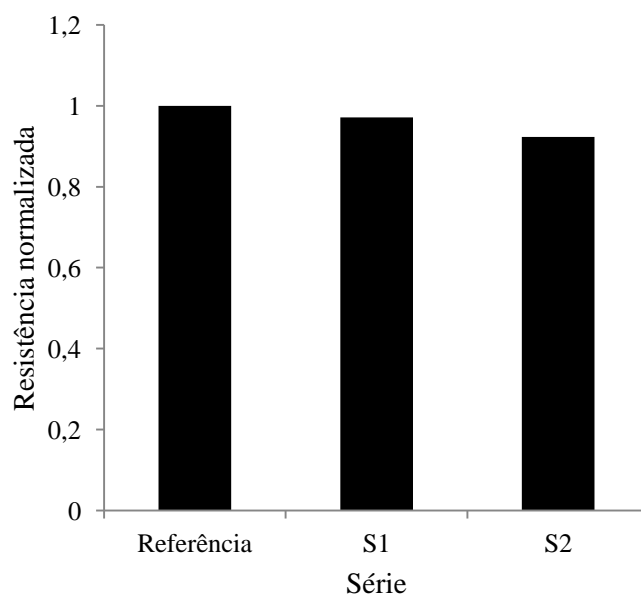


Figura 35 – Histograma com os resultados normalizados dos testes de arrancamento.

Através da análise da Figura 35 conclui-se que os provetes que possuem maior quantidade de água perderam resistência quando em comparação com os provetes de referência. A resistência diminuiu cerca de 3 % nos provetes da série n.º 1 e cerca de 8 % nos provetes da série n.º 2, em comparação com os provetes de referência.

Pode-se então concluir que o aumento do tempo de imersão em água parece diminuir a capacidade resistente à tração do sistema, que por sua vez, condiciona a eficácia do sistema.

5.2. Testes de aderência entre o tijolo e o GFRP

5.2.1. Ensaios com os provetes reforçados de referência

Nesta série de ensaios foram testados cinco provetes reforçados, os três provetes que contêm a superfície regularizada designam-se por GR1, GR2 e GR3, os restantes possuem a superfície original e designam-se por ORG2 e ORG3. Na Figura 36 apresenta-se o gráfico força de corte aplicada na ligação-deslocamento relativo entre o tijolo e o GFRP para a extremidade carregada dos provetes reforçados GR1 e ORG3. O comportamento dos restantes provetes desta série apresenta-se em anexo.

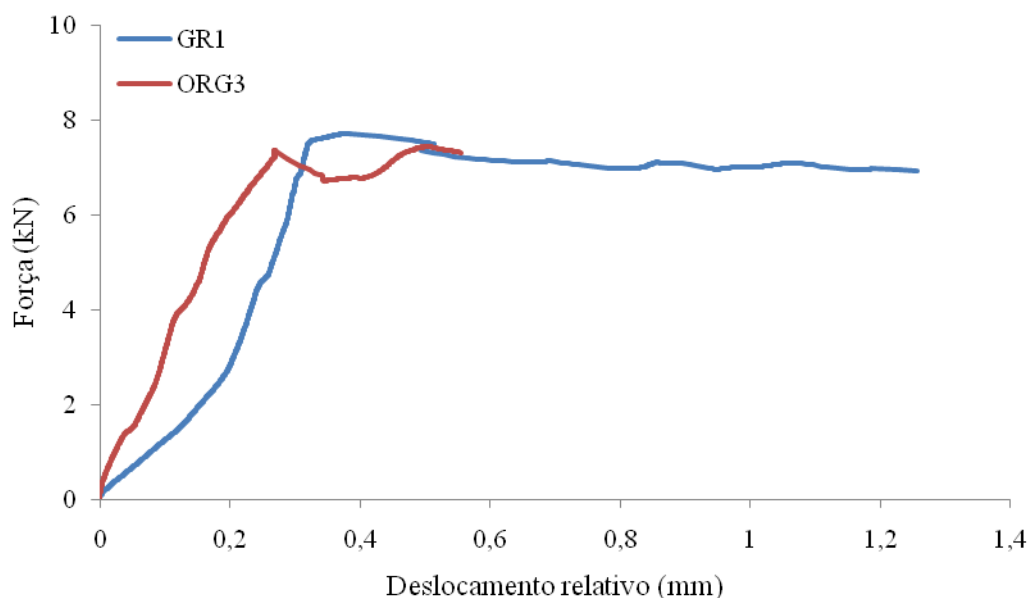


Figura 36 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes reforçados de referência.

Através da análise da Figura 36 conclui-se que os provetes exibiram um comportamento relativamente elástico linear até atingirem a força máxima de corte na ligação.

Nesta fase obteve-se um destacamento parcial da área de aderência arrancando uma camada fina de tijolo. O sistema continuou a responder à força máxima de corte, produzindo assim um tramo com aumento de deslocamento relativo sem aumento significativo de carga, até à rutura completa do reforço. Então pode-se dizer que os provetes, após atingirem o pico, exibiram um comportamento relativamente dúctil e que o provete GR1 possui maior ductilidade. O provete GR1 não exibiu um comportamento elástico linear até à força aproximadamente de 2 kN, possivelmente devido à ocorrência de erros no processo de leitura.

Na Tabela 20 estão exibidos os resultados obtidos que descrevem a força máxima aplicada ao GFRP que causou a fratura do reforço, ou seja, a força de corte máxima obtida na ligação GFRP-tijolo e o respetivo deslocamento relativo para a extremidade carregada dos provetes reforçados de referência.

Tabela 20 – Resultados referentes aos provetes reforçados de referência.

Proвете reforçado	F_{τ} (kN)	$\delta_{3-3'}$ (mm)
GR1	7.70	0.37
GR2	10.10	0.53
GR3	9.36	0.67
ORG2	7.13	0.29
ORG3	7.32	0.27
Média	8.32	0.43
C.V. (%)	15.94	39.88

Os dados obtidos na Tabela 20 permitem concluir que o coeficiente de variação, relativamente ao deslocamento relativo, foi bastante elevado devido à elevada dispersão nos resultados, portanto considerou-se que os deslocamentos obtidos pelos provetes GR2 e GR3 não influenciaram o valor do deslocamento relativo médio. Logo, a força de corte média da ligação foi de 8.3 kN e o deslocamento relativo médio da extremidade carregada foi de 0.31mm.

5.2.2. Ensaio com os provetes reforçados sujeitos a imersão na água

5.2.2.1. Série n.º 1

Nesta série foram ensaiados três provetes reforçados designados por ORG4, ORG5 e ORG6 que possuem a superfície original. Na Figura 37 e na Tabela 21 apresentam-se os principais resultados obtidos na extremidade carregada para os provetes reforçados da série n.º 1. O comportamento dos restantes provetes desta série apresenta-se em anexo.

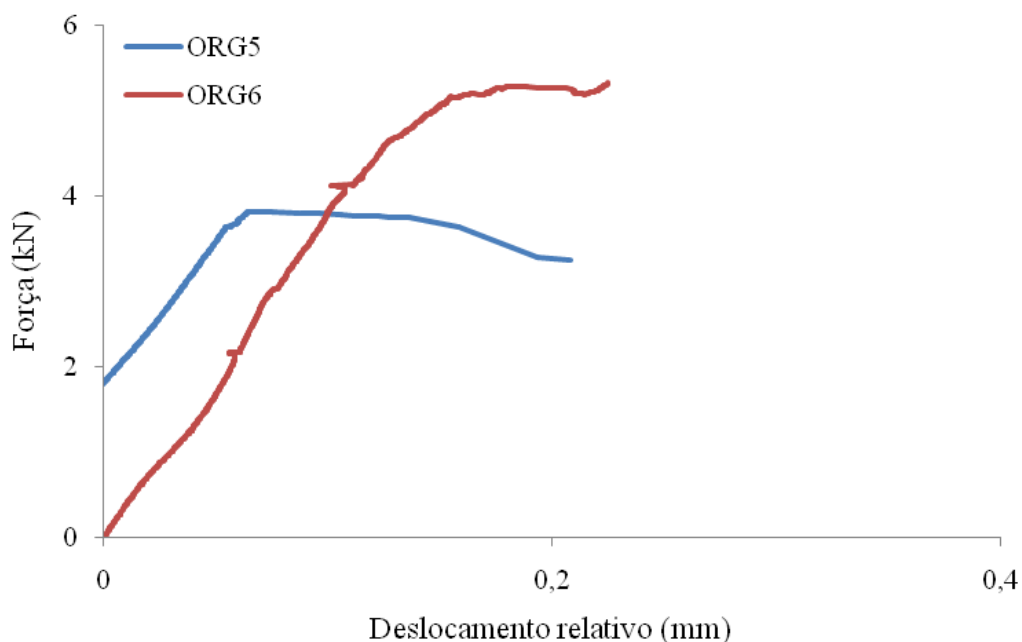


Figura 37 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes da série n.º 1.

Analisando a Figura 37 é possível concluir que o comportamento exibido para esta série é idêntico ao da série dos provetes de referência. Ambos os provetes, no primeiro tramo, possuem um comportamento relativamente elástico linear até à força máxima e, no último tramo, exibem um comportamento algo dúctil até à rutura completa do reforço. Nos provetes ORG5 e ORG6 verifica-se que, inicialmente, não apresentam um comportamento adequado, possivelmente, devido à ocorrência de erros no processo de leitura.

Tabela 21 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 1.

Provete reforçado	F_{τ} (kN)	$\delta_{3-3'}$ (mm)
ORG4	9.01	0.31
ORG5	3.82	0.08
ORG6	5.09	0.15
Média	5.97	0.18
C.V. (%)	45.29	67.30

Os dados obtidos na Tabela 21 permitem concluir que os coeficientes de variação, relativamente à força e ao deslocamento relativo, foram elevados devido à elevada dispersão nos resultados, portanto considerou-se que os resultados obtidos no provete ORG5 não devem ser considerados válidos. Portanto, a força de corte média da ligação foi de 7.1 kN e o deslocamento relativo médio da extremidade carregada foi de 0.23 mm.

5.2.2.2. Série n.º 2

Nesta série foram ensaiados quatro provetes reforçados, dois provetes contêm a superfície regularizada e foram designados por GR5 e GR6, os outros dois provetes designados por ORG7 e ORG8 possuem a superfície original. Na Figura 38 e na Tabela 22 apresentam-se os principais resultados obtidos na extremidade carregada para os provetes reforçados da série n.º 2. O comportamento dos restantes provetes desta série apresenta-se em anexo. Observando a Figura 38 conclui-se que o comportamento exibido para esta série foi semelhante ao das restantes. Ou seja, os provetes exibiram um comportamento elástico linear até à força máxima e, posteriormente, apresentaram um comportamento dúctil até à rutura completa do reforço. Nestes provetes verifica-se que, inicialmente, não apresentam um comportamento adequado, possivelmente, devido à ocorrência de erros de leitura.

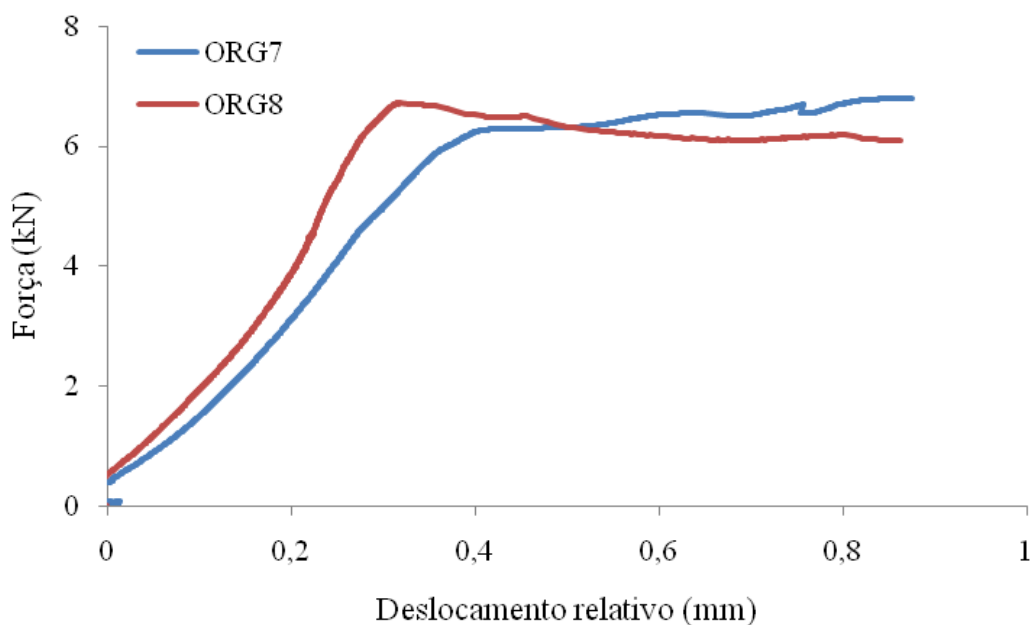


Figura 38 – Gráfico força-deslocamento relativo na extremidade carregada dos provetes da série n.º 2.

Os resultados obtidos na Tabela 22 permitem concluir que os coeficientes de variação, relativamente à força e ao deslocamento relativo, foram elevados devido à elevada dispersão nos resultados, portanto considerou-se que o deslocamento relativo obtido no provete GR5 e a força obtida no provete GR6 não devem ser considerados como válidos. Portanto, a força de corte média da ligação foi de 6.9 kN e o deslocamento relativo médio da extremidade carregada foi de 0.33 mm.

Tabela 22 – Resultados referentes aos provetes reforçados da série n.º 2.

Proвете reforçado	F_{τ} (kN)	$\delta_{3-3'}$ (mm)
GR5	7.77	0.79
GR6	9.43	0.25
ORG7	6.28	0.42
ORG8	6.72	0.32
Média	7.55	0.45
C.V. (%)	18.55	54.01

5.2.3. Análise comparativa

A Figura 39 apresenta o modo de rutura obtido no provete reforçado GR1 durante o ensaio de aderência. Inicialmente, a rutura foi caracterizada por um destacamento parcial da área de aderência arrancando uma camada fina de tijolo, na parte inicial da zona colada, seguindo-se de um destacamento total do reforço. Este modo de rutura foi observado em todos os provetes reforçados sujeitos a este tipo de ensaios.



Figura 39 – Modos de rutura nos provetes reforçados.

Na Figura 40 apresenta-se, resumidamente, os valores médios normalizados da força máxima obtida nos ensaios de aderência para as diferentes séries, de forma a possibilitar a comparação entre elas.

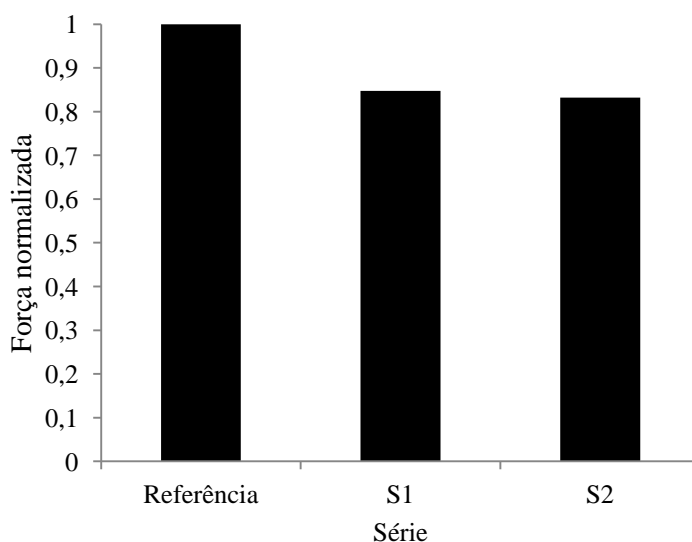


Figura 40 – Histograma com os resultados normalizados dos testes de aderência.

Os resultados obtidos mostram que, em comparação com os provetes de referência, a água provocou uma redução da força máxima, em termos de média, de 13 % e de 15 % nos

provetes reforçados da série n.º 1 e da série n.º 2, respetivamente. Assim, o aumento do tempo de imersão dos provetes em água parece reduzir a sua capacidade resistente. Embora as variações de resistência observadas sejam baixas, é necessário salientar que os tempos de exposição foram pequenos, quando comparados com os tempos de vida útil desejados para os reforços na engenharia civil. Por conseguinte, é expectável que maiores tempos de exposição resultem em maiores diminuições de resistência.

A Figura 41 apresenta os valores médios dos deslocamentos relativos para a extremidade livre, para a extremidade média e para a extremidade carregada relativamente à série n.º 1, série n.º 2 e série n.º 3. Na Tabela 23 apenas estão identificados os valores da extremidade carregada pois é nesta onde se verificam os maiores deslocamentos relativos, nas restantes extremidades os valores dos deslocamentos relativos são aproximadamente zero.

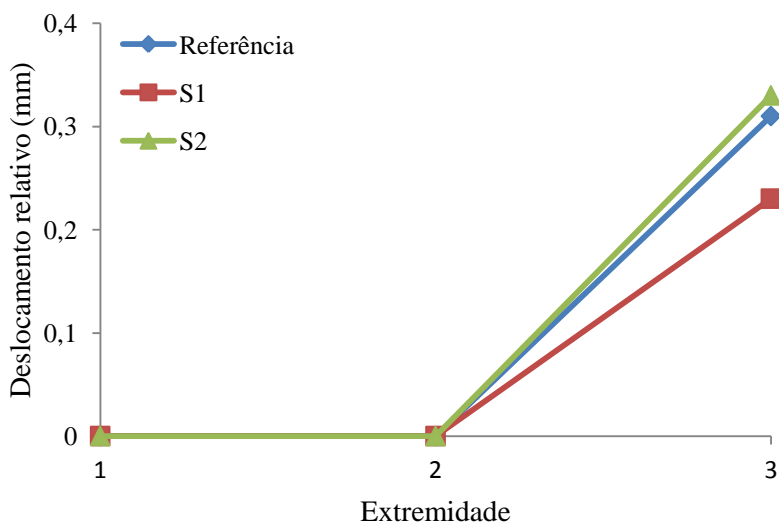


Figura 41 – Gráfico com os deslocamentos relativos para as três extremidades.

Os dados permitem concluir que o ponto de aplicação da carga, na extremidade carregada, foi o ponto crítico pois foi onde se desenvolveu um maior deslizamento do reforço. Os resultados mostram tendências, aparentemente, contrárias entre si, quanto à influência do tempo de imersão. O seu aumento provoca uma diminuição da rigidez dos provetes, logo aumenta a sua deformação. Para o mesmo nível de carga, nos provetes com maior tempo de exposição, os reforços ficam sujeitos a maiores deslocamentos. Portanto, os valores obtidos relativamente ao deslocamento na extremidade carregada deveriam ser mais elevados na série n.º 2 e menores na série de referência. Tal não se observa na Figura 41 ou na Tabela 23 que os deslocamentos da série referência não são inferiores ao da série n.º 1, muito possivelmente devido ao elevado coeficiente de variação obtido na série n.º 1. O provete ORG4 possui o

dobro do deslocamento relativamente ao provete ORG6 e apenas estes dois provetes influenciaram os resultados. Portanto, para esta série seria necessário realizar mais testes pois existiu uma grande dispersão nos resultados, tanto dos valores da força máxima como dos valores dos deslocamentos relativos, de forma a se obter as tendências corretas.

Tabela 23 – Deslocamentos relativos médios na extremidade carregada para as diferentes séries.

Série	$\delta_{3-3'}$ (mm)
Referência	0.31
S1	0.23
S2	0.33

Na Tabela 24 apresenta-se, em termos médios, os valores da força de corte da ligação para os provetes que possuem a superfície original e para os provetes que possuem a superfície regularizada para a série dos provetes de referência e para os provetes da série n.º 2, de forma a se verificar as diferenças entre estas superfícies.

Tabela 24 – Valores da força máxima da ligação para os provetes com a superfície original e para os provetes com a superfície regularizada.

	Superfície original	Superfície regularizada
Série	F_{τ} (kN)	F_{τ} (kN)
Referência	7.23	9.05
S2	6.50	8.6

Os dados obtidos permitem concluir que a força foi superior nos provetes que contêm a superfície regularizada. A força máxima aumentou cerca de 25 % e de 32 % na série referência e na série n.º 2, respetivamente. Também se verifica que ambos os provetes reforçados sofrem degradação pois ambas as forças diminuíram na série n.º 2, como seria expectável.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um programa experimental com o objetivo de analisar a degradação dos materiais compósitos de forma individual e, principalmente, avaliar o comportamento da ligação face ao agente de exposição ambiental em questão.

Nos resultados dos ensaios preliminares, relativamente aos materiais compósitos, verificou-se que água alterou as suas propriedades de forma individual. Os valores da resistência e da rigidez dos provetes sofreram reduzidas alterações enquanto a alteração dos valores da extensão média foi mais significativa, em comparação com os resultados obtidos para os provetes de referência. Também se pode concluir que a alteração dos valores da resistência foi mais significativa nos provetes de tijolo e nos provetes de GFRP.

Nos testes para a análise do comportamento da ligação reforço-tijolo, testes de arrancamento e testes de aderência, verificou-se que o aumento do tempo de exposição nos provetes reforçados provocou uma crescente degradação da ligação. Nos testes de arrancamento observou-se que a rutura ocorreu no substrato de tijolo pelo que a resistência à tração dos provetes testados depende da resistência à tração do substrato, que mostrou ser o elemento mais fraco do sistema FRP/resina/tijolo sob uma carga de tração, e não da resistência dos agentes de ligação. Portanto as condições de degradação proporcionaram alteração da resistência à tração do sistema, mas ao nível do substrato de tijolo.

Nos testes de aderência verificou-se que a rutura foi caracterizada por um destacamento parcial da área de aderência arrancando uma camada fina de tijolo, na parte inicial da zona colada, seguindo-se de um destacamento total do reforço. Os dados obtidos permitem concluir que o ponto de aplicação da carga, na extremidade carregada, foi o ponto crítico pois foi onde se desenvolveu um maior deslizamento do reforço. O aumento do tempo de imersão tende a provocar uma diminuição da rigidez dos provetes, logo aumentando a sua deformação.

Também se observou que força de corte na ligação é superior nos provetes reforçados que possuem a superfície regularizada, possivelmente, devido à penetração de uma maior quantidade de primário e de resina nos poros desta, que fortalece a porosidade interna do substrato de tijolo e, assim, um aumento da força para provocar a rutura da ligação.

Então pode-se afirmar que:

- A eficácia do comportamento em serviço do sistema reforçado é afetado sob condições de degradação ambiental, neste caso a imersão em água. Esta afeta a integridade tanto da interação entre o substrato e o polímero como a integridade do polímero em si, provocando uma redução no desempenho global. Portanto, as condições em serviço, em termos da presença de agentes ambientais, têm de ser consideradas quando se utiliza este tipo de reforço;
- Em ambos os testes realizados para caracterizar o comportamento da ligação, a rutura ocorreu no substrato de tijolo, portanto, a rutura é condicionada pela resistência do substrato e esta diminui com o aumento do teor de humidade nos provetes;
- Embora as variações de resistência observadas sejam baixas, é necessário salientar que os tempos de exposição foram relativamente pequenos, quando comparados com os tempos de vida útil desejados para os reforços na engenharia civil. Por conseguinte, parece ser razoável concluir que maiores tempos de exposição resultariam em maiores variações de resistência;
- Para períodos maiores de exposição o componente condicionante da eficácia do reforço pode passar a ser os materiais compósitos e não o substrato de tijolo.

Como trabalho futuro, recomenda-se a repetição destes ensaios para tempos de exposição mais longos (3 meses, 6 meses e 12 meses) para aferir a incompatibilidade física do sistema compósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanilla, M. A., Karbhari, V. M., and Li, Y., 2006a, “*Interlaminar and intralaminar durability characterization of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening*”, *Compos. Part B Eng.*, 37, 650-661.

Abanilla, M. A., Li, Y., and Karbhari, V. M., 2006b, “*Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening*”, *Compos. Part B Eng.*, 37, 200-212.

Bank, L.C., 2006, “*Composites for Construction: Structural design with FRP materials*”, John Wiley & Sons.

Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A. S., 2007, “*Nova abordagem do reforço de estruturas de betão com materiais compósitos*”, *Revista INGENIUM, Ordem dos Engenheiros, II Série, nº98, Março/Abril*, pp. 84-90.

fib bulletin 14, 2001, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, Technical Report.

Frigione M, Aiello MA, Naddeo C., 2006, “*Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints*”, *ConstrBuildMater*, 20:957–70.

Frigione, M., Aiello, M. A., and Leone, M., 2004, “*Durability aspects of polymer composites materials for concrete repairs*”, 11th Int. Congress on Polymers in Concrete, ICPIC '04, Berlin, Germany, Paper 61, 495-502.

Frigione, M., and Sciolti, M. S., 2006, “*Influence of moisture and moderate temperatures on the properties of polymer composite materials for concrete repair*”, *Proceedings of the International Symposium Polymers in Concrete, ISPIC '06, Guimarães, Portugal*, 297-304.

Guo, S., and Kagawa, Y., 2000, “*Temperature dependence of in situ constituent properties of polymerinfiltration-pyrolysis-processed NicalonTM SiC fiber-reinforced SiC matrix composite*”, J. Mater. Res., 15, 951-960.

Grace, N. F., 2004, “*Concrete Repair with CFRP - Evaluating the durability of externally bonded carbon fiber-reinforced polymer plates and fabric exposed to the environment*”, Concrete International, May, pp: 45-52.

Juvandes, L., 1999, “*Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Setembro.

Juvandes, L., 2002, “*Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP*”, Departamento de Engenharia Civil Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Juvandes, L., Figueiras, J., “*Questões sobre o controlo e a garantia de qualidade dum projeto de reforço com sistemas de CFRP*”, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, pp 567-578.

Karbhari, V. M., 2002, “*Durability of FRP composites for civil infrastructure – myth, mystery or reality*”. Proceedings of the First International Conference of Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, R. A. Shenoi, S. S. Moy and L. C. Hollaway, eds, Southampton University: Thomas Telford, UK, 33-43.

Kueseng, K., Cervenka, A. J., and Young, R. J., 2001, “*Moisture absorption and interfacial failure in aramidic/epoxy composites*”, Proceedings of Deformation and Fracture of Composites, Manchester, U.K., 439-446.

Marreiros, R.P.C., 2005, “*Degradação da aderência entre CFRP e betão armado devida a envelhecimento acelerado*”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Nanni, A., 2004, “*Fiber reinforced polymer composites for infrastructure strengthening - From research to practice*”, VII AIMAT Congress, Ancona, Italy, June 29 - July 2, Key-note Paper KP2, 10 pp. (CD-ROM).

PUC – Rio (s.d), “*Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono*”, Certificação Digital N° 0710932/CA.

Rinaldi, G., and Maura, G., 1993, “*Durable glass-epoxy composites cured at low temperatures- – Effects of thermal cycling, UV irradiation and wet environment*”. Polym. Int., 31, 339-345.

Schwartz, M.M., 1984, “*Composite Materials Handbook*”. MacGraw-Hill, EUA.

Sciolti, M.S., Frigione M. e Aiello, M.A., 2010, “*Wet lay-up manufactured FRP’s for concrete and masonry repair. Influence of water on the properties of composites and of their epoxy components*”, Journal of Composites for Construction.

Silva, M.M.S, 2011, “*Investigação experimental da aderência entre alvenaria histórica e materiais compósitos sob condições de degradação ambiental*”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Soares, C.M. e Martins, J.G., 2006, “*Reforço e estruturas de betão armado com CFRP*”. Universidade Fernando Pessoa, 1ª edição.

Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H., 2004. “*Environmental effects on tensile properties of FRP laminates made using wet-lay-up method*”, Proceedings of the Second International Conference on Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, L. C. Hollaway, M. K. Chryssanthopoulos and S. S. J. Moy, eds. University of Surrey, Guilford, U.K., 619-632.

ANEXOS

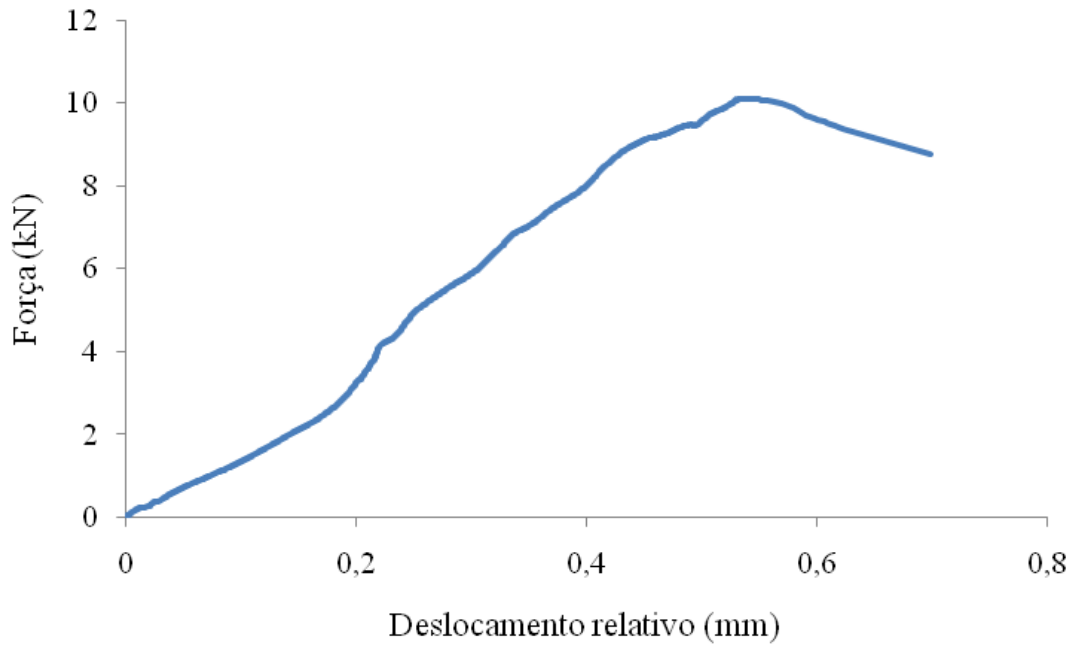


Figura 42 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR2 de referência.

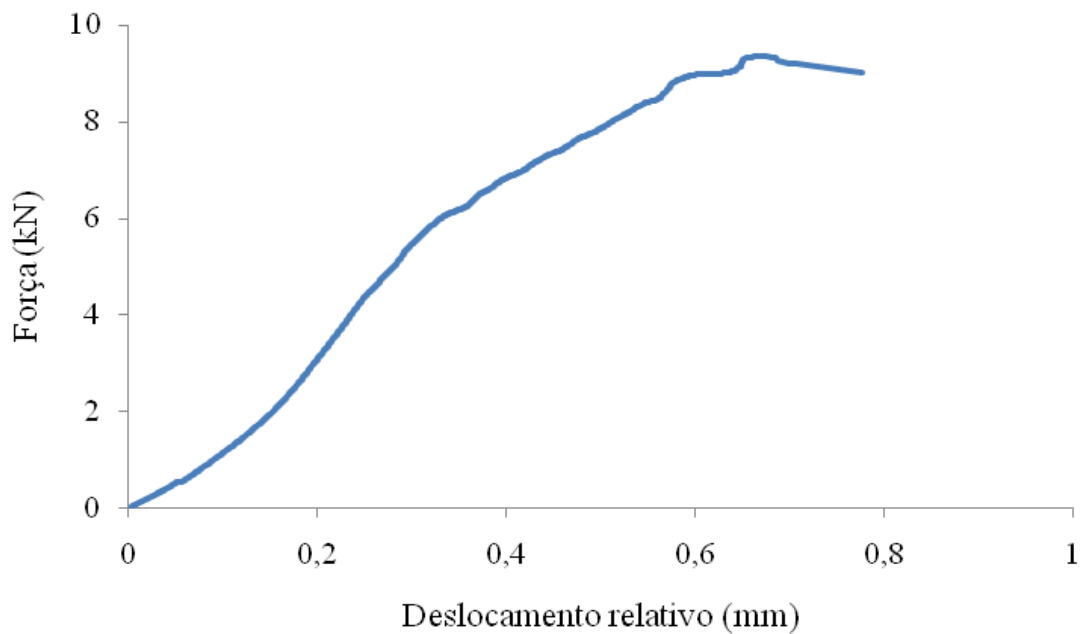


Figura 43 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR3 de referência.

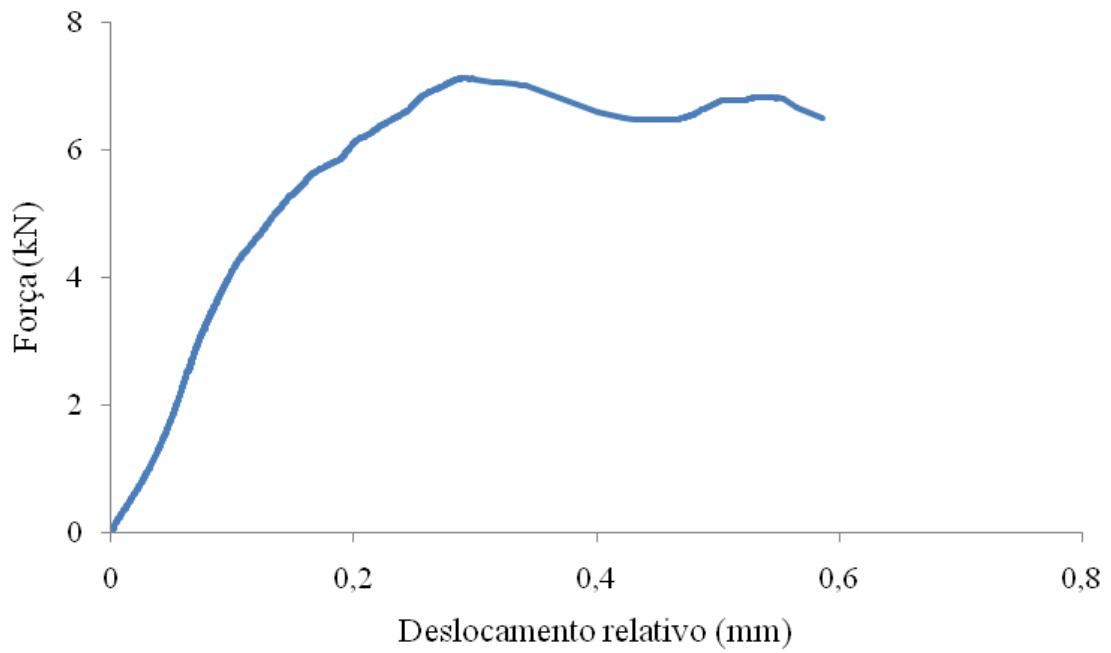


Figura 44 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado ORG2 de referência.

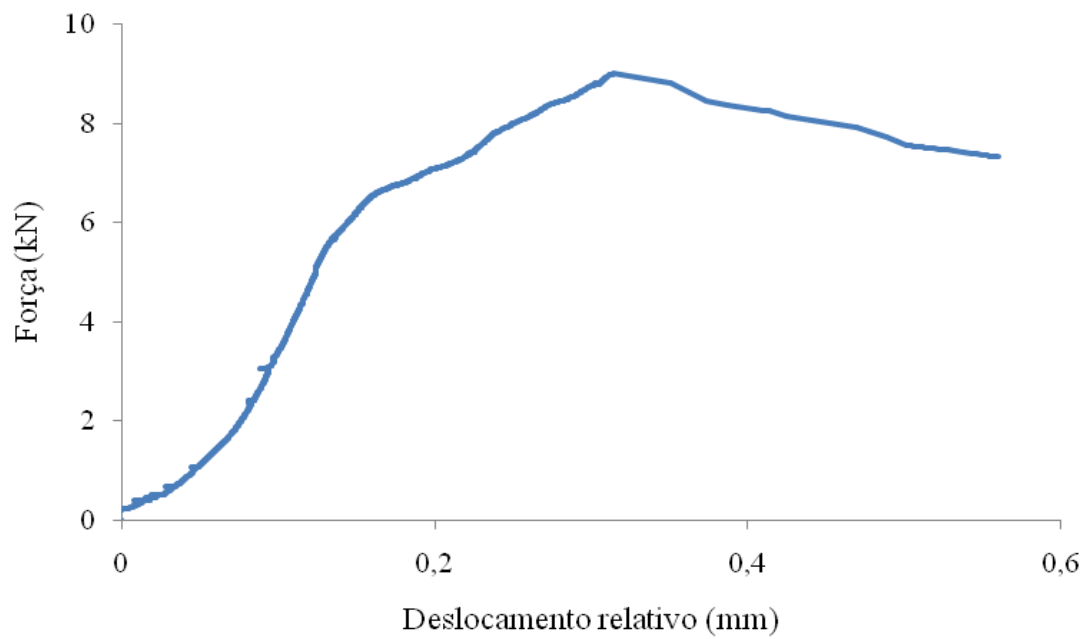


Figura 45 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado ORG4 da série n.º 1.

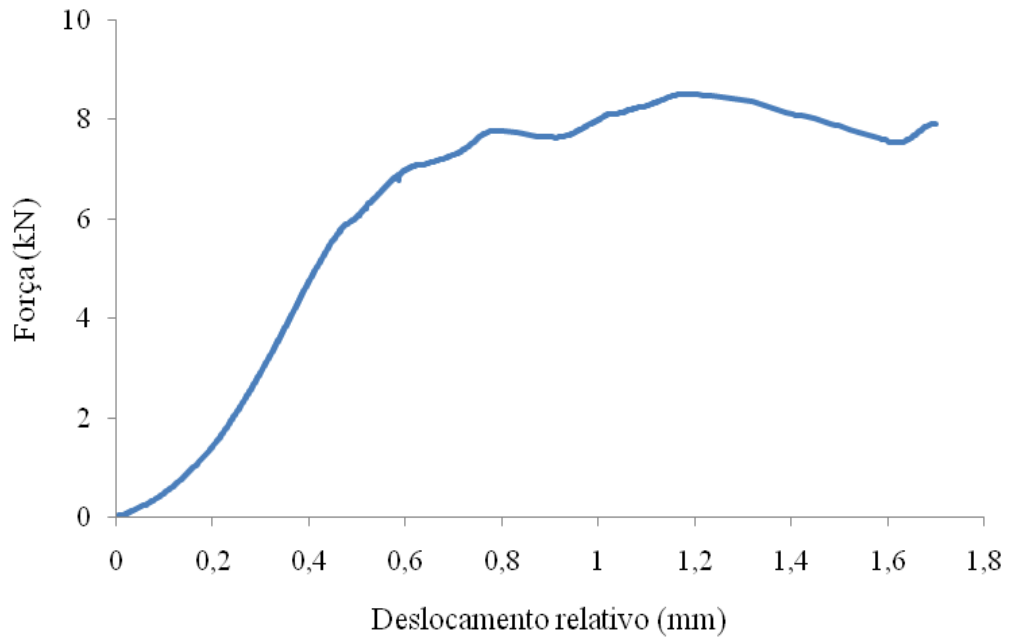


Figura 46 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR5 da série n.º 2.

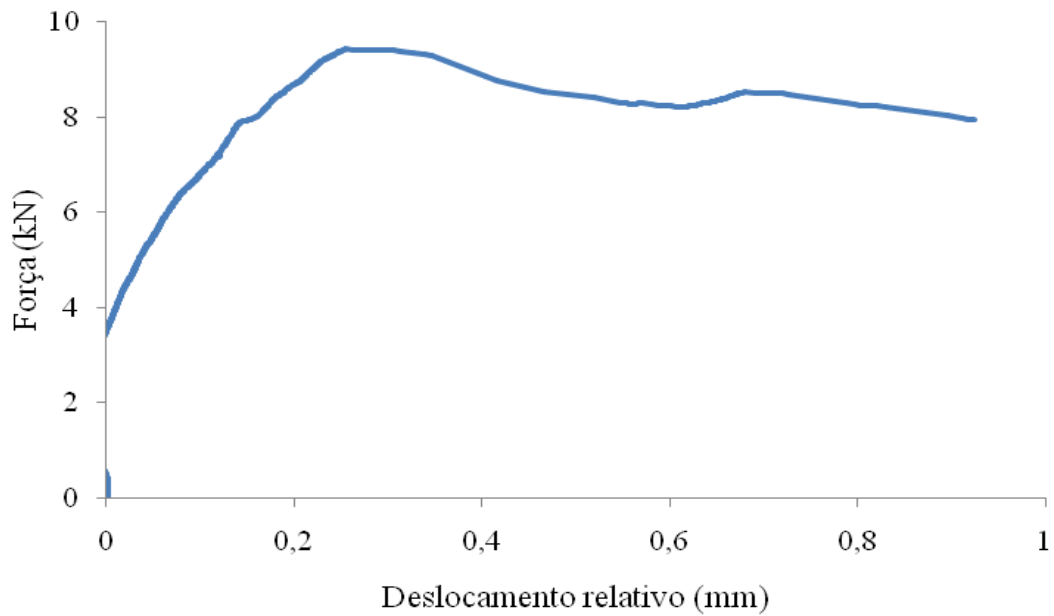


Figura 47 – Gráfico força-deslocamento relativo do provete reforçado GR6 da série n.º 2.

Tabela 25 – Designações e dimensões dos provetes de tijolo.

Provete	b ₁ (mm)	t ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t ₂ (mm)	h (mm)	b _m (mm)	t _m (mm)	Área (mm ²)
Z1	40.12	40.34	39.90	40.32	38.83	40.01	40.33	1613.60
Z2	40.30	39.77	40.30	40.05	38.60	40.30	39.91	1608.17
Z3	40.30	39.16	40.39	39.43	39.29	40.34	39.29	1584.96
Z4	40.94	40.36	40.81	40.25	39.51	40.87	40.30	1647.16
Z6	40.16	40.17	39.90	40.09	41.21	40.03	40.13	1606.20
Z9	40.27	39.83	40.14	40.02	41.06	40.20	39.93	1604.99
Z5	40.33	40.11	40.11	39.99	39.48	40.22	40.05	1610.81
Z7	39.99	39.99	40.03	39.61	40.61	40.01	39.80	1592.40
Z8	40.10	40.19	39.89	40.02	39.31	40.00	40.11	1604.00

Tabela 26 – Designações e dimensões dos provetes de primário.

Provete	b ₁ (mm)	t ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t ₂ (mm)	b ₃ (mm)	t ₃ (mm)	b _m (mm)	t _m (mm)	Área (mm ²)
P1	10.40	4.54	10.17	4.27	10.53	4.47	10.37	4.43	45.94
P2	10.28	4.36	10.21	4.33	10.22	4.30	10.24	4.33	44.34
P3	10.18	4.18	10.05	4.23	10.05	4.18	10.37	4.2	43.55
P4	10.50	4.43	10.39	4.32	10.13	4.38	10.34	4.38	45.25
P5	10.21	4.35	10.15	4.41	10.08	4.50	10.15	4.42	44.84
P7	10.04	4.44	10.07	4.45	10.01	4.48	10.04	4.46	44.74
P3	10.20	4.13	10.20	4.15	10.19	4.16	10.20	4.15	42.28
P8	10.28	4.39	10.34	4.35	10.30	4.44	10.31	4.39	45.28
P9	10.17	4.24	10.21	4.33	10.22	4.39	10.20	4.32	44.06
P10	9.99	4.15	10.04	4.10	10.07	4.09	10.03	4.11	41.27

Tabela 27 – Designações e dimensões dos provetes de resina.

Provete	b ₁ (mm)	t ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t ₂ (mm)	b ₃ (mm)	t ₃ (mm)	b _m (mm)	t _m (mm)	Área (mm ²)
E1	10.07	4.12	10.07	4.11	10.08	4.11	10.07	4.11	41.39
E2	10.57	4.27	10.58	4.11	10.64	4.21	10.60	4.20	44.52
E3	10.16	4.16	10.13	4.14	10.11	4.14	10.13	4.15	42.04
E4	10.24	4.56	10.11	4.19	10.33	4.36	10.23	4.37	44.71
E5	10.05	4.15	10.09	4.14	10.06	4.16	10.07	4.15	41.79
E6	10.04	4.20	10.09	4.18	10.16	4.21	10.10	4.20	42.42
E7	10.17	4.15	10.10	4.13	10.08	4.14	10.12	4.14	41.90
E8	10.17	4.28	10.33	4.26	10.25	4.30	10.25	4.28	43.87
E9	10.26	4.31	9.90	4.16	10.16	4.47	10.11	4.31	43.59
E10	10.15	4.51	9.99	4.54	10.13	4.68	10.09	4.58	46.18
E11	9.73	4.26	9.32	4.14	9.53	4.19	9.53	4.20	39.98
E12	10.14	4.43	10.05	4.17	10.08	4.23	10.09	4.28	43.15
E13	10.02	4.21	10.08	4.25	10.07	4.26	10.06	4.24	42.64

Tabela 28 – Designações e dimensões dos provetes de GFRP.

Provete	b ₁ (mm)	t ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t ₂ (mm)	b ₃ (mm)	t ₃ (mm)	b _m (mm)	t _m (mm)	Área (mm ²)
GE1	15.47	2.52	15.53	2.31	15.46	2.29	15.49	0.48	7.44
GE2	16.33	2.39	16.33	2.16	16.18	1.92	16.28	0.48	7.81
GE3	16.86	2.26	16.29	2.03	16.08	2.12	16.41	0.48	7.88
GE4	16.95	2.22	16.00	2.60	16.36	2.25	16.44	0.48	7.89
GE5	16.27	2.36	16.33	1.81	16.31	1.79	16.30	0.48	7.82
GE6	16.00	2.72	15.96	2.31	15.98	2.51	15.98	0.48	7.67
GE7	15.61	2.30	15.84	2.21	16.10	2.29	15.85	0.48	7.61
GE8	15.57	2.16	15.52	2.15	16.21	2.46	15.78	0.48	7.57
GE10	15.52	2.15	15.87	2.32	15.62	2.37	15.67	0.48	7.52
GE11	16.93	2.06	16.18	1.89	16.19	2.25	16.43	0.48	7.89
GE12	15.93	2.08	15.73	2.46	16.41	2.49	16.02	0.48	7.69
GE16	15.45	2.01	15.47	2.14	15.46	2.21	15.46	0.48	7.42