



**Soluções de Reforço Sísmico de Paredes
de Alvenaria de Enchimento**

Andreia Piedade Gomes Martins

Uminho | 2013

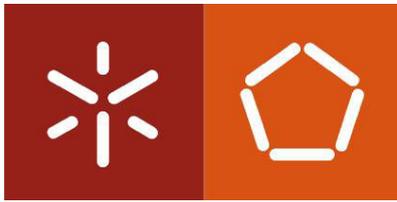


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Piedade Gomes Martins

**Soluções de Reforço Sísmico de Paredes
de Alvenaria de Enchimento**

outubro de 2013



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Andreia Piedade Gomes Martins

**Soluções de Reforço Sísmico de Paredes
de Alvenaria de Enchimento**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Graça Vasconcelos
e do
Professor Doutor Raúl Figueiro

outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Nome: Andreia Piedade Gomes Martins

Endereço Eletrónico: andreia.civil@hotmail.com

Telemóvel: 914304612

Número do Bilhete de Identidade: 13743181

Título da dissertação: Soluções de reforço sísmico de paredes de alvenaria de enchimento

Orientador: Professora Doutora Graça Vasconcelos

Co-Orientador: Professor Doutor Raúl Fanguero

Ano de Conclusão: 2013

Dissertação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTE RELATÓRIO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

"O agradecimento silencioso não serve muito a ninguém.", recitou Gertrude Stein, e, partilhando da mesma opinião, passo a enunciar publicamente as principais pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, a todos, Muito Obrigada!

Agradeço à minha família, amigos e ao meu namorado pelo apoio, conforto e ânimo incondicional que me proporcionaram ao longo de todo este trabalho.

Agradeço à Professora Graça Vasconcelos por me ter orientado e possuir um papel muito importante no desenvolvimento da minha formação académica, pelo apoio, incentivos, disponibilidade e positivismo presente em todos os momentos.

Agradeço também ao Professor Raúl Figueiro pela oportunidade concebida, ajuda e conselhos disponibilizados.

Agradeço à equipa Fibrous Materials Research Group e Fibrenamics, em particular ao Fernando Cunha, por todas as sugestões, conselhos e apoio fornecido ao longo da dissertação.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em especial Carlos Jesus, António José Matos e Marco Jorge e ao técnico do Laboratório de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho, Joaquim Jorge pelo apoio e contribuição fundamental prestada ao longo do desenvolvimento do trabalho experimental.

RESUMO

Atualmente, têm-se registado inúmeros eventos sísmicos que comprovaram a vulnerabilidade das paredes de enchimento inseridas em pórticos de betão armado. A vulnerabilidade é essencialmente devida à inexistência de regras de dimensionamento e à não utilização de detalhes construtivos adequados durante a construção. Por isso, é importante avaliar técnicas de reforço que possam ser implementadas nas paredes existentes ou a ser construídas, de maneira a melhorar o seu desempenho, evitando as roturas frágeis, e por outro lado possam potenciar benefícios ao nível do comportamento global do edifício à ação sísmica.

Este trabalho apresenta uma sugestiva adaptação da técnica de reforço de paredes de alvenaria designada na literatura inglesa por Textile Reinforced Mortar (TRM) com vista ao melhoramento das paredes a ações fora do plano. A malha é constituída por varões compósitos cujo núcleo é ocupado por fibras resistentes que são envolvidas numa estrutura de entrançado têxtil, sendo uma alternativa ao uso de materiais compósitos aplicados através de diferentes técnicas. Esta técnica apresenta a vantagem da possibilidade de dimensionamento da constituição da malha de acordo com determinadas exigências mecânicas, através de processos de baixa tecnologia e baixo custo na sua produção.

Para além da definição e otimização experimental dos varões de material compósito em termos de aderência com a argamassa de reboco, foi efetuado um estudo alargado para avaliação do desempenho como material de reforço da alvenaria sujeita a esforços de flexão. Os resultados obtidos permitiram concluir que as malhas constituídas pelos varões compósitos inseridos no reboco de alvenaria possuem boa aderência, resistência mecânica favorável e comportamento muito dúctil quando comparadas com malhas comerciais equivalentes, evitando assim a rotura brusca e potenciando o comportamento dúctil essencial ao bom desempenho sísmico.

Palavras-chave: Paredes de Alvenaria de enchimento, Reforço Sísmico, Argamassa reforçada (Técnica TRM), Varões Compósitos Têxteis (BCR), Aderência, Ductilidade.

ABSTRACT

In the recent past numerous seismic events have demonstrated the important vulnerability of masonry infill walls enclosed in reinforced concrete frames. This vulnerability is attributed to the inexistence of design rules and to the non-adequate constructive details during the construction. Therefore, it is important to evaluate strengthening techniques that can be implemented on existing walls or to be built aiming at improving the seismic behavior by preventing fragile failure modes and that can potentiate the good global seismic behavior of reinforced concrete frames structures.

This study provides a suggestive adaptation of the technique known as Textile Reinforced Mortar (TRM), aiming at improving the out-of-plane behavior of the masonry infill walls. The fabric comprises textile composite rods with a reinforced nucleus and is an alternative technique to the use of other composite materials applied with distinct techniques. This technique has the advantage of designing the constitution of the mesh according to certain mechanical requirements, involving of low production technology and low cost production.

Besides the definition and experimental optimization of the of the textile reinforced composite material in terms of adherence to the involving mortar, an enlarged experimental program was carried out for the evaluation of its mechanical performance as a strengthening material of masonry infill subjected to flexure.

The results showed that the meshes formed by composite rods embedded in the mortar plastering have good adhesion, mechanical strength and a very ductile behavior, when compared to equivalent commercial meshes, thus avoiding the sudden collapse and promoting the ductile behavior, which is essential to the good seismic behavior.

Keywords: Masonry Infill Walls, Seismic strengthening, Textile Reinforced Mortar (TRM), Braided Composite Rods (BCR), Adherence, Ductility.

ABREVIATURAS

BCR: Varões compósitos entrançados;

FRP: Polímero reforçado com fibra;

GFRP: Polímero reforçado com fibra de vidro;

CFRP: Polímero reforçado com fibra de carbono;

TRM: Argamassa reforçada com têxteis;

LVDT: Transdutor de diferencial linear variável.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Abreviaturas.....	viii
Índice Geral	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Quadros	xxi
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Organização do trabalho	4
CAPÍTULO II.....	7
2 ESTADO DE ARTE.....	7
2.1 Generalidades das paredes de alvenaria.....	7
2.1.1 Características das paredes: materiais e tipologias.....	7
2.1.2 Características mecânicas das paredes	11
2.1.3 Causas das anomalias das paredes.....	11
2.2 Comportamento das paredes de alvenaria à ação sísmica	13
2.2.1 Enquadramento.....	13
2.2.2 Comportamento fora do plano.....	16

2.2.2.1	Modos de rotura	16
2.2.2.2	Influência da geometria da parede	19
2.2.2.3	Outros modos de colapso	19
2.3	Reforço de paredes de alvenaria	20
2.3.1	Materiais de reforço	21
2.3.1.1	Fibras e malhas de aço	22
2.3.1.2	Materiais poliméricos (FRP).....	22
2.3.2	Argamassa reforçada com malhas de fibra têxtil	26
2.3.2.1	Malhas de entrançados de fibra têxtil	30
2.3.3	Outras Técnicas de reforço	33
2.3.3.1	Reforço com alvenaria armada	33
CAPÍTULO III.....		35
3	MATERIAL DE REFORÇO	35
3.1	Introdução.....	35
3.2	Composição do material	35
3.3	Metodologia da produção dos varões BCR.....	37
3.3.1	Técnica de entrançamento.....	38
3.3.2	Rugosidade do varão compósito	41
3.3.3	Produção dos varões BCR.....	44
3.3.4	Análise visual dos varões BCR.....	45
3.4	Malhas comerciais	49
CAPÍTULO IV.....		51
4	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE VARÕES BCR E MALHAS.....	51
4.1	Introdução.....	51
4.2	Caracterização do comportamento da aderência	52
4.2.1	Materiais.....	52

4.2.1.1	Varões BCR.....	52
4.2.1.2	Malhas	52
4.2.1.3	Argamassa	53
4.2.1.4	Tijolos.....	55
4.2.2	Provetes para os ensaios de aderência	55
4.2.2.1	Varões BCR.....	55
4.2.2.2	Malhas	58
4.2.3	Procedimento de ensaio	59
4.2.3.1	Ensaio de aderência em varões	59
4.2.3.2	Ensaio de aderência em malhas	61
4.3	Resultados e análise de resultados	62
4.3.1	Ensaio de aderência em varões	62
4.3.2	Ensaio de aderência em malhas	68
4.4	Caracterização do comportamento à tração dos materiais de reforço.....	72
4.4.1	Materiais	72
4.4.1.1	Varões.....	72
4.4.1.2	Malhas	73
4.4.2	Procedimento de ensaio	73
4.4.2.1	Varões.....	73
4.4.2.2	Malhas	75
4.4.3	Resultados e análise de resultados	77
4.4.3.1	Varões.....	77
4.4.3.2	Malhas	82

CAPÍTULO V	83
5 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE ENCHIMENTO	83
5.1 Introdução.....	83
5.2 Definição dos provetes de alvenaria.....	83
5.2.1 Geometria dos provetes.....	84
5.3 Caracterização dos materiais das paredes de alvenaria	87
5.3.1 Tijolo.....	87
5.3.2 Argamassa.....	88
5.3.3 Malhas - Metodologia de produção das malhas de reforço	89
5.4 Construção dos provetes de alvenaria	93
5.5 Metodologia de aplicação das malhas de reforço.....	95
5.6 Procedimento de ensaio.....	96
5.7 Resultados e análise de resultados.....	99
5.7.1 Parede de referência	100
5.7.2 Malha S&P Armo L500	103
5.7.3 Malha 1evmin_8_carbono.....	107
5.7.4 Malha Mapei Mapegrid G220.....	112
5.7.5 Malha 1evmin_8_vidro	115
5.7.6 Análise comparativa.....	119
5.8 Análise analítica e comparação com resultados experimentais.....	126
5.8.1 Características dos materiais	126
5.8.2 Formulação do modelo analítico.....	129
5.8.3 Comparação com os resultados experimentais	132
5.9 Comparação com trabalhos anteriores	132

CAPÍTULO VI.....	135
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	135
6.1 Introdução	135
6.2 Conclusões	135
6.2.1 Comportamento de aderência	135
6.2.2 Comportamento de tração.....	136
6.2.3 Avaliação do desempenho das malhas de BCR como material de reforço	137
6.3 Trabalhos Futuros	139
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS.....	145
A1 – Informação técnica acerca dos materiais utilizados.....	145
A2- Informação sobre os resultados médios obtidos no estudo de aderência.	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução das paredes de alvenaria [9]	9
Figura 2.2 – Tipologias de tijolos mais usuais [9].....	10
Figura 2.3 – Tipologias mais usuais de tijolos com furação horizontal [12, 13].....	10
Figura 2.4 – Combinação de fatores que contribuem para a fendilhação e instabilidade [19].	13
Figura 2.5 – Modos de colapso de paredes de alvenaria [adaptado de [2]].....	15
Figura 2.6 – Fendilhação e colapso de parte dos painéis exteriores [17]	16
Figura 2.7 – Total desconexão do painel exterior [17].....	17
Figura 2.8 – a) Colapso da parede de enchimento para fora do plano; b) Rotação do painel para fora do plano; c) Formação de fenda horizontal e d) Colapso total da parede [17]	17
Figura 2.9 – Fendilhação típica e deslocamento para fora do plano [9].....	18
Figura 2.10 – Formação de fendas junto à base da parede [20]	18
Figura 2.11 – (a) Movimento da parede para fora do plano entre o pilar e a parede; (b) Separação completa do painel de alvenaria do pórtico de betão armado [20]	18
Figura 2.12 – Rotura de parte de alvenaria devido à falta de elementos estruturais [19].....	19
Figura 2.13 – Comportamento de uma parede de alvenaria a ações cíclicas no plano: (a) Modo de rotura da parede sem reforço; (b) Reforço aplicado ao modelo; (c) Modo de rotura da parede reforçada [28].....	25
Figura 2.14 – Provetes de alvenaria reforçados com a técnica TRM: (a) – configuração do ensaio fora do plano, (b) configuração no plano [8].....	27
Figura 2.15 – (a) Abertura de fenda e esmagamento do tijolo; (b) Destacamento da matriz da argamassa. [7].....	28
Figura 2.16 – (a) Deslizamento das fibras dentro da matriz de argamassa; (b) Colapso das fibras [7]	28

Figura 2.17 (a) – Comportamento das malhas de aço; (b) – Comportamento das laminados de propileno; (c) – Comportamento da malha de fibras de vidro [23]	29
Figura 2.18 – Estrutura de entrançado de um varão composto.....	30
Figura 2.19 – Processo de execução do compósito entrançado com fibras de reforço [32]	31
Figura 2.20 – Resultados obtidos entre soluções produzidas (4g6, 2g3 e 2g6) e soluções comerciais (SP e mapei) [9].....	33
Figura 2.21 – Aplicação de (a) armadura de junta horizontal em paredes simples ou duplas e (b) armadura vertical [4, 33]	34
Figura 2.22 - Paredes de alvenaria sem função estrutural – fenómeno de fissuração e solução para evitar anomalias [adaptada de [34]]	34
Figura 3.1 Esquema representativo da secção transversal do BCR	35
Figura 3.2 (a) Entrançadeira; (b) Bobine com multifilamento de poliéster de alta tenacidade	38
Figura 3.3 (a) – Esquema de entrançamento [5]; (b) Esquema da posição dos fusos.....	39
Figura 3.4 (a) Combinação de roldanas para velocidade máxima de tiragem;	39
Figura 3.5 - Representação do ângulo de entrançamento e diâmetro de um entrançado [5] ...	40
Figura 3.6 (a) Introdução da estrutura fibrosa no compósito; (b) Tensor de fios	40
Figura 3.7 – (a) Fabrico e bobinagem da rugosidade; (b) Bobines com rugosidades utilizadas no compósito	42
Figura 3.8 – Esquema representativo do compósito simples sem rugosidade	43
Figura 3.9 – Comparação da área média de cada tipologia de rugosidade.	44
Figura 3.10 – (a) Bobine preenchida por BCR sem aplicação de resina; (b) – Tensionamento do material compósito; (c) – Aplicação superficial de resina com pincel	45
Figura 3.11 – Malha comercial S&P: ARMO L 500	50
Figura 3.12 – Malha comercial MAPEI: Mapegrid G220	50
Figura 4.1 – Exemplo de malhas consideradas: (a) Malha 1evmin_8; (b) Malha mapei; (c) Malha S&P.....	53
Figura 4.2 – Ensaio à flexão (esquerda) e à compressão (direita) dos provetes de argamassa aos 28 dias de cura	55

Figura 4.3 – Fabrico de provetes cilíndricos de argamassa.....	56
Figura 4.4 – Processo de fabrico das amarras nos varões	57
Figura 4.5 – Fabrico e aplicação de malhas para ensaio de aderência	59
Figura 4.6 – (a) Esquema representativo do ensaio de aderência em cilindros da série 1 (dimensões em metros); (b) Esquema de ensaio de aderência a varões compósitos BCR.....	60
Figura 4.7 – (a) Esquema representativo do ensaio de aderência em tijolos (dimensões em metros); (b) Esquema de ensaio de aderência a malhas	61
Figura 4.8 (a) – Modos de rotura de arrancamento do varão nas séries 1 e 2; (b) Modo de rotura de deslizamento do varão dentro da maxila.....	62
Figura 4.9 – Rotura do varão compósito sem existir rotura por aderência na série 3	63
Figura 4.10 – Forças máximas médias de cada tipo de varão compósito.....	65
Figura 4.11 – Diagramas força - deslocamento de cada tipo de varão compósito nos ensaios de aderência a cilindros	65
Figura 4.12 – Comportamento típico força - deslocamento das malhas nos ensaios de aderência em tijolos	69
Figura 4.13 - Forças máximas médias de cada tipo de malha	69
Figura 4.14 – Esquemas representativos dos modos de rotura dos ensaios de aderência	71
Figura 4.15 Modos de rotura: (a) malha S&P; (b) malha levmin_8; (c) malha 0evmin; (d) malha Mapei	71
Figura 4.16 – Dinamómetro e ensaio de tração de varões BCR.....	74
Figura 4.17 – Amostras de varões com maxilas prontos a serem ensaiados	75
Figura 4.18 – Fabrico e ensaios de malhas à tração com amarras com Cola de Epoxi Multiaplicações Sikadur 31®	76
Figura 4.19 – Fabrico e resultados de malhas submetidas à tração com amarras de malha de vidro impregnada em resina poliéster.....	77
Figura 4.20 - Diagramas típicos força - deslocamento dos varões levmin_8_vidro e levmin_8_carbono	78
Figura 4.21 – Tipologias de rotura de varões levmin_8_vidro.....	81

Figura 4.22 – Tipologias de rotura de varões 1evmin_8_carbono.....	81
Figura 4.23 – Deslizamento dos varões 0evmin na maxila.....	82
Figura 5.1 – Detalhe da geometria dos provetes; (a) geometria do tijolo; (b) Proвете de alvenaria de tijolo (dimensões em metros).	86
Figura 5.2 – Configuração de carga a aplicar no provete de alvenaria rebocado (dimensões em metros).	86
Figura 5.3 – Corte transversal representativo da direção da compressão dos tijolos no ensaio da parede à flexão simples cujo plano de rotura é perpendicular às juntas horizontais.....	87
Figura 5.4 – Bobines preenchidas com fibra de carbono (esquerda) e fibra de vidro (direita) 89	
Figura 5.5 – (a) Pormenor das fibras de carbono à superfície no entrançado com rugosidade 1evmax_8; (b) Compósito com rugosidade 1evmin_8	92
Figura 5.6 – Processo de fabrico de malhas de reforço e pormenor das ligações dos varões nas duas direções	92
Figura 5.7 – Malhas de reforço a ser aplicadas nas paredes de alvenaria.....	93
Figura 5.8 – Construção das paredes: Controlo da regularidade plana e espessura de juntas .	94
Figura 5.9 – Fase final da construção das paredes: aplicação do chapisco.....	94
Figura 5.10 – Metodologia de aplicação das malhas de reforço	95
Figura 5.11 – Leis de carregamento.....	98
Figura 5.12 – Esquema representativo do esquema de ensaio de flexão nas paredes (dimensões em metros)	98
Figura 5.13 – Esquema de ensaio de flexão de paredes de alvenaria	99
Figura 5.14 – Diagramas força – deslocamento das paredes de referência submetidas a ensaio de flexão.....	100
Figura 5.15 – Padrão de fendilhação dos provetes de referência.....	101
Figura 5.16 – Modo de rotura típico das paredes de referência.....	101
Figura 5.17 - Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com malha S&P Armo L500	103
Figura 5.18 – Padrão de fendilhação das paredes com malha S&P Armo L500	103

Figura 5.19 – Modo de rotura típico das paredes reforçadas com malha S&P	104
Figura 5.20 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha S&P	106
Figura 5.21 – Correlação entre a rigidez e: (a) deformação; (b) força	107
Figura 5.22 – Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço levmin_8_carbono (a) totais; (b) válidos	108
Figura 5.23 - Padrão de fendilhação das paredes com malha levmin_8_carbono.....	109
Figura 5.24 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha levmin8_carbono ..	109
Figura 5.25 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha levmin_8_carbono	111
Figura 5.26 – Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força.....	111
Figura 5.27 – Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço Mapegrid G220.....	112
Figura 5.28 - Padrão de fendilhação das paredes com malha Mapei Mapegrid G220	113
Figura 5.29 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha Mapei	113
Figura 5.30 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha Mapei Mapegrid G220.....	114
Figura 5.31 - Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força.....	115
Figura 5.32 - Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço levmin_8_vidro.....	115
Figura 5.33 - Padrão de fendilhação das paredes com malha levmin_8_vidro	117
Figura 5.34 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha levmin8_vidro	117
Figura 5.35 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha levmin_8_vidro	118
Figura 5.36 - Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força.....	118
Figura 5.37 – Diagramas força – deslocamento de cada tipologia de parede: (a) típico; (b) esquemático	119
Figura 5.38 – Comparação da força máxima de início da fendilhação	120

Figura 5.39 – Comparação de rigidez entre as diferentes tipologias de parede.....	120
Figura 5.40 – Comparação dos modos de rotura típicos das paredes reforçadas.....	121
Figura 5.41 – Comparação do fator de ductilidade de cada tipo de malha.....	122
Figura 5.42 – Comparação da energia de dissipação.....	123
Figura 5.43 – Relação percentual da força de cada tipologia em relação a referência.....	124
Figura 5.44 – Relação percentual da rigidez de cada ciclo em relação à rigidez inicial.....	124
Figura 5.45 – Correlação entre a rigidez e: (a) deformação; (b) força.....	125
Figura 5.46 – Diagrama da extensão e tensão na secção da parede submetida à flexão (adaptado [23]).....	126
Figura 5.47 – Comparação dos resultados obtidos analítica e experimentalmente.....	131

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades dos tijolos [adaptado de [13]].....	10
Quadro 2.2 – Características dos tipos de tijolos [adaptado de [13]]	10
Quadro 2.3– Estruturas das fibras [adaptado de [5]]	22
Quadro 3.1 – Propriedades das resinas poliéster, viniléster e epóxicas (adaptado [32])	37
Quadro 3.2 – Resumo dos compósitos considerados	43
Quadro 3.3 - Análise visual das estruturas de entrançado	46
Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios à flexão e à compressão das argamassas utilizadas	54
Quadro 4.2 – Número de provetes ensaiados no estudo de aderência de varões	58
Quadro 4.3 – Número de provetes ensaiados nos ensaios de aderência de malhas.....	58
Quadro 4.4– Resultados das forças médias dos ensaios de aderência nos provetes cilíndricos	64
Quadro 4.5 – Resultados das forças médias dos ensaios de aderência das malhas	69
Quadro 4.6 – Comparação do desempenho de varões individuais e malhas.....	72
Quadro 4.7 – Tipologias de BCR analisadas à tração uniaxial	73
Quadro 4.8 – Apresentação dos resultados dos ensaios à tração dos varões.....	78
Quadro 4.9 – Resultados de rigidez obtidos através dos ensaios à tração.....	80
Quadro 5.1 – Definição das amostras a ser testadas.....	84
Quadro 5.2 – Diferentes relações de esbelteza de amostras ensaiadas à flexão simples.....	85
Quadro 5.3 – Resultados médios obtidos na parede de referência	100
Quadro 5.4 – Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha S&P Armo L500	105
Quadro 5.5 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes com malha S&P .	106

Quadro 5.6 - Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha levmin_8_carbono	108
Quadro 5.7 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes levmin_8_carbono	110
Quadro 5.8 - Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha Mapegrid G220	113
Quadro 5.9 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes com Mapegrid G220	114
Quadro 5.10 – Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha levmin_8_vidro	116
Quadro 5.11 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes levmin_8_vidro	117
Quadro 5.12 – Resultados obtidos em relação ao fator de ductilidade	122
Quadro 5.13 – Energia de dissipação calculada.....	123
Quadro 5.14 – Resultados analíticos e comparação com os resultados experimentais.....	131

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os sismos têm sido reconhecidos desde há muito tempo como um dos principais riscos naturais, pois têm a capacidade de causar estragos em grande escala num curto intervalo de tempo. Embora os sismos não possam ser evitados, o atual estado-da-arte em ciência e engenharia fornece novas ferramentas que podem ser utilizadas de modo a que através de uma ação prudente, a perda de vidas humanas e a ocorrência de severos danos materiais, bem como perturbações sociais e económicas resultantes de sismos, possam ser reduzidos.

Um tipo comum de construção em centros urbanos para edifícios consiste na estrutura de betão armado com paredes de alvenaria de enchimento, sem função estrutural. No entanto, estas paredes continuam a ser denominadas como não resistentes no sentido de que não fazem parte de um projeto de dimensionamento de estruturas, apenas a resistência adicional em causa possibilita a estrutura de exibir desempenhos mais seguros e interessantes [1-4]. Apesar disso, sob excitação sísmica, estas paredes de enchimento, para além de interagir com os pórticos envolventes resistentes, podem apresentar modos de colapso não desejáveis com consequências muitas das vezes graves quer a nível perda de material, quer a nível de segurança humana. Por outro lado, a sua presença tem-se revelado também favorável para o comportamento global dos edifícios, aumentando a rigidez e diminuindo a exigência em termos de deslocamentos horizontais sob ações sísmicas. Assim, e partindo do pressuposto que as paredes são fruto de necessidades básicas, assume-se um ponto fundamental usufruir benefícios a nível de comportamento à ação de um sismo. Para isso, é necessário dotar as paredes de enchimento de modo que sob carregamento no plano ou fora do plano, respondam com comportamentos adequados garantindo assim condições mínimas de estabilidade [1-4].

É natural que larga porção do edificado em Portugal necessite de ser alvo de medidas preventivas (reforço), especialmente sob ações fora do plano, uma vez que as paredes construídas não foram construídas com o detalhe adequado. O potencial do reforço pode ir para além das melhorias a nível das paredes (melhor capacidade de deformação, roturas mais

dúcteis), uma vez que o seu reforço pode implicar uma melhoria das características sísmicas da estrutura global.

As técnicas de reforço podem ser diversas, ainda que tenha existido uma evolução no que se refere aos métodos e materiais usados. Por exemplo, a injeção de argamassa, a inserção de aço de reforço, pré-esforço e encamisamento de elementos na construção têm sido repensados, uma vez que para além de adicionarem massa e rigidez considerável à estrutura levando a maiores cargas sísmicas, também exigem mão-de-obra especializada e muitas das vezes perturbam o funcionamento normal do edifício. Em contrapartida, a utilização de materiais compósitos com base em fibras de carbono ou vidro (em literatura inglesa designados de CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer ou GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer) é uma alternativa válida devido à sua pequena espessura, relação vantajosa força/peso, elevada rigidez e resistência e facilidade relativa de aplicação. No entanto, a aplicação destes materiais também possuem desvantagens, destacando-se como as mais importantes a delaminação dos materiais e o mau comportamento na presença de humidade e ao fogo [5, 6].

Na tentativa de encontrar novas e melhores soluções, a inovação/investigação assume um papel preponderante para encontrar novas ou readaptações das soluções existentes, com o intuito de desenvolver novos reforços para as paredes de alvenaria capazes de solucionar limitações anteriormente identificadas. Adaptações das soluções baseadas em fibras têxteis inseridas numa matriz de argamassa, técnica designada na literatura inglesa por Textile Reinforced Mortar (TRM), podem apresentar várias vantagens relativamente às técnicas mais comuns de aplicação dos materiais compósitos como sejam a colagem ou a inserção de laminados em roços [5]. No âmbito desta técnica de reforço, tem sido feito algum trabalho na Universidade do Minho para o desenvolvimento de novos materiais de reforço que possam ser inseridos na argamassa de reboco das paredes. Estes materiais são varões compósitos entrançados compostos por um estrutura de entrançado de poliéster e um núcleo de reforço composto por fibras de vidro, carbono ou basalto, através dos quais se pretende melhorar a resistência à tração das paredes e a capacidade de deformação, com desígnio de uma rotura dúctil [7-9].

Assim, pretende-se neste trabalho avaliar e otimizar a aplicação deste material compósito inovador na construção em forma de malhas a serem inseridas na argamassa de reboco de paredes de alvenaria, de modo a avaliar o comportamento das paredes reforçadas quando submetidas a carregamentos fora do plano que resultam da ocorrência de um sismo.

1.2 Objetivos

Sabendo que os regulamentos atuais não têm em conta o cumprimento de requisitos necessários para que as paredes alvenaria de enchimento, consideradas não estruturais, resistam a ações sísmicas, torna-se imperativo o desenvolvimento de técnicas que possam melhorar o desempenho deste tipo de paredes a ações perpendiculares ao plano que surgem durante a ocorrência de ações sísmicas. Em geral as paredes de enchimento apresentam-se bastante vulneráveis a ações no plano, mas a direção fora do plano apresenta-se mais problemática devido à possibilidade de colapso destas paredes para fora do plano e consequentes implicações na perda de vidas humanas. Assim, uma das áreas inovadoras da engenharia civil concentra-se na prevenção deste tipo de roturas, através da produção de soluções de reforço que neste trabalho se centra na técnica anteriormente mencionada de argamassa reforçada com malhas de fibras têxtil (TRM).

A presente dissertação surgiu na sequência de trabalhos desenvolvidos por Cunha (2012) [5] e Gómez (2012) [9] Genericamente, os objetivos deste trabalho consistem:

1. na definição dos reforços fibrosos para aplicação em paredes de alvenaria através: (1) da avaliação dos requisitos técnicos necessários para o dimensionamento de um reforço eficaz; (2) da criação de diferentes estruturas fibrosas com alteração da sua rugosidade, promovendo assim diferentes níveis de aderência;
2. otimização da aderência entre diferentes tipos de entrançado em varões individuais e em malhas, de modo a definir a estrutura de entrançado com melhor desempenho para ser aplicado em malhas de reforço;
3. no fabrico e avaliação do desempenho de diferentes malhas com base em varões de material compósito no reforço da alvenaria a ações de flexão.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento de novos materiais tem de passar necessariamente por uma fase de desenvolvimento e por fase de validação do desempenho, o que deve ser baseado em trabalho experimental. Assim, pretende-se alcançar os objetivos deste trabalho com base numa campanha experimental alargada desde a caracterização dos materiais de reforço até à validação do seu desempenho como material de reforço à flexão. O trabalho a desenvolver baseia-se nas fases seguintes: (1) Desenvolvimento de varões compósitos e malhas com diferentes estruturas de entrançado cujo núcleo de reforço é constituído por fibras de carbono;

(2) otimização e seleção da estrutura do entrançado (varão) com melhor desempenho em termos de aderência na argamassa de reboco. Este trabalho é efetuado com base numa campanha de ensaios de aderência em varões e malhas de reforço com a configuração mais aproximada da configuração utilizada em paredes; (3) desenvolvimento de varões compósitos com a estrutura de entrançado otimizada e com o núcleo de reforço constituído por fibras de vidro e de carbono. Dimensionamento e produção das malhas de reforço com base nas características mecânicas das malhas comerciais selecionadas; (4) caracterização experimental dos materiais de reforço através de ensaios de tração uniaxial (varões e malhas); (5) avaliação do desempenho das malhas com os varões otimizados como reforço de alvenaria de enchimento à flexão com base num conjunto de ensaios de flexão simples em paredes de alvenaria reforçada; (6) avaliação dos resultados experimentais e comparação do desempenho em termos de resistência, capacidade de deformação e modos de rotura entre as malhas desenvolvidas e as malhas comerciais.

1.4 Organização do trabalho

Para a apresentação do trabalho efetuado no âmbito desta dissertação, considerou-se relevante dividir a dissertação em 6 principais capítulos em que o primeiro capítulo se trata do enquadramento do trabalho, bem como os principais objetivos desta dissertação.

No segundo capítulo é apresentado uma revisão dos principais conceitos e temáticas relacionados com o trabalho a desenvolver, nomeadamente o estudo sobre o comportamento fora do plano de paredes de alvenaria e avaliação de técnicas de reforço.

No terceiro capítulo procede-se à seleção dos materiais fibrosos utilizados na produção de varões compósitos (em literatura inglesa designam-se como Braided Composites Rods (BRC)), bem como a descrição de todo o procedimento da produção do BCR.

O quarto capítulo apresenta a campanha experimental desenvolvida no âmbito da caracterização dos varões BCR e das malhas constituídas pelos mesmos. Este capítulo divide-se em dois tipos de caracterização, nomeadamente (1) caracterização da aderência de varões e malhas e (2) a caracterização dos varões e malhas submetidos à tração uniaxial. Além disso, é apresentado o conjunto de materiais envolvidos e sua caracterização, o procedimento considerado e a análise dos resultados obtidos em cada tipo de ensaios.

O quinto capítulo apresenta a campanha experimental desenvolvida no âmbito da caracterização de paredes de alvenaria reforçadas submetidas a carregamento fora do plano,

nomeadamente ensaios de flexão. Este capítulo descreve o conjunto de materiais utilizados e sua caracterização, o procedimento adotado, os resultados obtidos dos ensaios e sua análise detalhada. Neste capítulo é ainda utilizado um modelo analítico de previsão da resistência à flexão das paredes reforçadas

O último capítulo reúne as principais conclusões que a elaboração deste trabalho permitiu obter. Apresentam-se ainda algumas ideias e sugestões a reter para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

ESTADO DE ARTE

2.1 Generalidades das paredes de alvenaria

2.1.1 Características das paredes: materiais e tipologias

Uma parede é uma estrutura arquitetônica utilizada na construção civil que pode ter diferentes características dependentemente das suas funções. Assim, segundo o Eurocódigo 6 (EC6) [10], uma parede não estrutural é um elemento arquitetônico cuja função é essencialmente a divisão ou vedação dos espaços. Por outro lado, as paredes estruturais, para além das funções das paredes não estruturais, contribuem também para a resistência da estrutura global, e por isso são dimensionadas racionalmente para resistir a esforços atuantes [11].

As paredes podem ser compostas por diferentes materiais de diversas formas. Os materiais mais utilizados são tijolos, gesso (drywall), betão, pedra, barro ou algum outro elemento que permita exercer a funcionalidade pretendida.

A maior parte das paredes são de alvenaria não estrutural, constituídas por blocos ou tijolos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um conjunto rígido e coeso. Os elementos aglutinados podem ser naturais ou artificiais, sendo que os primeiros são os mais antigos e podem ser pedras irregulares ou regulares regularizadas adequadamente, enquanto que os artificiais podem ser cerâmicos, de betão ou outros [12-14]. Procurando novas soluções alternativas para os elementos de pedra natural, surgem os blocos artificiais numa primeira tentativa de imitação da pedra. A composição dos blocos era em função da localização geográfica e dos materiais localmente disponíveis. Surgiram também os blocos de argila cozidos ao sol, vulgarmente designados de adobe, característicos particularmente de zonas ricas em barro. Destinavam-se essencialmente a construções de pequeno porte, pois a resistência mecânica destes blocos é incomparavelmente inferior aos restantes blocos. Após o terramoto de 1755 apareceu uma construção muito típica que se designou de “construção pombalina” caracterizada pela existência de paredes resistentes espessas reforçadas por um esqueleto de madeira constituído por um conjunto de peças verticais, horizontais e inclinadas,

devidamente interligadas, formando as designadas “Cruzes de Sto André”. Entre estas peças de madeira colocava-se alvenaria de pedra ou de tijolo maciço argamassada. Para a execução das paredes interiores sem funções resistentes, existiam os tabiques de madeira [12-14].

Com a revolução industrial o desenvolvimento do processo foi vertiginoso conseguindo-se formas, dimensões, leveza e resistência dos elementos muito interessantes. Com o aparecimento do betão, surgiram os blocos de betão fabricados com inertes correntes, cuja principal desvantagem é possuírem fraca resistência térmica. Para colmatar esta desvantagem dos blocos de betão, e também para os tornar mais leves, surgiram os blocos de inertes leves. Estes inertes podem ser naturais (resultantes de rochas vulcânicas leves) ou artificiais (argila expandida ou cortiça mineralizada), sendo os segundos os mais utilizados. Existem também os blocos de grés que possuem uma elevada resistência mecânica e são menos porosos, mas por outro lado, são mais quebradiços e economicamente desinteressantes, por isso são muito pouco usados [12, 13].

Todavia, entre outros materiais utilizados nas paredes, existe o tijolo que é, hoje em dia, o material de eleição para as paredes de alvenaria executadas em Portugal. Com efeito, a evolução que se evidenciou em Portugal foi mais acentuada a partir da década de 90, e foi fruto de algumas mudanças que, para além de introduzir novos materiais e modificar os existentes, podem estar relacionadas com: o aligeiramento global das paredes; alterações tecnológicas no que diz respeito à filosofia da conceção e execução; a introdução de materiais com funções complementares; a introdução de acessórios/componentes complementares; a introdução de novos tipos de revestimento e a evolução/alteração de revestimentos tradicionais (características dos materiais e técnicas de aplicação) [15].

Estas alterações tiveram sempre subjacente a intenção de reduzir custos, de aumentar a produtividade e de melhorar o desempenho funcional das paredes de fachada, com particular preocupação no que diz respeito à resistência mecânica, resistência à ação da água e ao comportamento higrotérmico [15]. Assim sendo, as paredes de alvenaria de tijolo, em Portugal, sucederam-se às paredes de alvenaria de pedra espessas e muito pesadas. Na maior parte das situações estas paredes de pedra eram revestidas por rebocos espessos, porosos, de baixa rigidez e executados em várias camadas. A evolução que se pensa ter existido começa pelas paredes simples de tijolo maciço ou perfurado, espessas, com seguimento à implementação de paredes de pedra com pano interior de tijolo furado (parede-cortina [11]) e eventual caixa-de-ar, ou mesmo as paredes duplas de tijolo com um pano espesso ou

espessura média a reduzida (Figura 2.1). Nos anos 80, apareceram as paredes duplas de tijolo furado com isolamento térmico, preenchendo total ou parcialmente a caixa-de-ar, utilizadas com alguma frequência na construção. Embora não seja prática a aplicação de paredes simples, ultimamente estão a ressurgir associadas a novas técnicas de execução de paredes como é o caso das soluções de paredes simples espessas com isolamento térmico pelo exterior finalizadas com revestimento pouco espesso ou com painéis de proteção (Figura 2.1). Existem ainda outras soluções mais recentes e ainda pouco utilizadas no nosso país como por exemplo alvenarias resistentes de tijolo de furação vertical e alvenarias de tijolo armadas [12, 13].

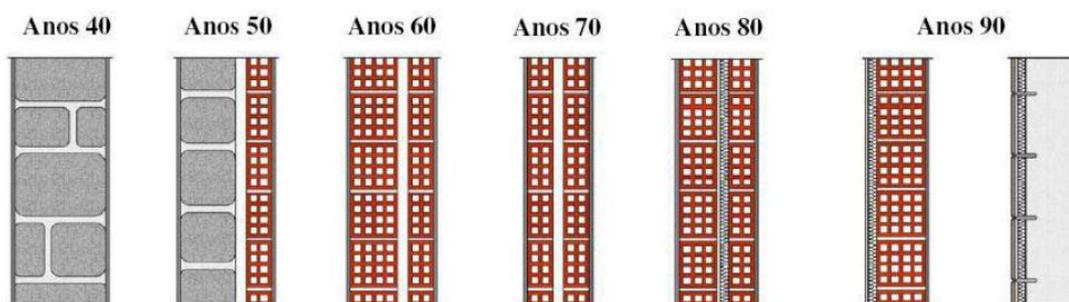


Figura 2.1 – Evolução das paredes de alvenaria [9]

No que diz respeito à geometria dos blocos, podem-se apresentar algumas tipologias, nas quais se pretende classificar os blocos em função das dimensões, percentagem de furação e sua direção, espessura e espaçamento das nervuras. Tal como o EC6 [10] apresenta, existe uma classificação que permite agrupar tipos de blocos, resultando os seguintes conjuntos:

Grupo 1: blocos maciços ou muito pouco perfuradas, Figura 2.2, primeira linha.

Grupos 2 e 3: perfurações verticais, em percentagem crescente, Figura 2.2, segunda linha.

Grupo 4: perfurações horizontais. Blocos mais baratos, mais leves, com melhores propriedades de isolamento e são os mais utilizados na alvenaria, Figura 2.2, terceira linha.

Apresenta-se também na Figura 2.3, as dimensões mais usuais dos blocos com furação horizontal.

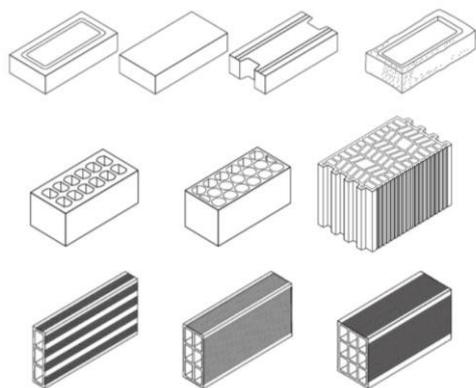


Figura 2.2 – Tipologias de tijolos mais usuais [9]

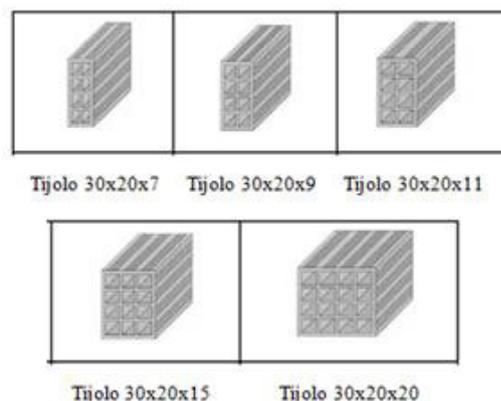


Figura 2.3 – Tipologias mais usuais de tijolos com furação horizontal [12, 13]

Nos Quadro 2.1 e Quadro 2.2 apresentam-se algumas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos em termos gerais e de acordo com as suas dimensões.

Quadro 2.1 - Propriedades dos tijolos [adaptado de [13]]

Características do material cerâmico	Valores
Massa Volúmica aparente (kg/m ³)	1800 – 2000
Porosidade aberta (%)	20 – 30
Absorção de água por imersão a frio (%)	9 – 13
Coefficiente de saturação	0,6 - 0,8
Absorção de água por capilaridade (g/dm ² .min)	11
Condutibilidade térmica (W/m ² K)	1,15
Coefficiente de absorção de radiação solar	0,65 – 0,8
Dilatância térmica linear (m/m.°C)	3,5 – 5,8 x 10 ⁻⁴
Expansão por humidade (mm/m)	0,9 – 1,7
Humidade em equilíbrio (20°C e 80%HR) (%)	0,11
Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	8300
Coefficiente de poisson	0,2

Quadro 2.2 – Características dos tipos de tijolos [adaptado de [13]]

Formato	Resistência mecânica por compressão (MPa)	Massa (kg)
22 × 11 × 7 (maciço)	17,0 – 48,0	2,5 – 3,5
30 × 20 × 7	3,7 – 7,0	3,0 – 5,0
30 × 20 × 9	3,0 – 5,7	3,5 – 5,5
30 × 20 × 11	2,8 – 5,2	4,0 – 6,0
30 × 20 × 15	2,5 – 4,9	5,0 – 7,0
30 × 22 × 20	1,9 – 3,9	7,0– 11,0

Além dos blocos, existem outros elementos constituintes da alvenaria que se devem caracterizar de modo a antever as propriedades e o comportamento do elemento de alvenaria, como por exemplo a argamassa. Assim, deve ser tido em consideração a argamassa utilizada, nomeadamente em termos da sua tipologia, das proporções de água e da sua classe de acordo com a sua resistência à compressão, afetando a espessura de aplicação na estrutura alvenaria.

2.1.2 Características mecânicas das paredes

De facto, para poder se caracterizar as paredes, é necessário avaliar um conjunto de parâmetros que resultam de ensaios destrutivos e não destrutivos, de acordo com a norma UNE EN 1052 (1999). Os primeiros implicam a remoção de amostras que muitas vezes deixam de ser representativas, pois a amostra muda o seu estado de tensão e as suas condições iniciais, porém os resultados são geralmente satisfatórios. Por outro lado, os ensaios não destrutivos, embora não exijam a remoção de uma amostra, necessitam de uma preparação prévia da superfície a ensaiar, pois os resultados podem ser facilmente distorcidos devido à presença de dano na estrutura. No entanto, estes ensaios são facilmente corroborados devido ao facto de não ser fácil calibrar o modelo de modo a obter resultados coerentes com os resultados dos ensaios destrutivos.

As características avaliadas, segundo os códigos FEMA 273 [16] e o EC6 [10] são a resistência ao corte, a resistência à flexão, módulo de elasticidade, módulo de distorção e fator de ductilidade, característico de paredes de alvenaria. Por outro lado, o efeito do dano da estrutura é considerado no cálculo através de uma série de fatores de redução aplicados às características das paredes: fator de redução de rigidez, fator redução da força, fator do módulo de elasticidade e fator de redução de deslocamento. Naturalmente que os resultados obtidos devem ser avaliados respeitando um número adequado de amostras de modo a obter análises significativas, tal como recomendam as normas associadas.

2.1.3 Causas das anomalias das paredes

Desde a Antiguidade a alvenaria vem sendo largamente utilizada como forma de construção em habitações, monumentos e templos religiosos. Todavia, as construções em alvenaria eram dimensionadas empiricamente e a conceção estrutural era intuitiva sem possuir qualquer projeto específico. No entanto, nos últimos dez anos, houve uma profunda mudança na maneira de construir: o betão evoluiu, as estruturas e tipologias são mais arrojadas e as

alvenarias mais precisas; o processo construtivo também não é o mesmo, nem o cálculo, nem as técnicas associadas. “Os edifícios de hoje são mais altos e esbeltos, a concepção privilegia grandes vãos, há menos pilares e as lajes apresentam espessuras reduzidas. O cálculo estrutural também mudou com o advento dos softwares, o que permitiu o refinamento e sofisticação dos projetos” [17].

No entanto, diante desta evolução tecnológica, surgiram problemas nas construções, quer a nível da qualidade dos materiais, quer a nível do processo de execução que devem ser estudados. Os projetistas ainda identificam as alvenarias em termos de massa para quantificar a sua ação na estrutura, mas não há grandes cuidados se as deformações regulamentares admissíveis para os elementos estruturais irão ou não causar anomalias nas paredes de enchimento. Por outro lado, mas praticamente com o mesmo pensamento, está o arquiteto, que para estas paredes pretende a menor espessura possível, de modo a ter a maior área nos compartimentos do edifício, não se preocupando com a sua esbelteza. Desta forma, sob a ótica da estabilidade, as paredes sem função estrutural não têm qualquer enquadramento nesta evolução tecnológica.

As conjunturas socioeconómicas de países em desenvolvimento fizeram com que as obras fossem conduzidas a velocidades cada vez maiores, com pouco rigor no controle dos materiais e dos serviços. De um modo geral, segundo Oliveira (2009) [17] as alterações mais importantes foram representadas pelo aumento significativo dos vãos de vigas e lajes, pelo aumento das aberturas nas alvenarias, pela substituição das alvenarias maciças por outros materiais, inclusive materiais leves e pela colocação de alvenarias diretamente sobre lajes sem estarem suportadas diretamente por vigas. Neste processo, onde se pretende compatibilizar dois subsistemas da construção, estrutura e alvenaria, surgem várias interferências, nomeadamente a nível das deformações instantâneas devido à deformação da estrutura e deformações a longo prazo em função da carga permanente, sob o ponto de vista da variação da humidade e da temperatura [18]. Por outro lado, sob ação sísmica ou de vento, a parede de alvenaria pode não interagir com os restantes elementos, provocando quedas e roturas desapropriadas. Nesta ordem de ideias, as anomalias têm causas diversas, dependendo de caso para caso. Desta forma, a geometria, os erros de projeto, erros de execução, ações ambientais, ações acidentais de origem humana, falhas na manutenção e alterações das condições inicialmente previstas são consideradas algumas das origens de diversas anomalias, tal como se pretende apresentar esquematicamente na Figura 2.4.

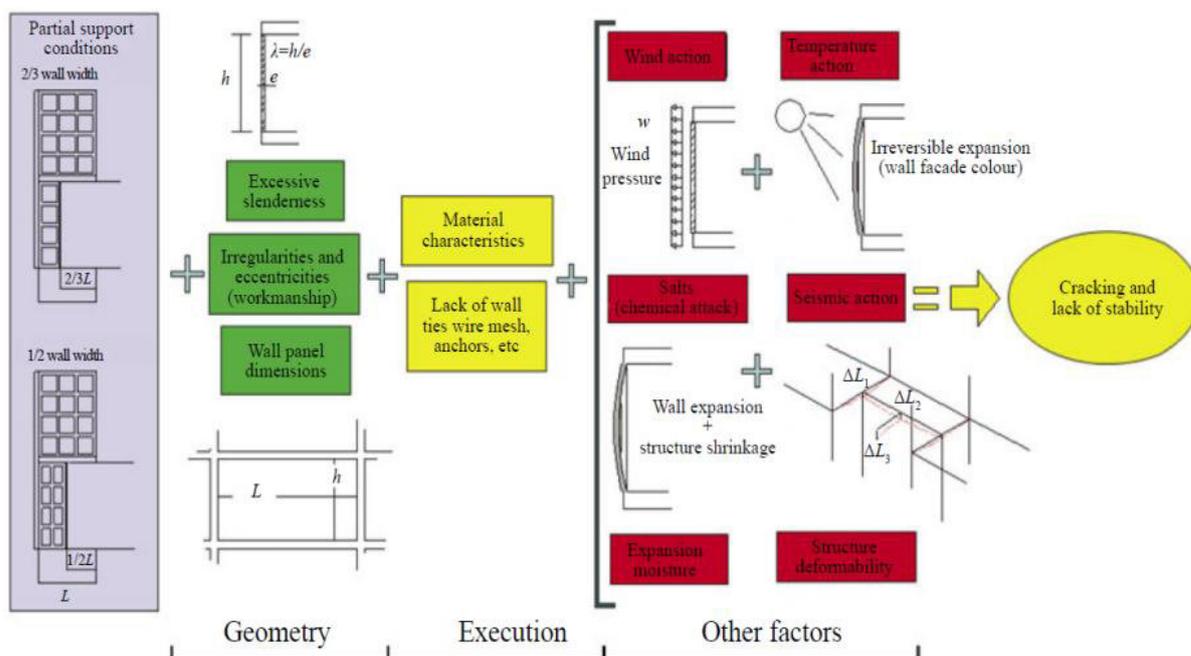


Figura 2.4 – Combinação de fatores que contribuem para a fendilhação e instabilidade [19]

Torna-se necessário racionalizar, melhorar as técnicas e práticas precedentes e, além disso, analisar os modelos e técnicas existentes no reforço na construção de alvenaria para melhorar a confiabilidade de novas soluções, a fim de evitar e prevenir as patologias em alvenaria e assegurar condições de segurança e conforto adequadas.

2.2 Comportamento das paredes de alvenaria à ação sísmica

2.2.1 Enquadramento

Sabendo que as paredes de enchimento, designadas como não estruturais, não são na maioria das vezes consideradas nos cálculos de dimensionamento de estruturas e na verificação de segurança das estruturas, interessa analisar o seu comportamento face à atuação de sismos e averiguar a sua importância nos edifícios sujeitos a cargas sísmicas.

Segundo Varum H., et al. (2011), Shing, P.B. et al. (2002), Dolsek, M., et al. (2008) e El-Dakhkhni, W.W., et al. (2006) [1-4], embora no comportamento das paredes sob cargas verticais o efeito da consideração das paredes no projeto não é muito significativo, a presença de painéis de alvenaria pode alterar positivamente o comportamento das estruturas de betão armado quando sujeitas a ações horizontais, desde que eventuais interações negativas entre o enchimento e a estrutura sejam evitadas. As paredes de enchimento podem modificar a rigidez no plano, e assim reduzir as grandes deformações da estrutura e, portanto, os esforços nos nós.

Para além disso, as paredes também podem influenciar a resistência máxima e a capacidade de dissipação de energia devido à rotura das mesmas, que liberta a estrutura global de parte dos efeitos do sismo. Em contrapartida, a presença destas pode induzir irregularidades na estrutura em planta e em altura que implicam respostas não esperadas quando sujeitas a cargas sísmicas.

Pelo facto dos edifícios apresentarem uma distribuição de rigidez diferente quer em planta como em altura, pode-se gerar mecanismos de colapso que mobilizam apenas alguns pisos com diferentes danos entre eles [1, 9]. A experiência em eventos sísmicos anteriores aponta para três tipos principais de problemas:

- Rotação da estrutura, cuja distribuição em planta é irregular, o que produz uma excentricidade da rigidez da estrutura que leva a um efeito de rotação. A rotação de toda a estrutura cria deformações muito grandes nos pilares mais distantes do centro de rotação.

- Short columns, pilares curtos, em que as paredes de enchimento não são contínuas em toda a altura do painel. Este fenómeno é muito típico para alguns tipos de janelas. Parte do painel próximo da abertura, sendo mais flexível, tende a deformar-se conjuntamente com os pilares maiores. Sendo muito curto e rígido, este elemento será mais suscetível à ocorrência de rotura por corte na faixa da abertura, uma vez que irá ser submetido a um elevado nível de força de corte naquela zona.

- Soft storey, piso vazado, cuja distribuição de rigidez ao longo da altura da estrutura é irregular. Muitos dos edifícios não possuem paredes de enchimento, normalmente no piso rés chão, por efeitos de estacionamento ou mesmo comerciais. Desta forma, a estrutura possui muito menos rigidez num piso muito localizado, e como agravante, acumula todas as forças dos restantes andares, uma vez que os pisos em questão normalmente são os mais inferiores. Por isso, este piso pode apresentar rotura por corte nas ligações existentes aos restantes pisos.

Estes efeitos de roturas locais ocorrem devido à abertura das paredes divisórias, pois representam descontinuidades imprevisíveis, e por isso, o comportamento destas estruturas deve ser melhor analisado. Estes problemas podem ser resolvidos por meio de um desenho apropriado de arquitetura de distribuição das paredes de enchimentos, de modo a evitar irregularidades.

Neste contexto, pretende-se perceber o comportamento dos painéis de enchimento confinados por pórticos de betão armado, quando são submetidos a carregamentos horizontais. Como é expectável, o mecanismo de rotura da alvenaria influencia a resposta da estrutura global após a sua ocorrência. [1, 20].

Para os casos em que a resistência dos pilares-viga seja suficiente de modo a evitar a sua rotura prematura, a rotura das paredes de alvenaria pode ocorrer no plano, para fora do plano e/ou nas ligações, Figura 2.5. A rotura no plano ocorre quando as forças atuantes excederem a resistência total da argamassa, que se materializa na rotura por tração com fendilhação na direção horizontal e diagonal do painel e deslizamento ao longo das juntas horizontais de argamassa. A rotura por flexão na base da parede é um exemplo de rotura para fora do plano e ocorre normalmente devido a ações dinâmicas como vento e sismos na direção perpendicular ao plano da parede. A falha nas ligações ocorre quando as cargas do plano provocam a rotação nos apoios das paredes ou existe o esmagamento localizado nos cantos comprimidos [1, 2, 5].

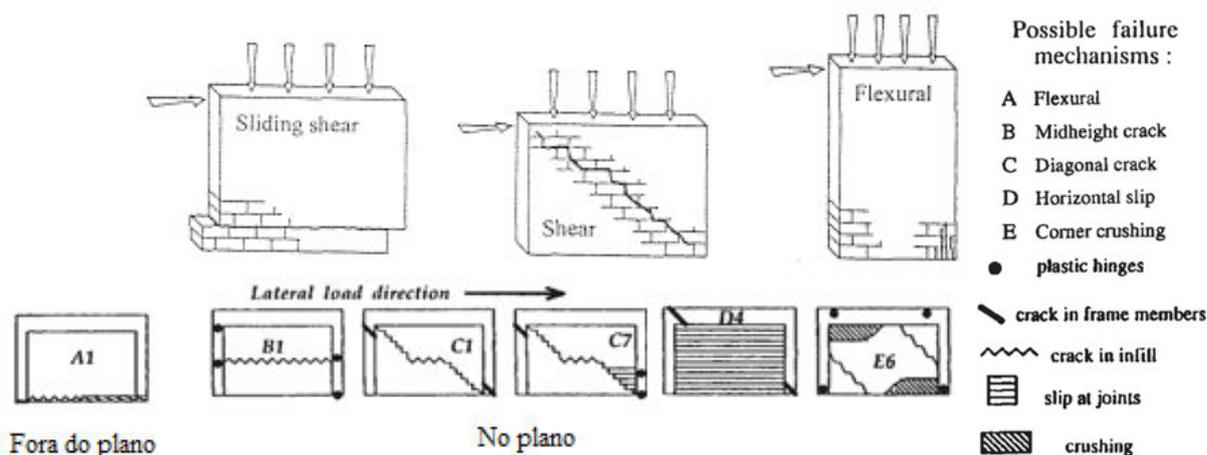


Figura 2.5 – Modos de colapso de paredes de alvenaria [adaptado de [2]]

Tendo em conta a temática desenvolvida nesta dissertação, será apenas abordado com mais rigor o comportamento fora do plano de paredes de alvenaria.

2.2.2 Comportamento fora do plano

2.2.2.1 Modos de rotura

Durante a atuação de forças horizontais, a formação de mecanismos para fora do plano é muito comum, cujo comportamento é caracterizado como frágil e por isso são roturas não desejáveis em função dos riscos para a segurança humana.

Os fatores que mais contribuem para o comportamento das paredes no que respeita a mecanismos para fora do plano, tem a ver com a conexão existente entre o painel e o pórtico de betão armado, a resistência à flexão do painel (também associado à sua esbelteza), e as condições de suporte da parede sobre a viga ou laje.

Possíveis causas que levaram a este nível de danos estão relacionados com a suscetibilidade das varandas para maiores acelerações verticais, esbelteza dos painéis da alvenaria, falta de sistemas de ancoragem adequados quer entre painéis caso existam mais que um, quer entre painéis e pórticos envolventes. Assim, naturalmente que, caso as ligações não se adequem aos carregamentos existentes no que respeita à largura do painel, conetores de ligação, condições de apoio e ângulos de canto, podem ocorrer mecanismos para fora do plano, caracterizados pela formação de fendas e conseqüente desconexão, ver Figura 2.6 e Figura 2.7, sendo este tipo de rotura não desejável à segurança humana [9, 17].



Figura 2.6 – Fendilhação e colapso de parte dos painéis exteriores [17]



Figura 2.7 – Total desconexão do painel exterior [17]

Para além do facto das paredes possuírem espessuras que por vezes não são as mais adequadas, a argamassa e o acabamento muitas vezes não é executado nas melhores condições. Assim, a formação de fendas com consequente degradação da ligação implica a rotação relativa da parede formando o mecanismo para fora do plano, tal como é perceptível na Figura 2.8 [17].

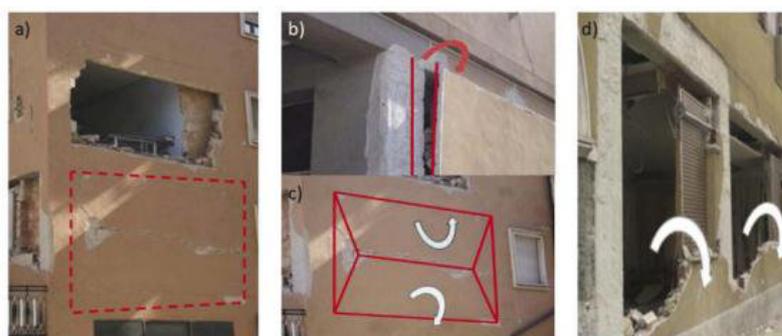


Figura 2.8 – a) Colapso da parede de enchimento para fora do plano; b) Rotação do painel para fora do plano; c) Formação de fenda horizontal e d) Colapso total da parede [17]

O comportamento para fora do plano de paredes de enchimento é normalmente caracterizado por um processo de fendilhação precoce nas juntas de argamassa, podendo estas fendas ser apenas horizontais na base ou a meia altura, ou nos casos mais graves numa configuração em X, ver Figura 2.9. À medida que as forças aumentam, os segmentos movem-se para fora do plano da parede, deslizando dos pilares e desenvolvendo arcos de flexão, até ocorrer o fracasso final do painel. Devido às propriedades de anisotropia das paredes de alvenaria, o dano ocorre primeiro no sentido em que tem menos resistência à flexão, isto é, ocorrendo a flexão paralelamente às juntas horizontais [9],

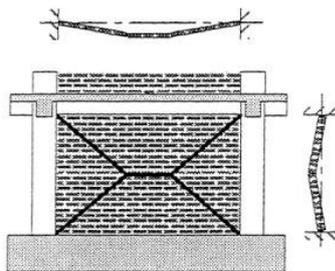


Figura 2.9 – Fendilhação típica e deslocamento para fora do plano [9]

Na sequência do estudo efetuado por Lourenço P. et al. (2011) [20], a análise do comportamento dos painéis fora do plano consistiu na aplicação de deslocamentos em ambos sentidos do painel submetido anteriormente ao carregamento no plano. Como resultado, o painel apresentou fendilhação ao longo da interface de ligação entre o tijolo e os elementos de betão, alterando de forma substancial as condições de apoio da alvenaria, tal como se apresenta na Figura 2.10.

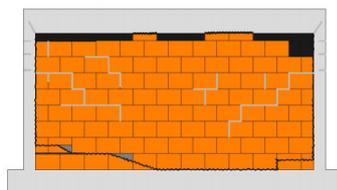


Figura 2.10 – Formação de fendas junto à base da parede [20]

Para além disso, a parte superior da parede apresentava uma grande percentagem de unidades de tijolos com colapso total ou parcial, resultante do facto da parede ter sido expulsa do plano do pórtico envolvente, funcionando como consola com eixo de rotação na base. Assim, ocorreu mecanismo de rotura por flexão, visto não existir uma boa ligação entre o painel e o pórtico, principalmente lateralmente uma vez que, com o aparecimento das fendas horizontais nos topos e na base, a parede ficou bastante vulnerável, Figura 2.11.

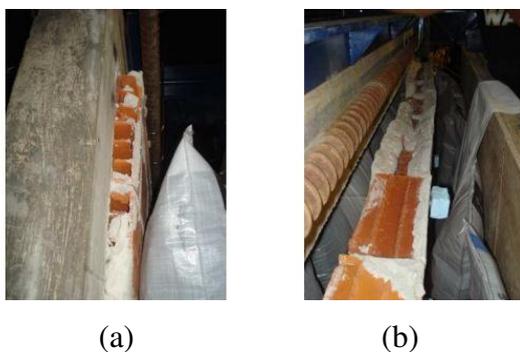


Figura 2.11 – (a) Movimento da parede para fora do plano entre o pilar e a parede; (b) Separação completa do painel de alvenaria do pórtico de betão armado [20]

Este facto é de igual forma reforçado por Varum H., et al. (2011), Shing, P.B. et al. (2002), [1, 2], que admite que tudo depende da resistência e rigidez do enchimento em interação com o pórtico envolvente, complementando também as características das juntas da parede de enchimento. Portanto, o efeito de confinamento que o pórtico oferece ao painel é muito importante, e para que seja possível concretizar este efeito é necessário que haja uma interação entre os elementos adequada. Pode reforçar-se este efeito de ligação através da implementação de conectores entre os painéis e o pórtico de betão armado, prevenindo a rotação do painel em relação ao pórtico e aumentando assim a rigidez e a resistência lateral.

2.2.2.2 Influência da geometria da parede

A resistência oferecida pelo mecanismo de flexão para fora do plano depende da altura e espessura da parede, traduzido pela esbelteza da parede. Quanto maior a sua espessura, maior é a resistência lateral que oferece.

Ao contrário do que acontece no comportamento no plano de paredes de alvenaria, o efeito das aberturas não possui um efeito tão alarmante.

2.2.2.3 Outros modos de colapso

Painéis de alvenaria não confinados podem sofrer dano para fora do plano devido à ausência de suportes estruturais, Figura 2.12. Conforme a direção da ação sísmica, pode ocorrer dano no plano ou fora do mesmo. A incorporação de elementos secundários, como é preconizado no ponto 4.3.6.4 do Eurocódigo 8 (EC8) [21], limita os danos sofridos e consequentemente, reduz o risco de perda de vidas humanas.



Figura 2.12 – Rotura de parte de alvenaria devido à falta de elementos estruturais [19]

2.3 Reforço de paredes de alvenaria

Muitas construções foram concebidas e construídas sem a consideração adequada da ação dos sismos, apresentando deficiências importantes do comportamento e em muitos casos não mostrando um comportamento adequado. Foi estabelecido como grande objetivo do programa nacional de redução da vulnerabilidade sísmica do edificado, a redução, de forma significativa, da vulnerabilidade do edificado nacional, através da sua adequada reabilitação sísmica, em particular as que foram construídas em períodos anteriores à atual regulamentação. Assim sendo, torna-se necessário avaliar a sua vulnerabilidade sísmica e, no caso de essa vulnerabilidade ser excessiva, definir o grau de intervenção estrutural de forma a reduzir, para níveis aceitáveis, a respetiva vulnerabilidade. A reabilitação sísmica poderá ser conseguida através da implementação de uma ou várias estratégias de intervenção a nível global dos edifícios, como por exemplo a modificação de componentes estruturais, a redução ou eliminação de irregularidades e o aumento global da resistência e/ou rigidez.

No que respeita aos elementos e dada a vulnerabilidade das paredes de enchimento a ações sísmicas, torna-se cada vez mais importante conhecer materiais e técnicas de reforço da construção que melhorem o comportamento das paredes em termos de resistência, rigidez e capacidade de deformação quando submetidas a carregamentos horizontais no plano e fora do plano.

Como medidas para melhorar o comportamento das paredes de enchimento no plano e para fora do plano em termos de rotura frágil, desagregação precoce de paredes de enchimento e controlo de fendilhação, o EC8 [20] recomenda a utilização de redes ligeiras no reboco, ancoradas devidamente em pelo menos uma das faces, a utilização de ligadores ao pórtico e armaduras de junta, ou a utilização de montantes e cintas ligadas ao pórtico.

Ainda que estas recomendações sejam direcionadas para a construção de paredes novas, é importante rever também as técnicas de reforço que de algum modo possam contribuir para o melhoramento das paredes de alvenaria existentes a ações de flexão e corte.

2.3.1 Materiais de reforço

Os materiais que se destacam atualmente no reforço de estruturas são os materiais fibrosos poliméricos (FRP) que potenciam de facto o comportamento da estrutura na qual é aplicado o material através de diferentes técnicas. Embora se trate de uma aplicação desenvolvida na construção civil a partir da década de 90, a sua utilização tem-se revelado bastante promissora, embora se desconheça com alguma profundidade o seu comportamento a longo prazo (durabilidade), em virtude do ainda curto período de vida útil das aplicações, quer em estruturas novas quer no âmbito da reabilitação de edifícios antigos.

No atual contexto, estes materiais apresentam em média boa resistência mecânica, ligeiramente superior à do aço, ainda que a resistência à corrosão em meios agressivos seja uma das principais vantagens que justifica o elevado grau de confiança aplicativa. Para além disso, são facilmente adaptáveis às diferentes formas de superfícies e possuem baixo peso, o que justifica a viabilidade e o interesse da sua utilização no reforço /reabilitação. No entanto, quando não são devidamente “preparados”, a fraca resistência ao fogo e aos raios UV coloca-os como soluções menos apetecíveis, quando comparados com os materiais tradicionais, para além do seu custo inicial e tão característico comportamento frágil (na rotura). Além disso, quando submetidos a carregamentos principalmente fora do plano podem apresentar delaminação do material de reforço, inviabilizando de imediato a sua função. Outra desvantagem da sua aplicação em alvenarias de pedra, não muito díspar com o que sucede com os materiais correntes, tem a ver com a qualidade de execução dos trabalhos, que não sendo alvo de um controlo rigoroso poderá revelar-se num solução ineficaz, motivada pela aderência mal conseguida entre o compósito e a superfície de suporte [5, 6].

A arquitetura das fibras pode-se agrupar em quatro estruturas básicas, nomeadamente as malhas, os tecidos, os entrançados e os não tecidos. Estas diferentes estruturas podem ser seleccionadas em função dos requisitos idealizados para a aplicação pretendida de modo a oferecer um desempenho adequado. Para além disso, as estruturas fibrosas podem ser classificadas em estrutura planar (2D), estrutura tridimensional (3D), estrutura orientada direccionalmente (DOS) e estruturas híbridas. Relativamente às estruturas orientadas direccionalmente, estas assumem orientações preferenciais de modo a possuírem melhor desempenho mecânico em determinadas direções. Assim sendo podem dar origem estruturas mono-, bi-, tri- e multiaxiais tendo em conta o número de direções em que as fibras estão inseridas (Quadro 2.3) [5].

Quadro 2.3– Estruturas das fibras [adaptado de [5]]

Estrutura monoaxial	Estrutura biaxial	Estrutura triaxial	Estrutura multiaxial
	+	*	
Reforço na teia (90°)	Reforço na teia e na trama (0° e 90°)	Reforço na teia e nas diagonais	
←	X		Reforço na teia, trama e diagonais
Reforço na trama (0°)	Reforço diagonal (-45°, +45°)	Reforço na trama e nas diagonais	

2.3.1.1 Fibras e malhas de aço

No que diz respeito ao estudo das fibras de aço, pode-se referir que, comparando com outros métodos, consiste numa técnica economicamente favorável sob o ponto de vista da simplicidade de aplicação em grandes superfícies. Com base em investigações existentes [22], conclui-se que as fibras de aço podem ter problemas de aderência com os materiais relativamente a outras técnicas, mas caso isso não ocorra, existe um bom comportamento a nível de distribuição de cargas. Em comparação com paredes não reforçadas, as paredes reforçadas apresentam baixas deformações sujeitas a cargas elevadas, associadas a uma ótima capacidade resistente e uma rigidez elevada. Mesmo assim, as fibras de aço possuem resistência inferior às malhas de aço, sendo esta técnica das mais antigas, no entanto, com problemas associados à durabilidade ainda por esclarecer.

Em estudos anteriores [23], chegou-se à conclusão que as malhas de aço quando comparadas com malhas de fibras de propileno e fibras de vidro, apresentam maiores valores de força, mas não apresentam resultados tão favoráveis a nível de deformabilidade.

2.3.1.2 Materiais poliméricos (FRP)

A utilização de fibras poliméricas de reforço (por exemplo carbono ou vidro – CFRP e GFRP, respetivamente) tem sido muito explorada pelas suas características favoráveis na construção, como elevada resistência e rigidez, boa ductilidade associada à elevada capacidade de

deformabilidade, resistência à corrosão, baixo peso, fácil e rápida aplicação e potencial de durabilidade [24]. Para além das características mencionadas, alguns autores também abordam a vantagem da utilização das fibras no que diz respeito ao controlo de fendilhação, resistência às ações dinâmicas, de fadiga e de impacto [6, 24]. Apesar das vantagens de utilização referidas, também existem desvantagens, no que concerne por exemplo à utilização de agentes ligantes orgânicos (resinas) e ao destacamento precoce dos laminados. Para além disso, a aplicação das resinas nos varões FRP's torna o compósito sensível a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea. Por outro lado, existe alguma dificuldade em aplicar o material em superfícies molhadas ou em baixas temperaturas. O sucesso da aplicação do FRP pode ser inibido devido à possível existência de incompatibilidades da resina epóxi e do FRP com alguns materiais de substrato, devido principalmente às propriedades como a porosidade e irregularidades deste último [25, 26]. Uma solução possível para os problemas acima referidos seria a substituição de agentes ligantes orgânicos com os inorgânicos, por exemplo, à base de cimento. No entanto, eles não conseguem assegurar o uso eficiente das fibras contínuas, o que pode ser melhorado pela substituição das camadas de fibras contínuas FRP, por tecidos [25]. Para além das fibras de carbono e de vidro o basalto tem sido utilizado recentemente. Uma vez que as fibras são materiais com diâmetros muito reduzidos, podem-se dispor sobre o material compósito de diferentes formas, unidirecionais se colocadas apenas numa direção, bi ou multidirecionais se colocadas em duas ou várias direções.

As malhas poliméricas em comparação com malhas de aço, possuem uma capacidade de resistência inferior. Mesmo em proporções muito grandes de reforço, não se consegue aumentar a resistência à flexão da parede até níveis altos uma vez que esta sofre a rotura à compressão. No entanto, resultados observados [23] mostram que, embora as amostras rompam por compressão quando sujeitas à flexão, a tela de polipropileno é capaz de conter com segurança as paredes deformadas, sem existir rotura frágil.

O reforço à flexão de paredes reforçadas com materiais poliméricos pode ser elaborado através de diversas formas, sendo as técnicas mais utilizadas a colagem de mantas de fibras (vidro ou carbono) no exterior da estrutura (Externally Bonded Reinforcement - EBR) e a introdução de varões ou laminados de FRP em ranhuras feitas nos elementos estruturais (Near Surface Mounted – NSM). Estas técnicas, inicialmente aplicadas em estruturas de betão armado têm sido utilizadas em estruturas de alvenaria, de modo a melhorar a estrutura a esforços de flexão e corte, e nomeadamente sob carregamentos para fora do plano. A

fragilidade das paredes de enchimento explica-se pela fraca resistência da alvenaria à flexão e pela falta de ligação das paredes aos elementos estruturais (vigas e pilares). Para solucionar este problema, uma das formas é reforçar a alvenaria com elementos fibrosos por exemplo, para aumentar a resistência à tração ou então promover a ligação da parede aos elementos envolventes.

Relativamente à técnica EBR, é necessário preparar a superfície adequadamente (limpeza e colocação de primário), de modo a existir uma boa ligação na colagem dos tecidos e laminados de FRP. Esta técnica é relativamente fácil de aplicar, permitindo uma grande variabilidade de geometrias e dimensões de reforço, No entanto, os laminados estão menos protegidos relativamente à técnica NSM e por outro lado não possuem tão bom desempenho mecânico em termos de capacidade resistente e capacidade de deformação [27].

No que se refere à técnica NSM, os varões ou laminados são geralmente colocados nas juntas das paredes, aumentando assim a resistência à flexão. Esta técnica não implica preparação da superfície, preservando o seu aspeto natural da parede, o que não acontece com a técnica EBR. Para além disso, os varões ficam mais protegidos e são mais facilmente solidarizados a toda a estrutura uma vez que podem ser ancorados, ficando assim mais integrados na mesma, evitando assim a delaminação precoce do reforço [27].

O comportamento de uma parede de alvenaria de tijolo reforçada sob cargas cíclicas no plano foi analisado em que o estudo consistia na avaliação da eficiência do reforço de laminados de GFRP [28]. No estudo consideraram-se amostras com e sem reforço de modo a analisar a eficiência do reforço. O modelo sem reforço apresentou rotura por esmagamento, tendo surgido uma fenda horizontal com o comprimento total da parede junto à base (Figura 2.13 a)). Após este ensaio, reforçou-se o mesmo modelo, colando lâminas de GFRP na parede com recurso à resina epóxi (Figura 2.13 b)). Como se pode observar, o modelo reforçado apresenta rotura por movimento de corpo rígido (rocking) e esmagamento no canto inferior (Figura 2.13 c)). Com base nos resultados obtidos conclui-se que a resistência da parede reforçada duplicou relativamente à parede não reforçada e a energia de dissipação apresentou também um ligeiro aumento.

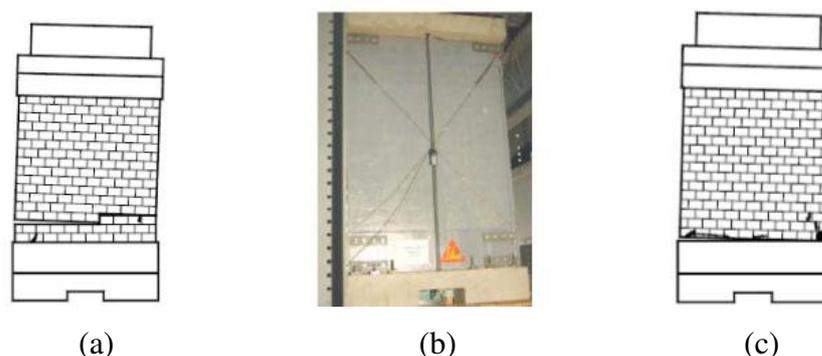


Figura 2.13 – Comportamento de uma parede de alvenaria a ações cíclicas no plano: (a) Modo de rotura da parede sem reforço; (b) Reforço aplicado ao modelo; (c) Modo de rotura da parede reforçada [28]

Em termos conclusivos, apresenta-se uma breve análise relativa à comparação das técnicas apresentadas no comportamento no plano e fora do plano: (1) No comportamento no plano, a aplicação de reforço à base de FRP é muito comum e eficaz. Com efeito, utilizando por exemplo CFRP (compósitos de fibra de carbono) ou GFRP (compósitos de fibra de vidro), aumenta-se a resistência lateral e a força residual, conferindo um comportamento dúctil evitando assim roturas frágeis. Relativamente aos métodos de aplicação, verifica-se que a técnica de NSM melhora o comportamento global de paredes de alvenaria de tijolo. (2) No que se refere ao comportamento fora do plano, o reforço baseado na aplicação de FRP, em termos gerais, permitem o aumento da resistência lateral e rigidez de paredes, quer aplicado sobre juntas quer distribuído superficialmente. Para além disso, foram detetadas melhorias no que diz respeito à capacidade de dissipação de energia e danos observados, principalmente no caso de CFRP e GFRP. Assim, a força resistente do sistema pode ser elevada, pois a rigidez e deformabilidade promovem o equilíbrio e um comportamento mais adequado. Por outro lado, quanto maior a largura da faixa de CFRP ou GFRP, maior a resistência, no entanto a rigidez pode ser limitada. Relativamente à quantidade de reforço, caso exista reforço dos dois lados do painel, a resistência pode aumentar até 40% em comparação com as paredes reforçadas apenas de um lado. Relativamente aos formatos de aplicação dos laminados, mencionam-se dois tipos de configuração, nomeadamente o alinhamento do laminado e a configuração em losango, sendo esta a técnica mais adequada a este tipo de estruturas.

2.3.2 Argamassa reforçada com malhas de fibra têxtil

A combinação de novos materiais e estruturas fibrosas orientadas estrategicamente vieram introduzir um novo conceito de reforço e reabilitação na construção em geral e em particular no reforço de paredes de alvenarias, utilizando a argamassa (reforçada) como material de reforço. Esta técnica é denominada na língua inglesa por Textile Reinforced Mortar (TRM). O desenvolvimento da técnica TRM começa com a utilização de fibras de alto desempenho, tais como fibra de vidro e fibras de carbono (anos 30 e anos 60, respetivamente). A sua aplicação na indústria da construção para reforço de elementos estruturais à base de cimento começa no início dos anos 80, e foi utilizada através de um lento processo de investigação até final dos anos 90.

A técnica consiste na aplicação de um material altamente resistente (material de reforço) relativamente a tensões de tração, embebido numa matriz de argamassa que atua como agente de ligação entre as fibras têxteis e o material a ser reforçado. A combinação de reforço em malha traduz-se numa otimização das propriedades de reforço relativamente às técnicas convencionais de reforço. Entre os materiais de reforço mais comuns estão as malhas de fibras de carbono, as malhas de fibras de vidro e as malhas híbridas.

Em relação a estudos desenvolvidos no âmbito da aplicação da técnica de reforço TRM, alguns autores [7, 8, 25, 29, 30] apresentam o comportamento à flexão e ao corte de paredes reforçadas em que variam o número de camadas de reforço (uma ou duas camadas), aplicadas em ambos os lados da parede, o tipo de reforço (estruturas de malha aberta que compreende fibras de vidro, carbono ou basalto e polipropileno ou poliéster), o tipo de agente de ligação (argamassas de diferentes composições) e o nível de força de compressão aplicada às amostras submetidas a carregamento no plano. Em alternativa à argamassa aplica-se como matriz a resina epoxi. Com base na resposta ao corte de paredes de alvenaria, submetidas a cargas cíclicas fora-de-plano ou no plano de carregamento (Figura 2.14), conclui-se que a técnica TRM proporciona um ganho substancial na resistência e principalmente na capacidade de deformação. Este ganho depende da resistência à tração da argamassa que determina se a rotura do revestimento irá ocorrer devido à rotura da fibra ou devido a outras razões, nomeadamente ao deslizamento da malha ou das fibras.

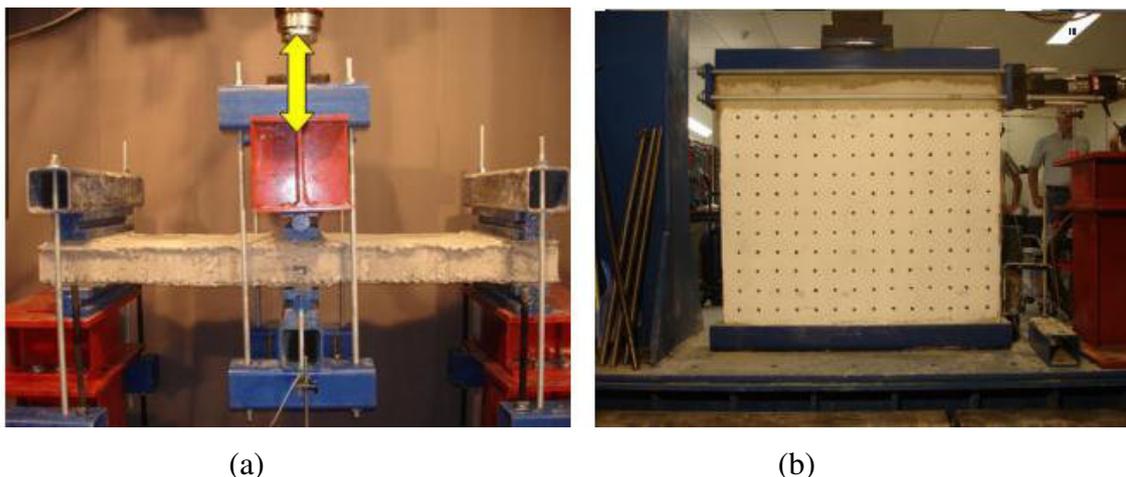


Figura 2.14 – Provetes de alvenaria reforçados com a técnica TRM: (a) – configuração do ensaio fora do plano, (b) configuração no plano [8]

Mesmo as configurações mais fracas de TRM ("low-tech" – têxteis combinados com baixa resistência), quando adequadamente colocadas resultam num aumento de cerca de 400% na força máxima e de 130% na deformação no que diz respeito a comportamento fora-do-plano em relação a paredes reforçadas com FRP (EBR) [8]. Para o caso de comportamento de paredes sob ações no plano, a técnica de TRM resulta numa eficácia positiva de cerca 65 a 70% em relação a camadas de FRP com configuração idêntica. Em termos de capacidade de deformação, embora a técnica TRM seja mais eficaz do que a técnica de FRP (EBR), a eficácia varia de acordo com a geometria da parede (entre 15-30% em paredes de corte até 350% em paredes do tipo de viga) [8]. Além disso, a resistência e capacidade de deformação geralmente aumentam com o número de camadas de reforço. Acredita-se que estes resultados dependem muito do tipo de argamassa e pode ser otimizado com a modificação adequada desta [25, 29, 30].

Relativamente aos modos de colapso das paredes com reforço TRM, estes dependem de fatores tais como: (1) a relação entre a capacidade de tração do reforço; (2) a resistência à compressão da alvenaria e (3) a força de ligação do reforço na parede e no interior de reforço.

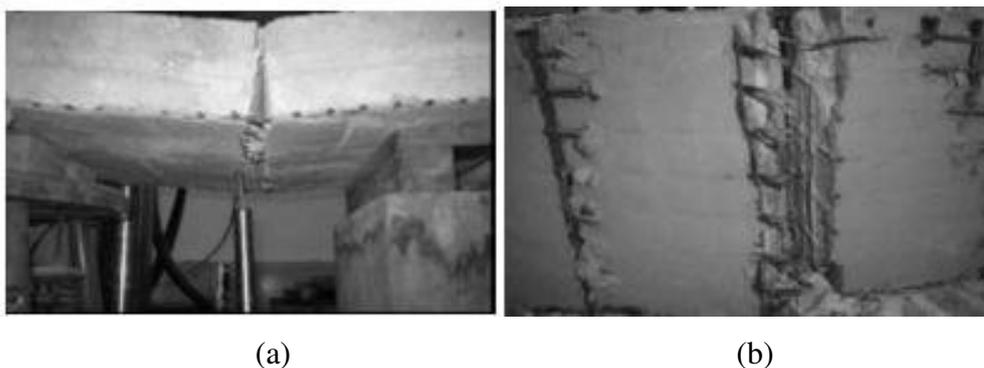


Figura 2.15 – (a) Abertura de fenda e esmagamento do tijolo; (b) Destacamento da matriz da argamassa. [7]

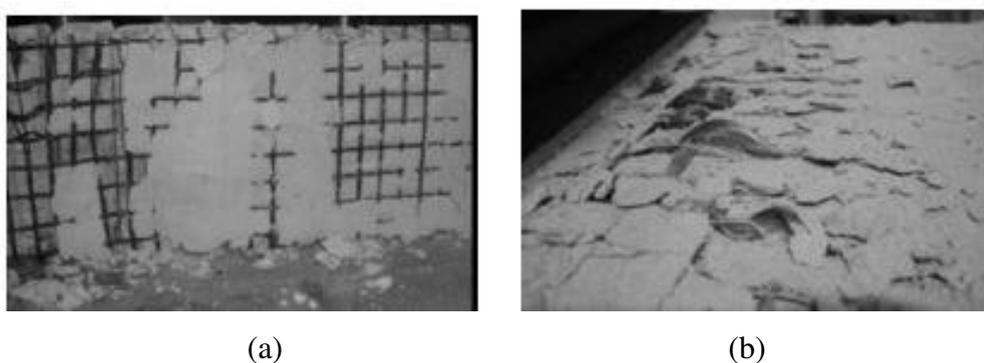


Figura 2.16 – (a) Deslizamento das fibras dentro da matriz de argamassa; (b) Colapso das fibras [7]

Os modos de rotura característicos das paredes submetidas à flexão pode ser o esmagamento dos tijolos (resistência à compressão da alvenaria é ultrapassada) quando a capacidade de tração do reforço é demasiado elevada (Figura 2.15 (a)). Isto ocorre devido à área da secção resistente à compressão diminuir (concentração de tensões) quando ocorre a rotura do reforço e da alvenaria à tração. Como uma das roturas mais desejáveis, pode-se mencionar a rotura à tração das fibras, uma vez a resistência da parede depende do esgotamento da capacidade resistente das fibras (Figura 2.15 (b)). Isto também implica uma melhor distribuição das tensões, que, por sua vez, se materializa no aparecimento de múltiplas fendas em vez do aparecimento de uma fenda muito localizada. Por outro lado, pode ocorrer o destacamento da matriz do reforço da parede que pode estar relacionado com a baixa resistência da argamassa aplicada e com uma preparação inadequada da superfície da parede (Figura 2.16 (a)). Isso implica um comportamento ineficaz do reforço uma vez que não se pode mobilizar a sua capacidade total. O deslizamento das fibras no interior da matriz é um fenómeno muito comum nas soluções TRM (Figura 2.16 (b)), sendo um modo de rotura indesejável dado que não se consegue aproveitar a capacidade do material de reforço [7, 8].

No trabalho apresentado por Rupika [23] a alvenaria é constituída por tijolos cerâmicos sólidos de dimensões 70 mm × 95 mm × 215 mm. As dimensões das paredes são 390 mm × 930 mm × 215 mm, correspondendo a uma esbelteza (relação entre a largura e a espessura) de 12,40. Como materiais de reforço foram aplicadas malhas de aço, malhas de fibras de vidro e malhas de fibra de propileno embebidas na argamassa. A malha de aço aplicada no reboco de paredes de alvenaria sujeitas a flexão conferiu melhor comportamento em termos de valores máximos da resistência, embora a deformação e ductilidade observada não tenha sido tão favorável, o que levou à rotura frágil da parede devido à baixa deformabilidade oferecida pelo reforço (Figura 2.17 (a)). Os laminados de polipropileno revelaram uma capacidade resistente mais baixa relativamente aos restantes tipos de reforço mas conduziram a uma maior capacidade de deformação das paredes relativamente às malhas de aço sendo possível o registo do comportamento após a resistência máxima até deformações consideráveis e sem uma degradação muito significativa de resistência (Figura 2.17 (b)). As malhas de fibra de vidro proporcionaram um elevado valor de resistência e uma deformação última também elevada. Para estas fibras houve casos em que a resistência aumentou após atingirem o primeiro pico para deformações sucessivamente crescentes, traduzindo-se num comportamento pós-pico muito dúctil com recuperação parcial ou mesmo total da capacidade resistente inicial da parede, apresentando em casos de proporção de reforço mais elevados valores resistentes superiores para a deformação última (Figura 2.17 (c)).

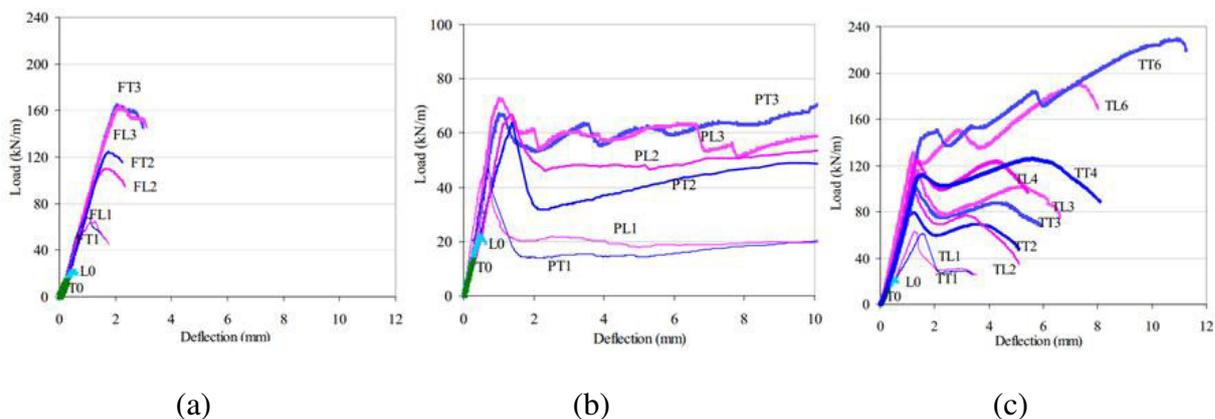


Figura 2.17 (a) – Comportamento das malhas de aço; (b) – Comportamento das laminados de propileno; (c) – Comportamento da malha de fibras de vidro [23]

2.3.2.1 Malhas de entrançados de fibra têxtil

Uma alternativa às malhas de fibras anteriormente mencionadas consistem em malhas de entrançados de fibra de têxtil (material vulgarmente designado por BCR - Braided Composite Rods), que têm vindo a ser desenvolvidas do Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho [5, 9].

O varão é constituído por entrançados de fibra têxtil consistem num cordão exterior em fibra de poliéster e num núcleo de reforço constituído por fibras de carbono ou fibra de vidro. A ideia é poder considerar para material de reforço as fibras de reforço de acordo com o efetuado por Codispoti et al. (2012) [31]. No entanto, devido à estrutura e comprimento das fibras o processo de introduzir este tipo de fibras é do foro complexo (Figura 2.18).



Figura 2.18 – Estrutura de entrançado de um varão composto

No processo de fabrico dos entrançados de fibra têxtil, é possível proceder à impregnação imediata da resina no interior do varão à medida que se fabrica o entrançado a envolver o núcleo resistente embora nem sempre se recorra a este método dependendo da finalidade do varão composto (Figura 2.18). Mesmo assim, o fabrico de compostos deve ter em consideração parâmetros tais como a geometria, o volume de produção, o tipo de reforço e matriz, o reforço e volumes relativos da matriz, equipamentos disponíveis e economia de mercado [32].

As fibras de vidro são as mais vulgarmente utilizadas como fibras de reforço, uma vez que apresentam boas características de processamento e são consideradas mais acessíveis economicamente. Há diferenças significativas entre os vários tipos de fibras de vidro disponíveis para fabricar materiais compostos, com vantagens e desvantagens, sendo necessário proceder à escolha mais adequada conforme a rigidez pretendida (módulo de elasticidade de cerca de 70 GPa e com resistência baixa a média, ou com um módulo de elasticidade de cerca de 85 GPa e com uma força resistente mais elevada) [32]. Um dos outros materiais constituintes do varão composto é a resina aplicada na superfície do entrançado, cuja escolha do tipo depende da durabilidade requerida, processo de fabrico, objetivo de aplicação e custos. Geralmente as resinas termoendurecíveis são utilizados, embora o

compósito depois de curado não possa ser dobrado pois caso isso aconteça, a resina acaba por perder as suas qualidades rígidas. Em contrapartida, a alternativa disponível é o uso correto das resinas termoplásticas, uma vez que os compósitos podem ser aquecidos e moldados para as formas variadas, garantindo que as propriedades sejam restabelecidas após o arrefecimento [32].

Relativamente à estrutura do entrançado é possível utilizar uma técnica de fabrico de baixo custo que permite a orientação dos multifilamentos têxteis num plano multiaxial, permitindo a produção de estruturas com nervuras com grande variedade de propriedades mecânicas. Estas propriedades podem ser melhoradas quando os núcleos das estruturas do entrançado são reforçados com fibras resistentes apropriadas. O princípio básico do entrançado é o mútuo cruzamento dos fios em direções diagonais. No caso de entrançados mais resistentes, existe para além destes dois movimentos helicoidais, um terceiro com direção axial do entrançado que possui a função de implementar um material fibroso resistente no seu interior, ver Figura 2.19.

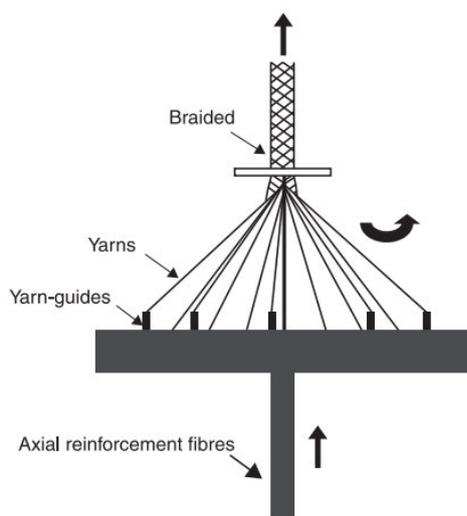


Figura 2.19 – Processo de execução do compósito entrançado com fibras de reforço [32]

Em termos de reforço de paredes de alvenaria, a ideia consiste em combinar entrançados em duas direções perpendiculares de modo a formarem malhas de reforço a serem combinadas com a argamassa de reboco. Os materiais de reforço são assim constituídos por uma malha fibrosa confinada por materiais têxteis, em pelo menos duas direções envolvida numa matriz que confere homogeneidade tanto quanto possível ao compósito, uma vez que esta propriedade depende do tipo e quantidade de fibra e sua orientação [32]. Para além disso, alguns fatores que afetam a eficácia da presente solução são a rigidez, o comprimento das fibras e o tamanho dos agregados na matriz de argamassa, uma vez que definem as

propriedades de ligação, ou seja, o vínculo entre os materiais e, assim, a capacidade de comportar-se como um compósito homogéneo. As fibras podem desenvolver a sua capacidade máxima devido à possibilidade existente na definição da disposição das fibras de acordo com a sua melhor rentabilidade.

No trabalho desenvolvido por Gómez (2012) [9], estudou-se a produção de malhas constituídas por varões compósitos entrançados cujo núcleo possuía fibras de vidro envolvidas por um entrançado de fios de poliéster, sendo a presente dissertação continuação desta temática. Foram também estudadas duas malhas comerciais de modo a serem comparadas com as malhas desenvolvidas, embora as características não fossem exatamente iguais. As malhas desenvolvidas variavam a densidade do material do núcleo de reforço e o espaçamento dos varões na malha. Estes foram colocados ortogonalmente em provetes de alvenaria e submetidos à flexão. Os resultados concluíram que à medida que se aumentava a quantidade de fibras de vidro, a capacidade resistente aumentava, enquanto que à medida que se aumentava a quantidade de poliéster através do aumento da densidade do número de varões, a capacidade de deformação inerente à boa capacidade de redistribuição de esforços também aumentava, ver Figura 2.20. Em termos de comparação com as malhas comerciais, considera-se que as malhas produzidas apresentaram um comportamento bastante satisfatório uma vez que as divergências apresentadas em termos de comportamento podem ser explicadas possivelmente pelas diferentes propriedades das malhas comerciais. Após uma fase linear elástica rígida característica da alvenaria não danificada sujeita à flexão, o reforço tem um papel importante uma vez que confere à estrutura uma rigidez menor mas não permite que a estrutura entre em rotura frágil. Assim, à medida que as fibras de vidro entram em rotura, existem perdas e recuperação da resistência mas numa gama de valores aceitável que oferece à estrutura uma rigidez e ductilidade importante. Por outro lado, quando as fibras de vidro não possuem mais capacidade resistente, o poliéster confere uma capacidade resistente com rigidez menor mas suficiente para que exista de facto uma rotura dúctil, daí que se conclui que o poliéster não pode ser negligenciado. Embora a presença de reforço do núcleo seja importante, quanto maior é a densidade do poliéster, maior a capacidade de dissipação de energia e distribuição de esforço entre o reforço e a alvenaria, o que está também diretamente ligado com a formação de múltiplas finas fendas que são desejadas neste tipo de rotura, a fim de prevenir roturas frágeis que colocam em causa a segurança humana num episódio sísmico.

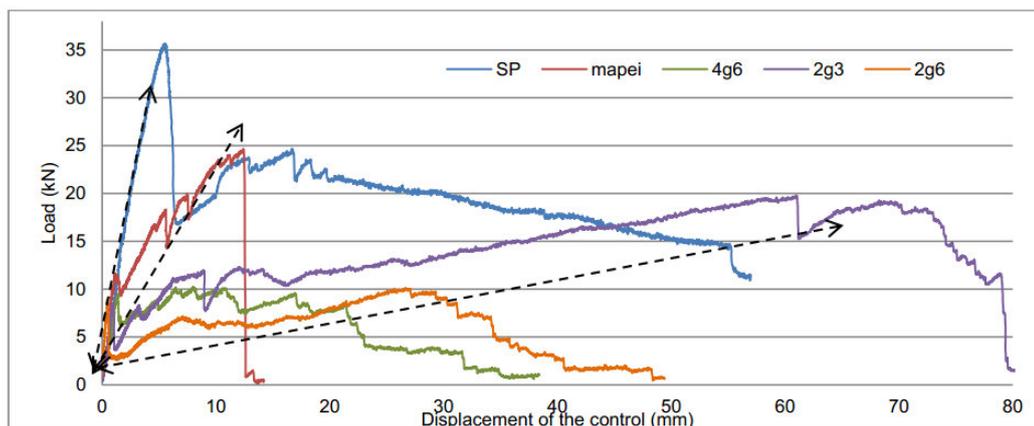


Figura 2.20 – Resultados obtidos entre soluções produzidas (4g6, 2g3 e 2g6) e soluções comerciais (SP e mapei) [9]

2.3.3 Outras Técnicas de reforço

2.3.3.1 Reforço com alvenaria armada

Uma das técnicas que tem sido recentemente explorada em alguns países trata-se da alvenaria armada, melhorando o desempenho estrutural das alvenarias quando submetidas a esforços de tração e corte, Figura 2.21. Para além de combater o processo de fendilhação, proporciona uma maior produtividade e racionalização da alvenaria.

Se se considerar as juntas horizontais da alvenaria como os únicos planos contínuos capazes de permitir armar a alvenaria de uma forma simples, a colocação de treliças de armadura conduzem a fiadas de material homogêneo com resistência à tração na direção horizontal. Portanto, o fenómeno de fissuração associado à deformação dos elementos estruturais em função da flexão no seu plano, pode ser corrigido através da inserção de armadura de junta na argamassa de assentamento dos blocos. Assim, a alvenaria possui ductilidade na direção horizontal, através da resistência à tração da argamassa das juntas, ver Figura 2.21 (a) e Figura 2.22 [33].

Por outro lado, se se utilizar armadura horizontal e vertical, o sistema torna-se mais complexo de concretizar uma vez que os blocos devem ter furos adequados à passagem das armaduras. Um dos problemas desta técnica é o controlo de qualidade do preenchimento do furo, bem como a respetiva aderência e proteção contra a corrosão das armaduras Figura 2.21 (b).

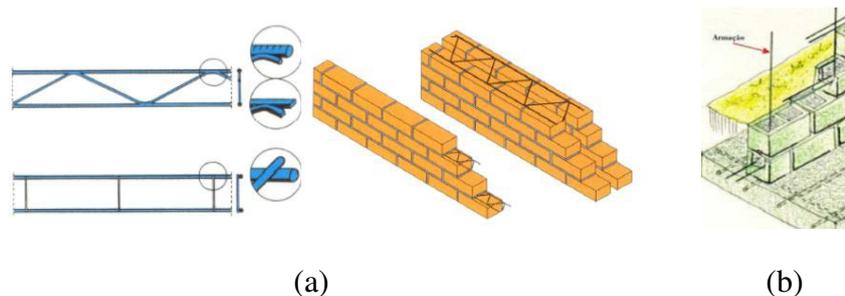


Figura 2.21 – Aplicação de (a) armadura de junta horizontal em paredes simples ou duplas e (b) armadura vertical [4, 33]

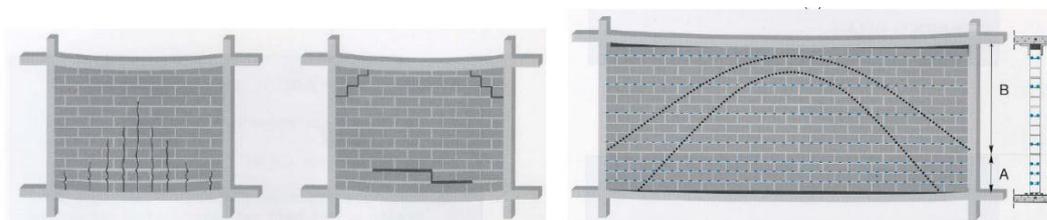


Figura 2.22 - Paredes de alvenaria sem função estrutural – fenómeno de fissuração e solução para evitar anomalias [adaptada de [34]]

Conforme Lourenço (2002) e Oliveira (2009) [17, 34], as vantagens desta técnica de reforço proposta, a princípio, são as seguintes: não conduz, praticamente, a alterações no processo de construção tradicional da alvenaria de vedação, considerando que a armadura de junta é introduzida na argamassa; obtém-se um material homogêneo, com características adequadas para limitar as patologias associadas à fendilhação generalizada, e com propriedades resistentes às ações referidas; o estudo pode auxiliar na minimização do processo de fissuração às quais as paredes de vedação estão sujeitas; diante das vantagens anteriores, decorre uma maior rapidez de execução e uma maior racionalidade da construção de forma que o construtor possa executar com qualidade e adequada produtividade.

CAPÍTULO III**MATERIAL DE REFORÇO****3.1 Introdução**

Tal como já se mencionou, o objetivo central deste trabalho consiste em otimizar soluções de reforço em paredes de alvenaria aplicando a técnica TRM que vem na sequência de trabalhos efetuados anteriormente [5, 6, 9]

Assim, neste capítulo pretende-se descrever os materiais e a técnica de reforço considerados no estudo do reforço de paredes de enchimento a ações para fora do plano.

3.2 Composição do material

O estudo do reforço de paredes de enchimento tem por base a consideração de malhas de reforço constituídas por entrançados de fibra têxtil reforçados (fibras de vidro ou carbono) BCR (braided composite rods) para reforço de paredes de alvenaria. Existem diferentes tipos de aplicação deste reforço, baseados em diferentes tipos de tecnologia de produção, sendo neste estudo aplicada a tecnologia de entrançamento simples, constituído por 3 tipos de materiais, tendo cada um funções distintas. Esta tecnologia consiste na combinação e entrelaçamento de fios que compõem a base do entrançado (16 círculos cinza escuro da Figura 3.1), envolvendo um núcleo central responsável pelo desempenho mecânico do mesmo (círculo central cinza claro da Figura 3.1). Por outro lado, existe a matriz resinosa que preenche os espaços vazios entre os materiais conferindo estabilidade e maior homogeneidade do compósito.

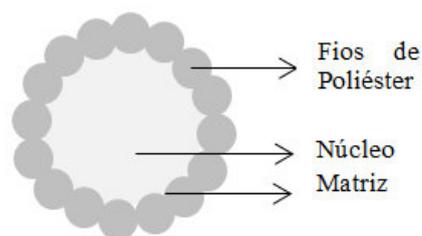


Figura 3.1 Esquema representativo da secção transversal do BCR

Neste estudo, de entre os vastos materiais fibrosos existentes, aplicam-se os multifilamentos de vidro e de carbono como constituintes do núcleo central do compósito, tendo sido selecionados em função das suas características físicas, bem como do seu desempenho mecânico, disponibilidade em laboratório e custo. Segundo Figueiro (2011) [32], as características destes materiais variam bastantes conforme o tipo de fibra em causa. Assim sendo, as propriedades que definem cada tipo de fibra podem ser módulo de elasticidade, tensão de rotura, massa linear e extensão.

O sucesso do material inovador em estudo depende em grande parte do desempenho do núcleo, sendo este elemento responsável da capacidade resistente, permitindo o melhoramento do comportamento das paredes de alvenaria. É necessário que o tipo de material aplicado no mesmo seja quimicamente estável e possua características adequadas em termos de resistência à tração e em termos de massa volúmica, uma vez que é no núcleo que reside maior percentagem de material. Por outro lado, é importante que o reforço utilizado não seja um fator adicional representativo na parede de alvenaria em termos de massa, dado que esta é uma variável importante nas forças de inércia aplicadas nas paredes quando sujeitas à ação sísmica. Para além disso, o custo do material é um dos fatores que merece alguma atenção, pelo que é crucial uma adequada gestão do valor económico aliada às capacidades mecânicas de cada tipo de fibra, de maneira a obter produtos que satisfaçam minimamente os requisitos necessários a preços competitivos.

Com efeito, foram selecionados dois tipos de material de reforço para o fabrico dos varões compósitos: (1) um multifilamento de carbono, possuindo uma massa linear de 1600 Tex; (2) um multifilamento de vidro E, com massa linear de 544 Tex. O material da estrutura do entrançado que envolve o núcleo trata-se de um multifilamento de alta tenacidade de poliéster com massa linear de 11 Tex. A seleção de um multifilamento em detrimento de um monofilamento, prende-se com o facto deste apresentar roturas mais imediatas à medida que é exposto à abrasão do desgaste mecânico, enquanto que o multifilamento de poliéster apresenta desgaste de forma contínua uma vez que é constituído por diversos filamentos, para além de ter a capacidade de se moldar mais adequadamente ao núcleo, funcionando assim, como um agente protetor. Este material ainda possui outras características interessantes do ponto vista económico e mecânico pois possui bastante flexibilidade o que permite um adequado manuseamento na produção, para além de ser um material quimicamente inerte.

A matriz que se utiliza neste tipo de compósitos pode ser diversa tal como acontece com os restantes constituintes, sendo as mais utilizadas as de poliéster, viniléster e epóxicas, com as respetivas características apresentadas no Quadro 3.1 [32].

Quadro 3.1 – Propriedades das resinas poliéster, viniléster e epóxicas (adaptado [32])

Resina	Tensão de rotura (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (kN/mm ²)	Extensão (%)
Poliéster	55–70	3.6–4.1	1.5–3.0
Viniléster	68–80	3.5	3.5–6.0
Epóxida	65–120	3.0–4.1	2.0–8.0

Embora as resinas não sejam comparáveis com as fibras em termos de valores de capacidade resistente, responsabilizando assim maioritariamente as fibras pelo desempenho mecânico do compósito, apresentam funções de estabilização do compósito assegurando a posição e configuração adequada aquando a aplicação do reforço nas paredes. Para além disso, a resina contribui também para a distribuição de cargas através do preenchimento de vazios do compósito, permitindo a proteção do mesmo, uma vez que as fibras que ocupam o núcleo podem facilmente ser perturbadas com risco de perderem suas capacidades mecânicas, caso não estejam devidamente protegidas. Outra questão prende-se com o facto do compósito ser considerado uma estrutura elástica, o que pode fazer com que numa fase inicial não entre em carga no mesmo instante da parede de alvenaria, o que é corrigida pela presença da resina que assegura que o alinhamento do material resistente já previamente tencionado no compósito de modo a ser evitado o ajuste das fibras numa fase inicial. Neste material, utiliza-se uma resina poliéster, tendo em conta a disponibilidade de material no laboratório, embora não seja o material mais interessante em termos económicos.

Para concluir, o material em estudo é um compósito constituído por um multifilamento de poliéster na estrutura do entrançado que envolve um núcleo de multifilamentos de carbono ou de vidro, numa matriz resinosa de poliéster.

3.3 Metodologia da produção dos varões BCR

A estrutura de entrançamento é modelada em função de dois aspetos importantes: (1) por um lado pretende-se que o núcleo possua um material resistente às ações de tração que se desenvolvem nas paredes de alvenaria quando sujeitas principalmente a esforços de flexão (caso de sismos e vento); (2) é importante que o compósito possua uma rugosidade adequada

de maneira a que este tenha condições de atuar eficazmente, sem que haja deslizamento do compósito no reboco da parede de alvenaria.

3.3.1 Técnica de entrançamento

O entrançamento foi efetuado num equipamento designado por entrançadeira vertical da marca TRENZ, com capacidade para 16 bobines apresentado na Figura 3.2 (a). Este equipamento está preparado para desenvolver um entrançado com 16 ou 8 bobines de modo a obter um resultado com menor número de defeitos. No compósito em questão, foi utilizado o número máximo de bobines, uma vez que com um menor número de bobines, os multifilamentos de poliéster não envolviam o diâmetro do núcleo completamente.

Antes de proceder à produção do entrançado é necessário realizar um processo denominado de bobinagem, que consiste em transferir o multifilamento de poliéster de um cone com cerca de 2 kg para as 16 bobinas adequadas ao equipamento em questão (Figura 3.2 (b)), para posteriormente serem colocados na entrançadeira.



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) Entrançadeira; (b) Bobine com multifilamento de poliéster de alta tenacidade

Os 16 fusos que possuem as bobines são colocados na entrançadeira formando dois grupos que se distinguem pelo sentido em que giram aquando o momento de entrelaçamento de fios no sentido transversal e longitudinal (Figura 3.2 (a)). Assim, metade dos fusos intercalados giram no sentido horário (números ímpares na Figura 3.3 (b)), enquanto que os restantes giram no sentido anti-horário (números pares da Figura 3.3 (b)), formando assim uma estrutura tubular.

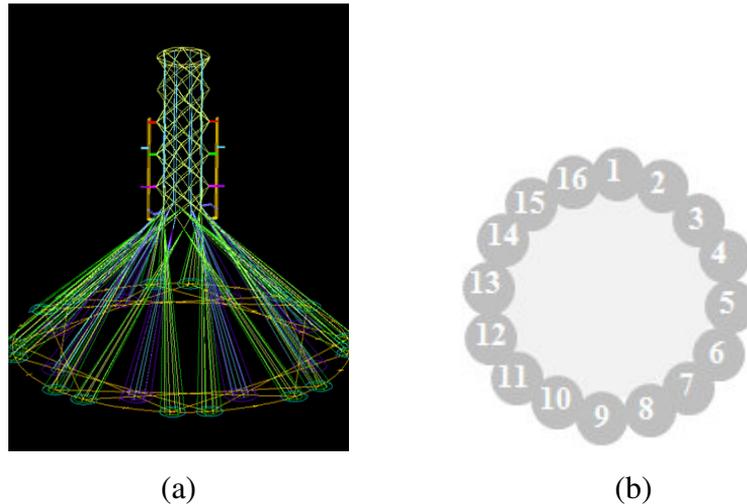


Figura 3.3 (a) – Esquema de entrançamento [5]; (b) Esquema da posição dos fusos

No processo de produção, existe a possibilidade de alterar a velocidade de tiragem do compósito, afetando principalmente o ângulo e o diâmetro do mesmo. Para isso, a entrançadeira possui um conjunto de roldanas diferentes em termos de dimensão que, combinadas entre si, permitem mudar a velocidade de tiragem da entrançadeira. Na Figura 3.4 é demonstrado um exemplo da combinação destas roldanas na entrançadeira. A combinação das roldanas nº 40, 38 e 25, para esta aplicação em particular, permitiu implementar velocidades de 1,04 m/min a 0,54 m/min.

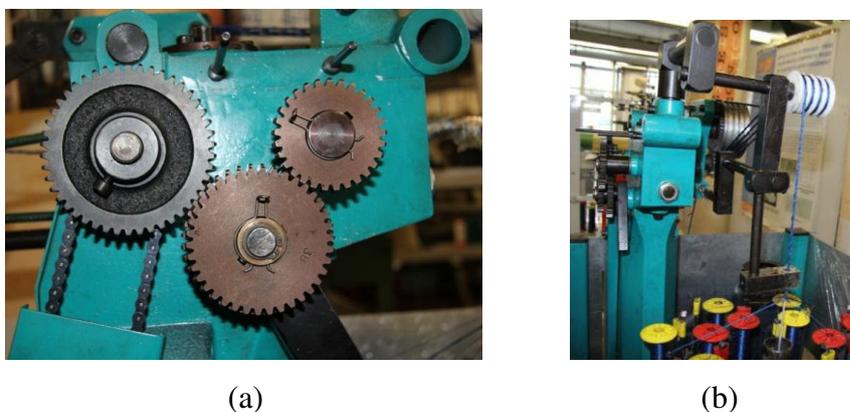


Figura 3.4 (a) Combinação de roldanas para velocidade máxima de tiragem;
(b) Demonstração do varão compósito a ser extraído da entrançadeira

Por consequência, para cada tipo de velocidade esta associado um conjunto de características, entre as quais se desta a elasticidade do material, uma vez que quanto maior for a velocidade de tiragem, menor é a elasticidade do produto, isto porque os fios de poliéster envolvem o núcleo com mais rapidez, o que não permite a envolvência tao radial como no caso da velocidade de tiragem menor. Este conceito traduz-se em termos de diâmetro e principalmente

em termos de ângulo de entrançamento. O primeiro é medido na direção transversal do compósito entre extremidades (Figura 3.5), podendo variar em função do diâmetro dos fios do entrançado, do diâmetro da estrutura axial e da velocidade de tiragem do entrançado. Por outro lado, o ângulo de entrançamento é medido entre o eixo longitudinal e a direção de inserção dos fios do entrançado, tal como se demonstra na Figura 3.5. Para casos de velocidade de tiragem alta, o ângulo de entrançamento é muito pequeno, o que faz com que os fios de poliéster estejam aproximadamente esticados ao contrário do que acontece com o caso da velocidade de tiragem ser baixa. Esta propriedade é muito importante uma vez que é através da definição destes aspetos que o compósito possui mais ou menos elasticidade quando estiver submetido a cargas. Assim, para a aplicação em causa, interessa ter uma elasticidade intermédia, pois por um lado é importante que a estrutura do entrançado não possua um ajuste do material numa fase inicial demasiadamente longo e, por outro lado, interessa que o entrançado entre em carga numa fase em que o núcleo do compósito já perdeu as suas capacidades resistentes, exibindo assim uma ductilidade associada a largas deformações sem ocorrer propriamente rotura total do compósito.

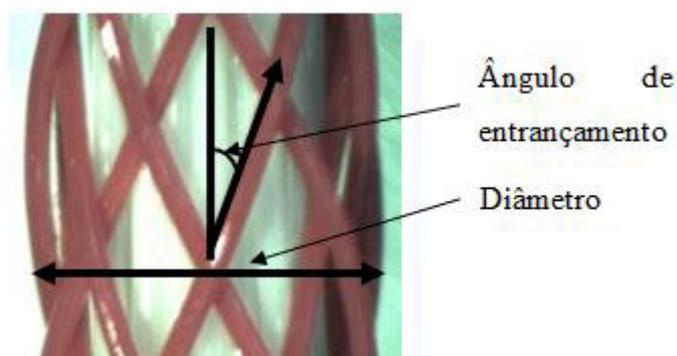


Figura 3.5 - Representação do ângulo de entrançamento e diâmetro de um entrançado [5]

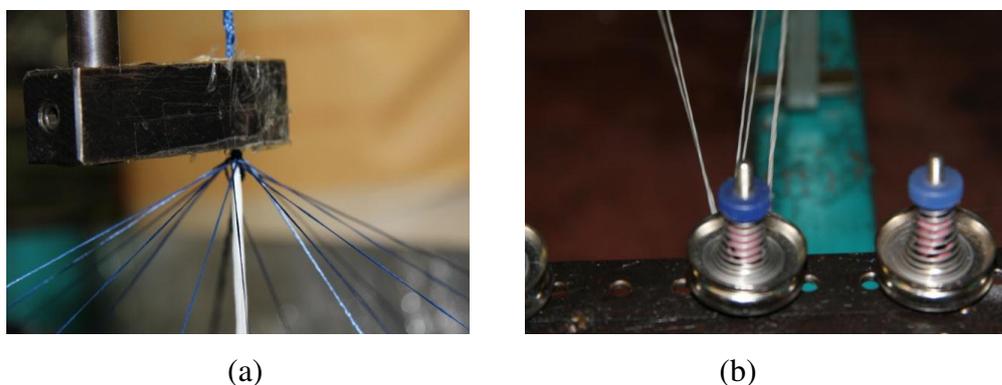


Figura 3.6 (a) Introdução da estrutura fibrosa no compósito; (b) Tensor de fios

Com o intuito de garantir que o compósito funciona no momento em que a parede começa a ser carregada, é importante que a estrutura axial, nomeadamente o núcleo central dotado de capacidades resistente esteja o mais alinhado possível de forma contínua no momento de produção do compósito (Figura 3.6 (a)). Para isso, optou-se pela colocação de tensiómetro (Figura 3.6 (b)), de modo a promover a mesma tensão em todo o material resistente do núcleo central. Com efeito, é possível através desta versatilidade garantir o máximo alinhamento dos multifilamentos no interior do compósito, embora seja impossível assegurar uma completa e igual tensão nos inúmeros fios que compõe o mesmo.

3.3.2 Rugosidade do varão compósito

Com o intuito de desenvolver um material que possua um desempenho eficaz, interessa dotá-lo de capacidades que de alguma forma permitem o seu máximo desempenho. A rugosidade do entrançado é um fator que merece particular atenção uma vez que uma adequada rugosidade beneficia a aderência entre o material de reforço e a argamassa, o que melhora o desempenho conjunto do reforço na parede de alvenaria.

Através de estudos desenvolvidos por Cunha (2012) [5], verifica-se que existem muitos fatores que contribuem para o melhoramento da aderência. A estrutura superficial do compósito possui um papel preponderante no desempenho do mesmo. Existem várias formas de alterar a estrutura superficial de modo a contribuir positiva ou negativamente para a aderência do material. Este estudo é um dos aspetos mais importantes dos trabalhos em desenvolvimento, pois é a partir da seleção da rugosidade mais adequada que se dimensiona a produção das malhas de reforço das paredes de alvenaria. As alterações consideradas têm como pressuposto a área de contacto entre o varão compósito e a argamassa, podendo assim existir maior ligação entre os materiais, maximizando o desempenho do reforço pois é mobilizada maior força para provocar o deslizamento do varão compósito no interior da argamassa. Com vista a concretizar o aumento da área de aderência, em vez de se considerar a constituição padrão do compósito apresentada na Figura 3.3 (b), substitui-se um ou dois fios por uma estrutura cujo diâmetro é superior aos fios de poliéster. A presença dessa estrutura também produzida através da técnica de entrançamento, provoca relevo na estrutura superficial do compósito que de alguma forma permite maior aderência com a argamassa.

No âmbito do estudo da aderência selecionaram-se entrançados constituídos por 8 e 16 fios de poliéster, considerados como as rugosidades do compósito final. A escolha deste tipo de

material deve-se ao facto de, para além de homogeneidade e uniformidade que o material apresenta, existirem propriedades adequadas do ponto de vista da flexibilidade e resistência ao desgaste. Foram selecionadas doze tipos de rugosidade, correspondentes a ângulos de entrançamento variáveis, velocidade de tiragem, diâmetro e rugosidade. Produziram-se também amostras sem rugosidade variando apenas a velocidade de tiragem para servir como amostra de controlo. Foram considerados três tipos de velocidade: (1) uma velocidade designada por mínima (0,54 m/min); (2) velocidade máxima (1,07 m/min) e (3) velocidade considerada como intermédia das velocidades apresentadas (0,8 m/min). Para cada tipo de velocidade foram consideradas quatro rugosidades compostas por diferentes padrões. Efetuaram-se rugosidades de entrançado simples com 8 e 16 fios, sendo estes filamentos colocados numa ou duas posições do entrançado. A posição dos fusos quando se pretende considerar duas estruturas na rugosidade deve ser adequada de maneira a que resulte num compósito sem defeitos na estrutura do entrançado, uma vez que um fuso gira numa direção e o outro tem que girar noutra direção de forma complementar.

O fabrico das rugosidades resulta de um processo semelhante ao próprio compósito pois utiliza-se a mesma técnica de entrançamento embora não possua estrutura axial (Figura 3.7 (a)). Para além disso, o número de fusos em funcionamento é diferente no caso da rugosidade com 8 fios, passando a existir apenas metade das bobines colocadas em posições adequadas de maneira a obter o entrançamento sem defeitos. Por isso, numa fase inicial procede-se ao fabrico da rugosidade com uma velocidade mínima de modo a obter um entrançado mais perfeito, podendo ser visível na Figura 3.7 (b) as bobines com 8 fios (cor verde) e 16 fios de poliéster (cor azul).



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) Fabrico e bobinagem da rugosidade; (b) Bobines com rugosidades utilizadas no compósito

A principal diferença entre a consideração de rugosidade com 8 e 16 fios é a área transversal associada às saliências provocadas pelas rugosidades.

No Quadro 3.2 são sumariadas as diferentes tipologias de compósito com a sua designação e explicação de acordo com a numeração dos fusos da Figura 3.8

Quadro 3.2 – Resumo dos compósitos considerados

Designação da amostra	Descrição da amostra	Velocidade (m/min)
0evmin	1 a 16 multifilamento de poliéster com 11 tex	0,54
0evmax		1,07
1evmax_8	1 -Entraçado constituído por 8 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
1evint_8		0,8
1evmin_8	2 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
2evmax_8	1 e 9 - Entraçado constituído por 8 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
2evint_8		0,8
2evmin_8	2 a 8 e 10 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
1evmax_16	1 -Entraçado constituído por 16 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
1evint_16		0,8
1evmin_16	2 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
2evmax_16	1 e 9 - Entraçado constituído por 16 multifilamentos de poliéster de 11 tex; 2 a 8 e 10 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
2evint_16		0,8
2evmin_16		0,54

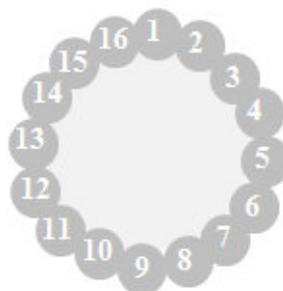


Figura 3.8 – Esquema representativo do compósito simples sem rugosidade

Tentou-se estimar aproximadamente a área transversal de varões de cada tipologia, embora seja muito difícil assegurar uma correta medição tendo em conta a sua forma longitudinal irregular. Para isso, recorreu-se a um paquímetro com precisão 0,05mm, medindo em várias posições da estrutura do entrançado (cerca de 15) de modo a obter uma média razoável. Na Figura 3.9 é possível perceber que a área dos varões com rugosidade composta por 16 fios apresenta valores mais elevados entre 10% a 40% em relação à rugosidade com 8 fios. Como será explorado no próximo capítulo, esta diferença pode influenciar o comportamento da aderência, afetando o modo de funcionamento dos mesmos quando são embebidos em argamassa e submetidos a tensões de tração axial.

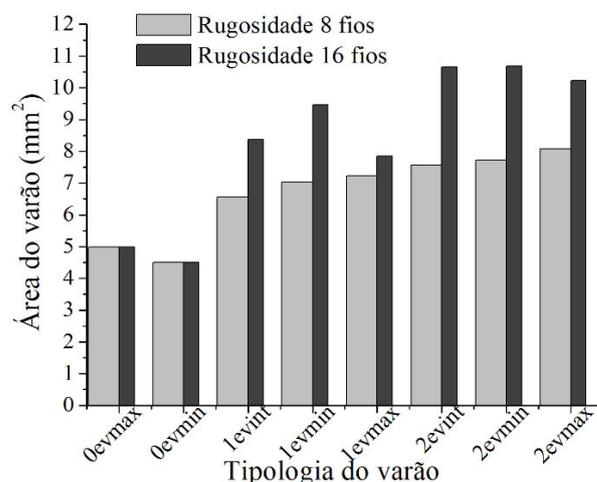


Figura 3.9 – Comparação da área média de cada tipologia de rugosidade.

3.3.3 Produção dos varões BCR

Sendo o material obtido pela entrançadeira completamente elástico (Figura 3.10 (a)), é necessário dotá-lo de capacidade de estabilidade e outras características através da introdução de uma matriz resinosa de poliéster. Assim, é desejável o máximo alinhamento do material de modo a que se reduza a elasticidade em excesso do material, garantindo que o núcleo entre em carga aproximadamente ao mesmo tempo que a estrutura entrançada. Para isso, tenciona-se o compósito através de aplicação de uma carga axial de tração de cerca de 100N (Figura 3.10 (b)). Numa última fase de preparação dos varões compósitos, é aplicada superficialmente através de um pincel resina poliéster de forma mais contínua e uniforme possível, finalizando com um processo de cura de cerca de 24 horas (Figura 3.10 (c)).

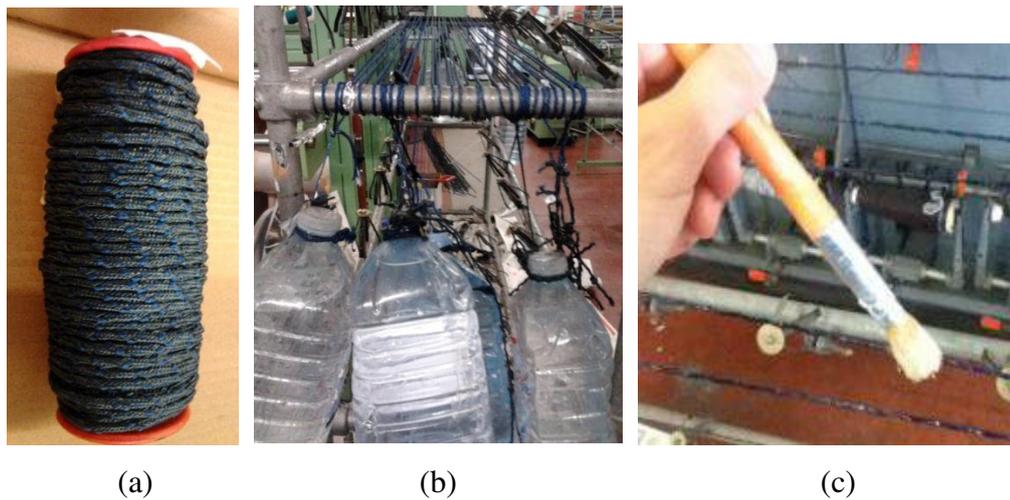
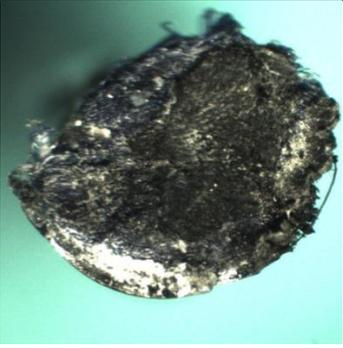
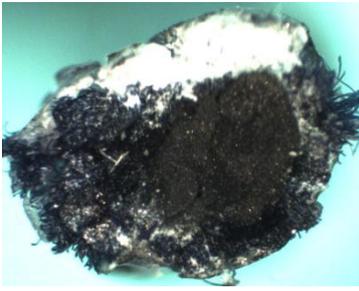
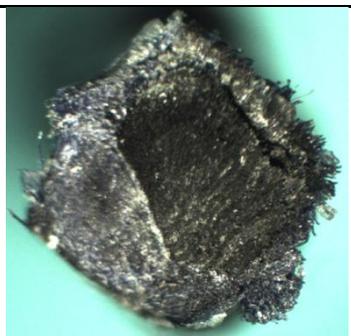
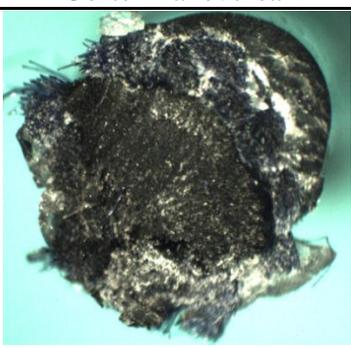
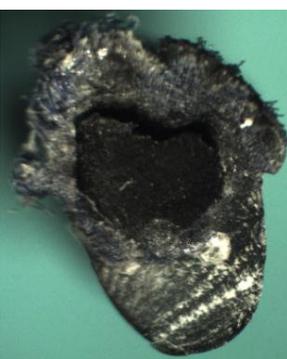
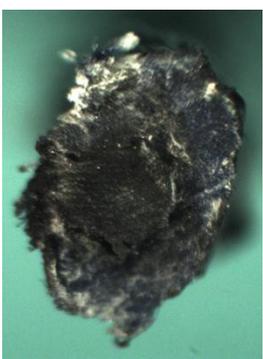


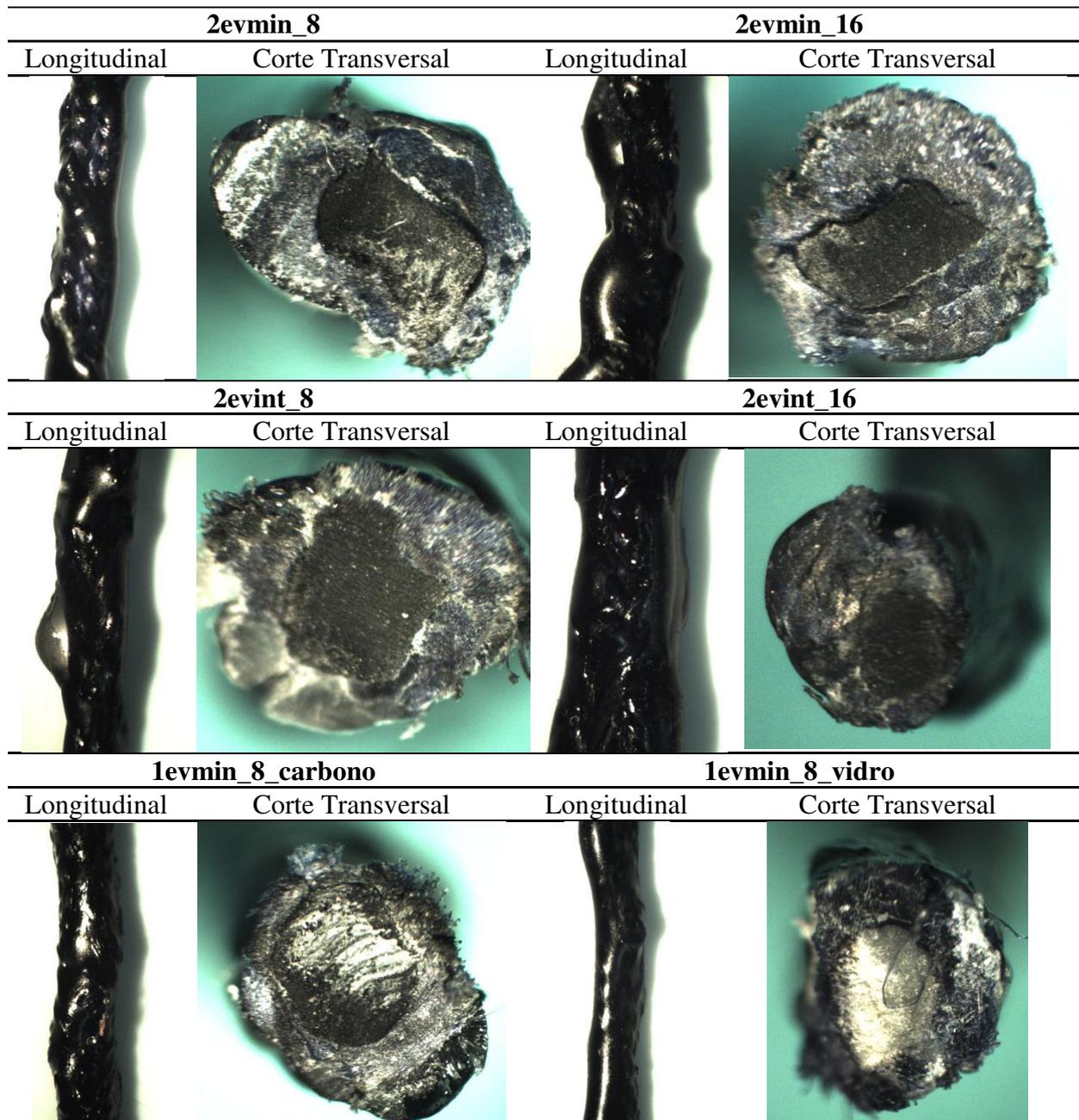
Figura 3.10 – (a) Bobine preenchida por BCR sem aplicação de resina; (b) – Tensionamento do material compósito; (c) – Aplicação superficial de resina com pincel

3.3.4 Análise visual dos varões BCR

Foi efetuado um estudo visual nos varões de cada tipologia de rugosidade, de maneira a que fosse possível observar a distribuição das fibras quer transversal, quer longitudinalmente, bem como as diferenças existentes entre as rugosidades. Para isso, procedeu-se ao corte transversal numa secção aleatória do varão com devidos cuidados para não danificar a estrutura, de modo a ser possível posicioná-lo verticalmente através de um material de suporte na direção da ótica do equipamento. Este equipamento trata-se de uma lupa estereoscópica com câmara cuja referência é Optikal STEREO ST-30-2LF. Relativamente à análise longitudinal, apenas foi possível fotografar a vista frontal do varão, pois é complicado através do corte longitudinal assegurar o verdadeiro alinhamento das fibras uma vez que estas perdem a sua estabilidade à medida que se corta longitudinalmente o varão com dimensões tão reduzidas. Esta análise foi efetuada nos varões com rugosidades utilizados nos ensaios de aderência (cujo núcleo é composto por 2 multifilamentos de carbono) e nos varões utilizados no reforço das paredes de enchimento, 1evmin_8_carbono (3 multifilamentos de carbono) e 1evmin_8_vidro (cujo núcleo é composto por 5 multifilamentos de vidro).

Quadro 3.3 - Análise visual das estruturas de entrançado

1evmax_8		1evmax_16	
Longitudinal	Corte Transversal	Longitudinal	Corte Transversal
			
1evmin_8		1evmin_16	
Longitudinal	Corte Transversal	Longitudinal	Corte Transversal
			
1evint_8		1evint_16	
Longitudinal	Corte Transversal	Longitudinal	Corte Transversal
			
2evmax_8		2evmax_16	
Longitudinal	Corte Transversal	Longitudinal	Corte Transversal
			



Com base na análise das fotografias apresentadas sugere-se as seguintes conclusões:

- As fotografias não são obtidas através da mesma escala, por isso, nem sempre comparar as fotografias pode ser um resultado verídico;
- A secção de corte é aleatória, o que implica a existência de fotografias cuja posição da rugosidade é diferente entre elas, o que pode equivocadamente criar ideias que não correspondem à realidade.

- As fotografias foram tiradas com luz, que reflete em alguns casos na resina do material compósito e cria zonas mais claras que também podem contribuir para algum engano na análise das fotografias.

- É possível reter que a configuração das fibras é diferente entre elas, o que significa que existe uma acomodação das fibras do núcleo resistente e do entrançado em determinadas posições de equilíbrio diferentes, e que se mantêm através da aplicação da resina superficial, permanecendo após a cura da resina que lhe atribui estabilidade da forma adquirida.

- Existem fotografias de algumas rugosidades tais como 1evmin_8, 1evint_8, 2evmax_8, 2evmin_8 e 2evmin_16, que comprovam a existência de vazios entre o núcleo resistente e a estrutura do entrançado. Por isso, o modo de aplicação da resina deve ser repensado de modo a evitar este tipo de fenómenos, uma vez que assim não existe uma boa ligação entre os materiais e a respetiva transferência de cargas nos momentos adequados. Além disso, este tipo de vazios promove o deslizamento interno das fibras resistentes, funcionando puramente como um material heterogéneo, o que não é um aspeto favorável deste tipo de varões.

- Tal como se pode comprovar pelas imagens apresentadas, não é verdadeiramente correto a consideração de uma área característica de cada tipologia de varão compósito, porque, para além do varão ser constituído por 2 tipos de materiais totalmente diferentes, não se consegue definir uma área uniforme ao longo do varão, de forma a estimar uma área aproximada homogeneizada do varão compósito. Isto deve-se ao facto dos multifilamentos dos materiais se moldarem e adquirirem formas próprias e à presença da rugosidade que se desenvolve através de um helicoidal a 3 dimensões, que dificilmente se consegue traduzir matematicamente. Por isso, considera-se mais correto a consideração de todos os gráficos na campanha experimental apresentados em força vs deslocamento.

- Outro aspeto visível nas fotografias apresentadas é a capacidade do entrançado envolver diferentes capacidades de fibras resistentes, mesmo que estas variem em quantidade até um determinado nível. Assim, pode-se verificar que a área do núcleo dos varões de fibras de carbono utilizados nas paredes não apresenta, na secção cortada, uma diferença muito significativa da área do núcleo dos varões utilizados nos ensaios de aderência, embora estes possuam menos um multifilamento de carbono que os restantes varões, o que comprava a capacidade de envolvimento e acomodação das fibras.

- Embora nas imagens longitudinais não seja perceptível, nos cortes transversais verifica-se em alguns casos a presença de uma ou duas rugosidades, bem como a diferença da sua

constituição por 8 ou 16 fios, embora não seja possível verificar em todos os casos uma vez que depende da secção de corte de cada tipologia.

- Para além disso, nas vistas longitudinais dos varões é identificada a diferença entre as velocidades de tiragem de cada tipologia, embora isso não seja muito perceptível devido à nitidez das fotos. Porém, percebe-se que à medida que a velocidade de tiragem aumenta, o ângulo dos fios de poliéster no entrançado medido a partir do eixo vertical diminui, o que implica o afastamento longitudinal entre os pontos salientes das rugosidades existentes em cada tipo de estrutura de entrançado.

3.4 Malhas comerciais

Para aplicação de reforço nas paredes de enchimento foram seleccionadas duas malhas comerciais na sequência de trabalhos efetuados anteriormente designadas por S&P: ARMO L 500 e MAPEI: Mapegrid G220.

A malha S&P: ARMO L 500 é constituída por dois materiais, fibras de carbono na direção principal e fibras de vidro na outra direção (Figura 3.11). As fibras de carbono conferem o papel resistente da malha, sendo orientadas na direção em que as fibras são mais solicitadas, no caso de flexão, na direção em que sofre maior deformação. Os elementos constituintes nesta direção são compostos por dois fios de fibra de carbono ligeiramente unidos por uma fibra de vidro muito fina enrolada em torno deles, enquanto que a direção transversal é constituída por elementos de fibra de vidro cuja densidade é muito baixa, possuindo o papel de estabilidade de malha. Os fios estão cobertos por elementos granulados com o objetivo de aumentar as ligações entre os vários constituintes da mesma.

Em termos de características físicas e mecânicas, a malha S&P ARMO L500 pode-se considerar como unidirecional composta por fibras de carbono cuja densidade é 200 g/m, com espaçamento entre elas de aproximadamente 25mm na direção principal. Para além disso, segundo ficha técnica, a malha possui uma resistência à flexão de 93,6 kN/m, para uma extensão de rotura de 1,75%.



Figura 3.11 – Malha comercial S&P: ARMO L 500

A malha comercial MAPEI: Mapegrid G220 é constituída por fibras de vidro resistentes em termos alcalinos o que faz com que a sua cor seja escura devido ao tratamento que obtém nesse sentido (Figura 3.12). Estes elementos são dispostos nas duas direções, possuindo dois fios por elemento unidos numa direção através de uma ligação aparentemente rígida, enquanto que noutra direção estão separados. Uma vez bidirecional, a densidade da malha é de 225g/m^2 , com espaçamentos entre as fibras de 25mm. Em termos mecânicos, segundo ficha técnica a resistência à flexão é de 45 kN/m com extensão associada à rotura menor ou igual a 3%. Normalmente deve-se aplicar esta malha com uma argamassa de alta ductilidade.

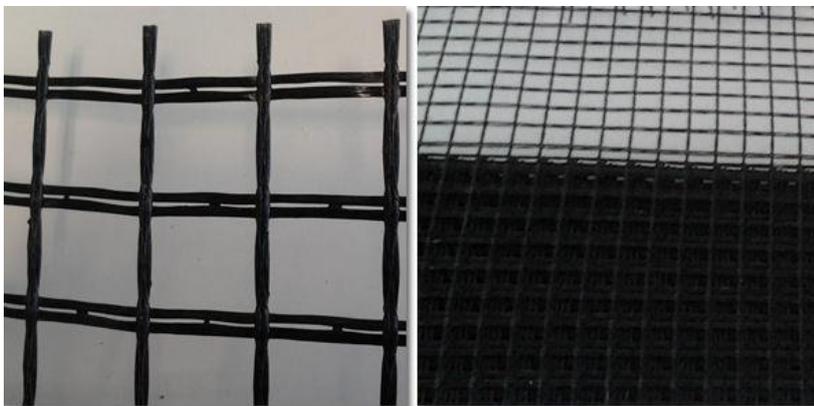


Figura 3.12 – Malha comercial MAPEI: Mapegrid G220

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE VARÕES BCR E MALHAS

4.1 Introdução

Sendo o objetivo do presente trabalho o desenvolvimento de um reforço embebido na argamassa de reboco para ser aplicado em paredes de enchimento, torna-se importante estabelecer uma relação entre as propriedades físicas dos entrançados e a aderência entre estes e a argamassa. Numa fase preliminar, interessa compreender o comportamento individual dos varões compósitos a ser utilizados em malhas de reforço de alvenaria. Com efeito, foi efetuada numa fase inicial uma campanha experimental na qual se estudou qual a influência das rugosidades na estrutura do entrançado, de forma a ser possível selecionar um tipo de rugosidade que apresentasse melhor desempenho com vista ao fabrico das malhas para reforço de alvenaria. Assim, foram efetuados ensaios de arrancamento (pull-out) em varões com diferentes rugosidades embebidos em provetes cilíndricos de argamassa. Para além disso, numa segunda fase, foi efetuada uma nova série de ensaios de aderência com uma argamassa diferente e com provetes de dimensões maiores, com a finalidade de se avaliar a influência destes parâmetros no desempenho da aderência dos varões compósitos.

Por outro lado, também foi efetuado um estudo da aderência em malhas com dimensões representativas da malha de reforço a aplicar nas paredes de enchimento. Para o efeito, efetuaram-se ensaios de arrancamento (pull-out) em malhas aplicadas no reboco de tijolos, constituídas por varões com a rugosidade selecionada e varões sem rugosidade, a fim de avaliar qual a influência desta propriedade no comportamento do material. Além disso, também foi estudada a aderência das malhas comerciais consideradas no reforço de paredes de enchimento.

Complementarmente foi efetuada uma campanha experimental de ensaios à tração de malhas e de varões, com o objetivo de caracterizar mecanicamente o material de reforço a esforços de tração, para os quais devem ter um comportamento adequado para funcionarem de forma efetiva como material de reforço.

4.2 Caracterização do comportamento da aderência

4.2.1 Materiais

Os materiais envolvidos no estudo de aderência são os varões compósitos BCR e respectivas malhas, argamassa de reboco e tijolos cerâmicos. Por um lado, o estudo apenas é efetuado em varões individuais embebidos em provetes cilíndricos de argamassa, sendo também definido um programa experimental para o estudo da aderência de malhas inseridas no reboco de provetes de alvenaria.

4.2.1.1 Varões BCR

Para se obter os varões necessários ao estudo de aderência, foi necessário proceder ao fabrico com base nas considerações apresentadas no capítulo 3. É conveniente considerar um núcleo suficientemente resistente de modo que a rotura dos ensaios de arrancamento não esteja condicionada pela rotura do varão, mas sim pelo deslizamento e rotura de ligações entre o varão e a argamassa. Após estudos efetuados por Cunha (2012) [5], verificou-se que 2 multifilamentos de carbono com 1400 tex cada, introduzidos na estrutura axial do núcleo central sob a mesma tensão, podem ser aplicados no compósito de modo a evitar o rompimento destes antes de se mobilizar a capacidade de aderência na interface com a argamassa.

Para o estudo inicial de aderência dos varões, consideraram-se todas as rugosidades produzidas e apresentadas no Quadro 3.2 (Capítulo 3). Numa segunda fase de ensaios de aderência, consideraram-se todas as rugosidades de igual forma, à exceção da rugosidade 0evmax uma vez que se verificou na primeira campanha que o comportamento deste tipo de varões em nada se distinguiu da rugosidade 0evmin, e por isso considerou-se pertinente apenas considerar esta última.

4.2.1.2 Malhas

Relativamente ao estudo de aderência das malhas, os varões constituintes possuem a mesma composição do núcleo resistente que os varões individuais do estudo de aderência, ou seja, 2 multifilamentos de carbono de 1600 tex, pelas mesmas razões enunciadas anteriormente. Foram efetuadas malhas constituídas por varões com rugosidade selecionada para fabrico das malhas a ser implementadas nas paredes de enchimento com base nos resultados dos ensaios

de arrancamento a varões individuais efetuados na primeira fase (Malha 1evmin_8). Apesar disso, também se construíram malhas com varões sem rugosidade como malhas de referência (Malha 0evmin).

As malhas foram desenvolvidas com as mesmas indicações que as malhas a ser aplicadas nas paredes de alvenaria, ou seja, com 25mm de espaçamento entre os varões BCR e com entrelaçamento intercalado entre os varões das duas direções (Capítulo 5.3.3). Assume-se que o relevo que a ligação dos varões das duas direções provoca, poderá eventualmente manifestar algum efeito de imbricamento e tornar-se uma rugosidade adicional no conjunto malha com a argamassa (Figura 4.1 (a)).

Esta campanha de ensaios de aderência em malhas também contempla o estudo comparativo das malhas comerciais aplicadas no reboco das paredes de enchimento apresentadas no Capítulo 3, nomeadamente a malha MAPEI: Mapegrid G220 (Figura 4.1 (b)) e malha S&P: ARMO L 500 (Figura 4.1 (c)).

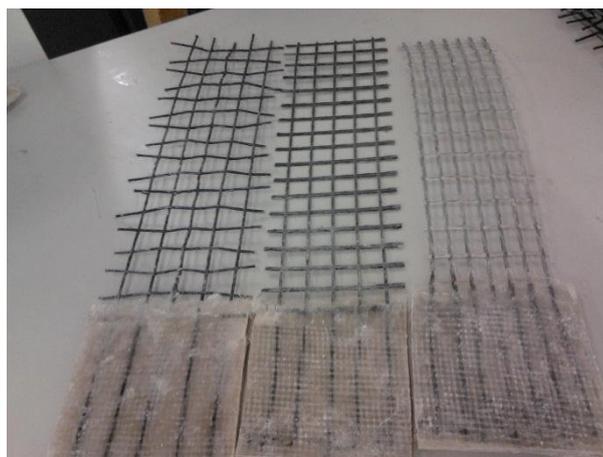


Figura 4.1 – Exemplo de malhas consideradas: (a) Malha 1evmin_8; (b) Malha mapei; (c) Malha S&P

4.2.1.3 Argamassa

Numa primeira campanha, a argamassa utilizada é uma argamassa designada por RHP Plus Exterior – Argamassa industrial de ligantes inorgânicos para revestimentos exteriores de paredes e tetos. A argamassa é pré-doseada uma vez que é um tipo de argamassa mais utilizada para acabamento. Segundo recomendações do fabricante deve ser adicionada a cada 30kg, 4,5 a 5 litros de água.

Sendo a argamassa pré-doseada, utilizou-se uma misturadora com a capacidade de 5Kg para proceder à mistura com base na norma NP EN 196-1 (2006) [35]. Assim, envolveu-se a argamassa durante 30 segundos, passando posteriormente a adicionar-se a quantidade de água estabelecida pelo fabricante uniformemente (4,5 litros a 5 litros de água para cada 30 Kg de argamassa), ao longo de 1 minuto e 30 segundos, com uma agitação mínima. De forma a conhecer qual o valor correto de quantidade de água a adicionar, foram efetuados testes de trabalhabilidade com base na norma EN 1015-3 (1999) [36], de modo a garantir que a argamassa a utilizar possuísse um espalhamento adequado para a aplicação da argamassa no reboco de alvenaria (entre 15 e 17 mm). Assim, para um espalhamento de aproximadamente 17 mm, consideraram-se 4,5 litros a cada 30 Kg, de modo a que a argamassa apresentasse plasticidade suficiente para envolver o reforço e desenvolver a aderência necessária, de modo a existir o menor número de vazios e uma melhor resistência mecânica.

Foi também utilizada a argamassa AREM - Argamassa de Reboco Exterior Manual Hidrofugada – Ciarga numa segunda campanha de ensaios de modo a reproduzir a mesma argamassa utilizada no reboco das paredes, uma vez que esta argamassa possui melhores propriedades mecânicas em relação à argamassa utilizada na primeira campanha. A argamassa é também pré-doseada sendo recomendado pelo fabricante adicionar a cada 25 Kg, 4 litros de água.

A cada amassadura efetuada foram concebidos três provetes com dimensões 40x40x160mm, com a finalidade de ser ensaiados à flexão (sob 3 pontos) e à compressão aos 28 dias de modo a conhecer as suas propriedades mecânicas com base na norma EN 1015-11 (1999) [37] (Quadro 4.1 e Figura 4.2). É possível analisar os resultados médios obtidos no Quadro 4.1, com coeficientes de variação baixos (C.O.V inferiores a 20%), percebendo-se que existe um acréscimo de resistência não muito significativo, principalmente na resistência à flexão com cerca de apenas 33% de aumento de resistência na argamassa AREM.

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios à flexão e à compressão das argamassas utilizadas

	Resistência à compressão		Resistência à flexão	
	σ_{max} (MPa)	C.O.V (%)	σ_{max} (MPa)	C.O.V (%)
1ª Campanha - Argamassa RHP Plus	2,01	10,97	1,21	13,80
2ª Campanha - Argamassa AREM	3,56	9,64	1,61	7,50
$\Delta_{Resistência\ AREM/RHP\ Plus}$ (%)	177,30		132,91	



Figura 4.2 – Ensaio à flexão (esquerda) e à compressão (direita) dos provetes de argamassa aos 28 dias de cura

4.2.1.4 Tijolos

Relativamente ao estudo da aderência da malha no reboco de tijolos, considerou-se razoável a adoção de apenas um tijolo por provete, embora fosse equacionada a hipótese de fazer um provete constituído por camadas de tijolos de modo a simular uma parede de alvenaria mais realista. No entanto, tendo em conta a dimensão da malha em conformidade com a amarra existente, não seria preponderante construir um provete maior que o próprio tijolo. Assim sendo, cada provete tem por base um tijolo de 15, cujas dimensões são 150mm de espessura, 200mm de largura e 300mm de comprimento, em que a malha está embebida em cerca de 200mm de comprimento e 100mm de largura, numa matriz de argamassa com espessura de 20mm. A adoção deste tipo de tijolo e desta metodologia para este ensaio relaciona-se com o mesmo tipo de tijolo a utilizar na construção dos provetes de parede a ensaiar à flexão.

4.2.2 Provetes para os ensaios de aderência

4.2.2.1 Varões BCR

Uma vez que se trata de uma quantidade significativa de tipos de rugosidades a estudar considerou-se pertinente adotar 5 amostras para cada tipo de rugosidade. Para os ensaios de aderência em varões utilizaram-se tubos de pvc de modo a produzir provetes cilíndricos com diâmetro de 50mm e altura de 100mm. Para além disso, criaram-se elementos circulares de esferovite a serem colocados no topo e base do cilindro com a finalidade de garantir o

alinhamento centrado do varão no provete, tal como se demonstra na Figura 4.3. Com o objetivo de reduzir ao máximo o número de vazios da argamassa, os provetes foram submetidos a vibração mecânica no momento do enchimento da argamassa.



Figura 4.3 – Fabrico de provetes cilíndricos de argamassa

Com base na norma EN 1015-11 (1999) [37], os provetes foram sujeitos a um processo de cura de cinco dias em câmara húmida com aproximadamente 95% de humidade relativa e temperatura de 20°C. Após desmoldagem, permaneceram mais dois dias nas mesmas condições, transferindo-se posteriormente para um câmara com cerca de aproximadamente 65% de humidade relativa e 20 °C de temperatura relativa até completar 28 dias de cura a fim de serem ensaiados. Este conjunto de provetes designa-se por provetes da série 1.

Numa segunda campanha, o procedimento foi exatamente o mesmo, tendo-se apenas variado a argamassa utilizada, passando a ser a argamassa AREM - Argamassa de Reboco Exterior Manual Hidrofugada - Ciarga, uma vez que esta argamassa possui melhores propriedades mecânicas em relação à argamassa utilizada na primeira campanha e se pretende utilizar no reboco dos provetes de alvenaria a ensaiar à flexão.

Assim, com o objetivo de se conseguir comparar a influência de uma argamassa mais resistente na aderência dos varões compósitos, produziram-se provetes com as mesmas indicações da primeira campanha de ensaios, sendo tratados como série 2. Para além disso, também se efetuou um outro conjunto de provetes designados por série 3, com este tipo de argamassa mas com dimensões do provete diferentes, a fim de avaliar o efeito de confinamento no arrancamento do varão num provete dado por um volume de argamassa a envolver o varão de cerca do dobro em relação ao anteriormente utilizado. Assim, este

conjunto de provetes foi produzido nas mesmas condições, mas com dimensões de 90 mm de diâmetro e de 180mm de altura, uma vez que não existem tubos pvc com dimensões uniformizadas de 100mm de diâmetro.

Em todas as séries, o varão foi totalmente inserido no provete cilíndrico de argamassa, deixando uma dimensão livre de varão de cerca de 100mm.

Após o fabrico dos provetes de argamassa foram efetuadas as maxilas no varão compósito, de modo a que seja possível fixar o varão convenientemente para que não haja deslizamento na amarra no momento de arrancamento do mesmo. Para isso, tal como no caso das malhas, o varão é inserido numa malha de vidro que é impregnada com resina de modo a tornar o sistema da maxila rígida (Figura 4.4). Assim, esta solução permite que na maior parte dos casos não haja deslizamento do varão na amarra no momento de arrancamento do varão da argamassa, porque caso contrário, o ensaio deixa de ser válido.



Figura 4.4 – Processo de fabrico das amarras nos varões

Relativamente ao número de amostras consideradas, encontra-se apresentado no Quadro 4.2 o número total de provetes ensaiados. Considerou-se pertinente adotar o número de 5 amostras por cada tipologia de modo a conjugar disponibilidade de tempo com o de sucesso de resultados de cada tipologia.

Quadro 4.2 – Número de provetes ensaiados no estudo de aderência de varões

Designação da amostra	Número de provetes			
	Série 1	Série 2	Série 3	Total
0evmin	5	5	5	15
0evmax	5			5
1evmax_8	5	5	5	15
1evint_8	5	5	5	15
1evmin_8	5	5	5	15
2evmax_8	5	5	5	15
2evint_8	5	5	5	15
2evmin_8	5	5	5	15
1evmax_16	5	5	5	15
1evint_16	5	5	5	15
1evmin_16	5	5	5	15
2evmax_16	5	5	5	15
2evint_16	5	5	5	15
2evmin_16	5	5	5	15
Total	70	65	65	200

4.2.2.2 Malhas

Relativamente aos provetes considerados no âmbito do estudo da aderência das malhas em tijolos, apresenta-se no Quadro 4.3 o número de provetes ensaiados. Considerou-se, tal como no caso dos cilindros, o número de 5 provetes por cada tipologia (Quadro 4.3), tendo em conta a disponibilidade de tempo e o sucesso dos ensaios, uma vez que também neste tipo de ensaio é difícil assegurar pouca variabilidade.

Quadro 4.3 – Número de provetes ensaiados nos ensaios de aderência de malhas

Designação da amostra	Número de provetes
Malha_0evmin	5
Malha_1evmin_8	5
S&P: ARMO L 500	5
MAPEI: Mapegrid G220.	5
Total	20

A dimensão da malha a ser embebida no reboco do tijolo é cerca de 200mm de comprimento e cerca de 100mm de largura numa matriz de argamassa de 20 mm, decidindo-se manter a mesma área de malha livre. Para além disso, acrescentou-se a dimensão da maxila com área aproximadamente 120 x 100 mm. Assim, para produzir uma maxila suficientemente rígida, inseriram-se os varões longitudinais das malhas numa malha de vidro a ser impregnada em

resina poliéster, sendo uma solução que se considerou mais eficiente entre todas as outras opções estudadas, de maneira a que não houvesse deslizamento da malha na amarra.

No reboco, considerou-se a argamassa AREM, dado que é esta argamassa que vai ser utilizada no reboco das paredes e embeber as malhas de reforço. Inicialmente foi aplicado o chapisco em cada tijolo, sendo posteriormente aplicada a malha embebida no reboco de cerca de 20mm (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Fabrico e aplicação de malhas para ensaio de aderência

4.2.3 Procedimento de ensaio

4.2.3.1 Ensaios de aderência em varões

O procedimento de ensaio para o estudo de aderência dos varões compósitos nos provetes cilíndricos foi baseado no trabalho anteriormente efetuados por diferentes autores, nomeadamente Cunha (2012), Martinelli et al. (2011), Baena et al., (2009) e Kashyapa et al. (2012) [5, 38-40], uma vez que este tipo de ensaios não tem uma norma específica, sendo fruto de adaptações de normas originais tendo em conta os diferentes materiais a serem ensaiados.

O ensaio de aderência foi desenvolvido num pórtico de ensaios suficientemente rígido associado a um sistema de controlo e aquisição de dados ligados a um sistema computacional que permite o registo das cargas aplicadas e dos deslocamentos sofridos pelas amostras. A carga vertical de tração é aplicada através de uma atuador hidráulico e medida através de uma célula de carga adicional de 10 kN, sendo as deformações axiais do varão controladas através de um dispositivo designado na literatura inglesa por Linear Variable Differential

Transformer (LVDT), o que significa transdutor de diferencial linear variável. Este dispositivo mede o deslizamento linear do varão à saída do provete, tal como se demonstra no esquema de ensaio da Figura 4.6. O provete cilíndrico de argamassa é confinado verticalmente recorrendo à utilização de duas chapas de aço previamente retificadas e unidas entre si, de modo a promover o deslocamento relativo entre o varão tracionado e o provete de argamassa fixo (Figura 4.6). Por sua vez, este sistema de ancoragem do provete é fixado ao pórtico através de um sistema de suporte. O ensaio de aderência é efetuado em controlo de deslocamento através de um LVDT interno, uma vez que as cargas alcançadas são relativamente baixas, e assim, é possível o registo dos deslocamentos após o alcance da carga máxima. A velocidade de ensaio foi de 0,010 mm/s o que correspondeu a ensaios com duração de cerca de 45 a 60 min, adequados a este tipo de ensaios.

Na segunda campanha de ensaios de aderência, o método e procedimento de ensaio foi exatamente o mesmo, inclusivamente no caso dos provetes com dimensões maiores, tendo-se apenas alterado a velocidade de ensaio para 0,012 mm/s de modo a promover ensaios ligeiramente mais rápidos, mas sem afetar significativamente o comportamento do provete.

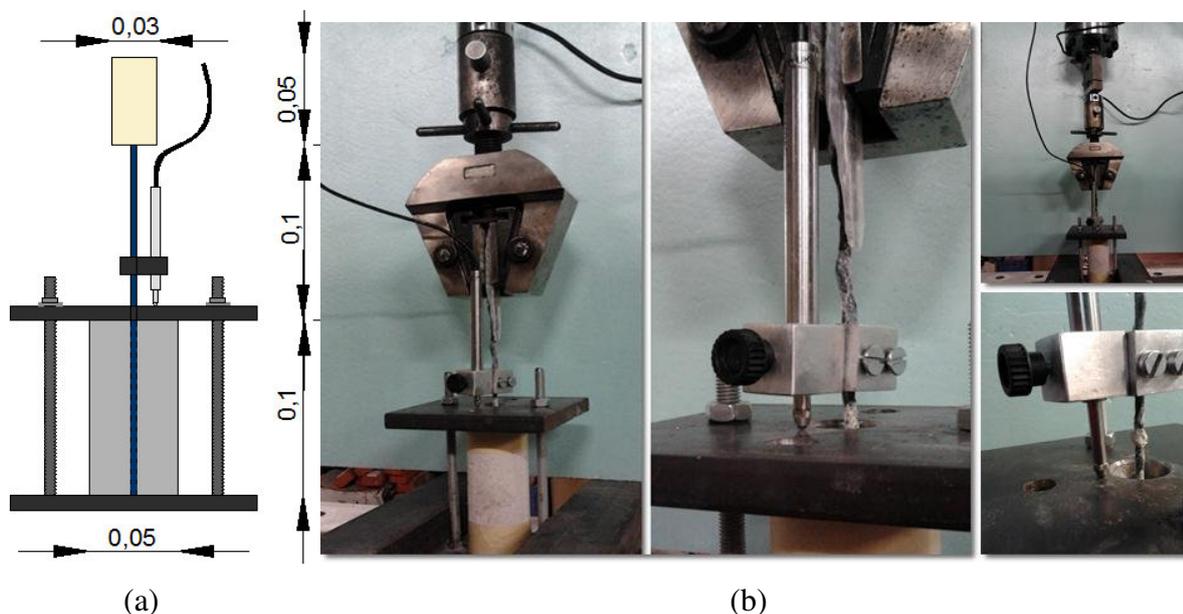


Figura 4.6 – (a) Esquema representativo do ensaio de aderência em cilindros da série 1 (dimensões em metros); (b) Esquema de ensaio de aderência a varões compósitos BCR

4.2.3.2 Ensaios de aderência em malhas

O procedimento e esquema de ensaio utilizado para testar a aderência das malhas são baseados nos mesmos pressupostos dos ensaios de aderência desenvolvidos em cilindros, tal como se apresenta na Figura 4.7.

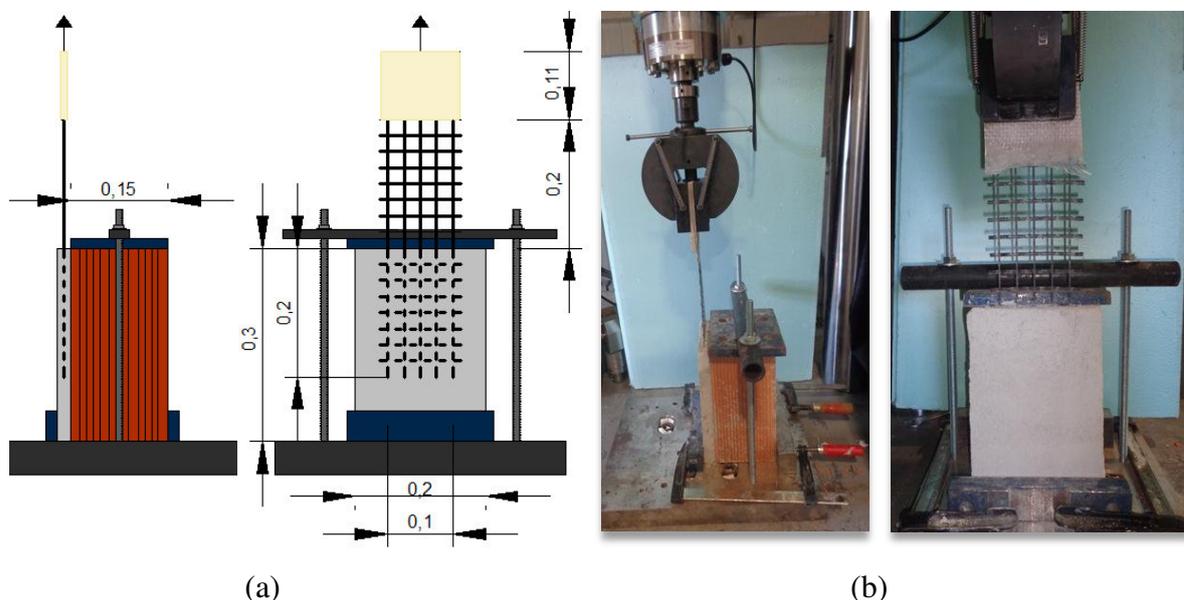


Figura 4.7 – (a) Esquema representativo do ensaio de aderência em tijolos (dimensões em metros); (b) Esquema de ensaio de aderência a malhas

O pórtico de ensaios não foi o mesmo utilizado nos ensaios a cilindros, devido à amarra necessária não se adaptar a esse mesmo pórtico. Assim, foi utilizado um outro pórtico cujo sistema de carga associado possui uma capacidade notavelmente mais elevada, o que não é completamente adequado a este tipo de ensaios que mobiliza uma carga muito baixa. A carga vertical de tração é aplicada através de um atuador hidráulico e medida através de uma célula de carga adicional de 200 kN.

O suporte utilizado pressupõe a fixação do provete de tijolo de maneira a que os deslocamentos medidos digam respeito apenas à malha embebida na argamassa. Para isso, o provete foi fixado à base do pórtico através de chapas e barras metálicas para impedir deslocamentos verticais. Para além disso, uma vez que a reação vertical é oferecida apenas no meio do tijolo, foi necessário aplicar duas chapas fixas por grampos que confinassem a base do provete de maneira a impedir rotação na base do mesmo, o que provocaria rotura prematura do tijolo devido à existência de concentração de forças no ponto de ancoragem do mesmo (Figura 4.7).

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, em que as medições de deformações foram feitas através do sistema interno de controlo, uma vez que não é muito simples localizar um ponto representativo que simule as deformações totais da malha, devido à largura da mesma. A velocidade do ensaio foi de 5 mm/min, equivalente a 0,08 mm/s.

4.3 Resultados e análise de resultados

4.3.1 Ensaio de aderência em varões

Os resultados obtidos foram considerados como válidos mediante a avaliação do comportamento dos provetes durante o ensaio. Assim, os ensaios são válidos se for mobilizada a resistência de aderência (resistência ao arrancamento), ver Figura 4.8 (a). Os ensaios não foram considerados válidos no caso dos varões apresentarem algum tipo de deslizamento na maxila, (Figura 4.8 (b)). De qualquer forma, foi possível obter resultados satisfatórios, e no mínimo, 3 em cada 5 amostras apresentaram resultados viáveis na série 1 e 2.

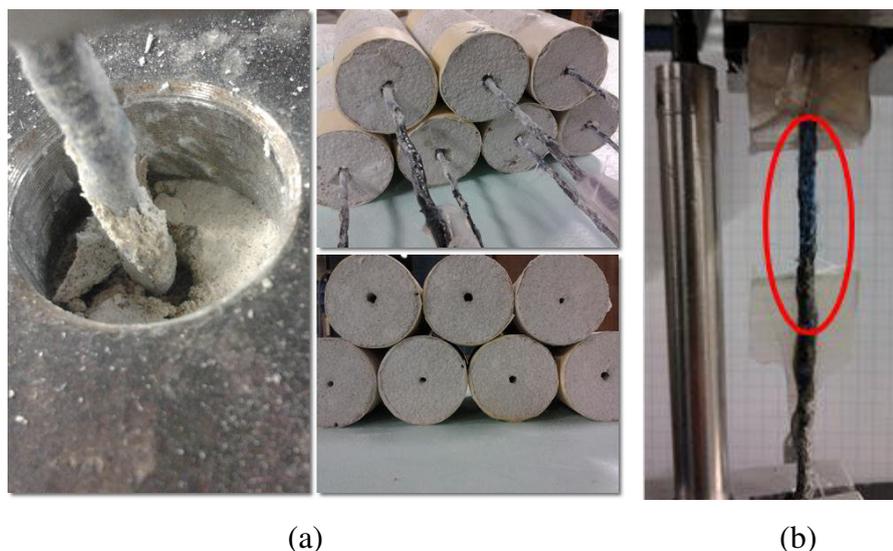


Figura 4.8 (a) – Modos de rotura de arrancamento do varão nas séries 1 e 2; (b) Modo de rotura de deslizamento do varão dentro da maxila

Relativamente à série 3, não foi possível obter resultados autênticos uma vez que os provetes foram todos ensaiados e os varões se comportaram de uma forma globalmente inesperada, apresentando roturas do próprio varão antes de existir arrancamento do mesmo do interior do provete (Figura 4.9). Quer isto dizer que a força de arrancamento é maior que a própria força de tração do varão para o confinamento lateral oferecido pelo maior volume de argamassa.

Assim, os resultados obtidos assemelham-se a resultados originais de ensaios à tração de varões, uma vez que o provete de argamassa poderá estar a funcionar como uma ancoragem ao varão, pois o varão não conseguiu destacar do mesmo antes da própria rotura. Para ultrapassar este problema e avaliar a aderência neste tipo de provetes de argamassa com dimensões maiores, poderia ser utilizada uma argamassa com menor capacidade resistente (por exemplo, a argamassa utilizada na série 1), ou então dotar os varões com núcleos mais resistente (por exemplo, em vez de 2 multifilamentos de carbono de 1600 tex, colocar 3 multifilamentos). De qualquer modo, estes resultados indicam que o aumento do volume de argamassa a envolver o varão pode eventualmente aumentar a resistência de aderência dos varões, uma vez que foram mantidas as restantes condições do ensaios, nomeadamente o tipo de argamassa e os varões. Por outro lado, dado que as malhas embebidas na espessura da argamassa de reboco apresentam baixo nível de confinamento (em termos de volume de argamassa envolvente), pode-se admitir que as condições de ensaios mais representativas correspondem aos cilindros de diâmetro inferior, considerados na série 1 e 2.



Figura 4.9 – Rotura do varão compósito sem existir rotura por aderência na série 3

A análise dos resultados dos ensaios de aderência é efetuada com base nos valores de força máxima mobilizada no arrancamento dos varões e no comportamento dos provetes durante o ensaio. Assim, é possível analisar na Figura 4.10 e no Quadro 4.4 os valores de força máxima média (F_{max}) de cada tipologia de varão da série 1 e da série 2, bem como o comportamento dos provetes na Figura 4.11 em termos de diagrama força-deslocamento. Não se apresenta os deslocamentos associados à força máxima uma vez que este parâmetro apresenta alguma variabilidade (cerca de 50%) para se poder traduzir num valor médio. No entanto, os mesmos estão apresentados em anexo (Anexo A2). Também foi efetuado um cálculo comparativo de modo a obter a relação percentual do desempenho das rugosidades com 16 fios em relação às rugosidades com 8 fios em cada uma das séries ($\Delta_{16fios/8fios}^{Série 1}$ e $\Delta_{16fios/8fios}^{Série 2}$ no Quadro 4.4).

Além disso, foi avaliada a relação percentual existente entre os valores das forças máximas das rugosidades, relativamente à força máxima do varão de referência sem rugosidade em cada uma das séries, $0evmin$, ($\Delta_{rug/0evmin}$ no Quadro 4.4).

Quadro 4.4– Resultados das forças médias dos ensaios de aderência nos provetes cilíndricos

Tipologia do varão		Rugosidade com 8 fios		Rugosidade com 16 fios		$\Delta_{16fios/8fios}^{Série 1}$ (%)	$\Delta_{16fios/8fios}^{Série 2}$ (%)
		F_{max} Série 1	F_{max} Série 2	F_{max} Série 1	F_{max} Série 2		
0evmax	Média (kN)	0,60		0,60			
	C.O.V (%)	9,45		9,45			
0evmin	Média (kN)	0,60	0,62	0,60	0,62		
	C.O.V (%)	27,24	18,14	27,24	18,14		
1evmax	Média (kN)	2,09	2,49	0,96	1,45	217,05	172,25
	C.O.V (%)	6,46	14,25	10,07	30,70		
	$\Delta_{1evmax/0evmin}$ (%)	350,07	401,44	161,28	233,06		
	Média (kN)	1,46	1,55	1,14	1,83	128,12	84,96
1evint	C.O.V (%)	13,48	36,68	16,57	18,27		
	$\Delta_{1evint/0evmin}$ (%)	245,00	250,69	191,23	295,08		
	Média (kN)	1,72	2,09	1,17	1,88	146,80	111,41
1evmin	C.O.V (%)	11,36	13,87	21,08	13,44		
	$\Delta_{1evmin/0evmin}$ (%)	288,71	336,96	196,67	302,46		
	Média (kN)	1,80	1,92	0,93	1,33	193,60	143,78
2evmax	C.O.V (%)	22,66	7,80	15,23	27,45		
	$\Delta_{2evmax/0evmin}$ (%)	301,45	309,41	155,71	215,20		
	Média (kN)	1,30	1,36	1,07	1,46	121,55	93,54
2evint	C.O.V (%)	20,51	25,20	22,75	35,82		
	$\Delta_{2evint/0evmin}$ (%)	218,61	219,98	179,86	235,17		
	Média (kN)	1,62	1,63	1,10	1,68	147,45	96,84
2evmin	C.O.V (%)	8,44	9,32	12,48	16,67		
	$\Delta_{2evmin/0evmin}$ (%)	271,63	262,98	184,21	271,57		
	Média F_{max} (kN)	1,40	1,67	0,95	1,46	147,80	113,85
Média $\Delta_{rug/0evmin}$ (%)		279,25	296,91	178,16	258,76		

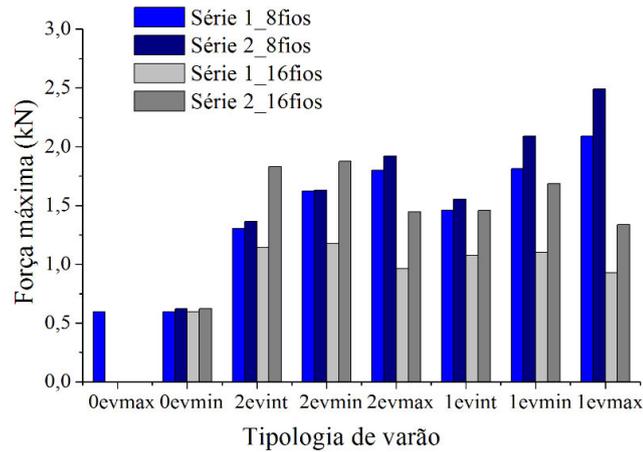


Figura 4.10 – Forças máximas médias de cada tipo de varão compósito

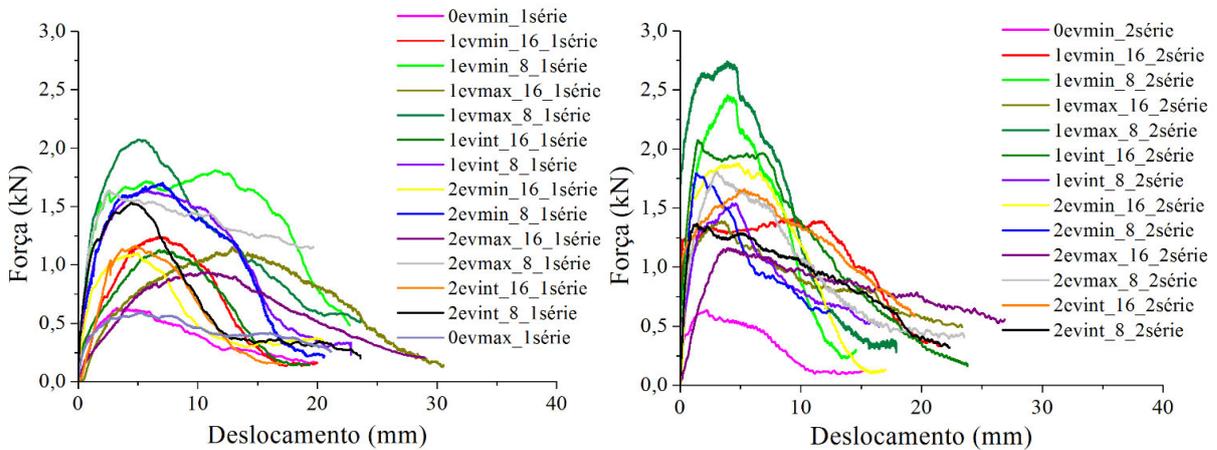


Figura 4.11 – Diagramas força - deslocamento de cada tipo de varão compósito nos ensaios de aderência a cilindros

Perante os resultados apresentados, pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- A força máxima (série 1 e na série 2) obtém-se para o varão cuja rugosidade é 1evmax_8. Tal como se pode ver na Figura 4.10, a tendência gradual em termos de força máxima dos varões com rugosidade composta por 8 fios na série 1 e na série 2 segue a ordem da velocidade intermédia, mínima e por fim máxima, enquanto que no caso da rugosidade com 16 fios, é evidente a sequência da velocidade máxima, intermédia e mínima. Não se encontra uma explicação inequívoca para justificar que na rugosidade com 16 fios da série 1 e 2 não se verifique a mesma ordem de velocidades de tiragem que se observa no caso das rugosidades com 8 fios. No entanto, no caso das rugosidades com 16 fios, percebe-se que os valores de força máxima dos varões não são muito diferentes entre eles, comparando com o caso das rugosidades de 8 fios. Com efeito, parece ser possível concluir que as velocidades de tiragem diferentes pode não ser uma variável determinante no comportamento de varões compostos

por rugosidades com 16 fios e, por isso, a sequência de velocidades nas rugosidades com 8 fios não se verifica no caso das rugosidades com 16 fios. Outra explicação possível pode estar relacionada com o facto da velocidade mínima de tiragem nas rugosidades de 8 fios proporcionar uma área livre entre as saliências das rugosidades das velocidades mínimas (área de aderência) muito menor do que no caso da velocidade máxima, e, por isso a argamassa pode não conseguir penetrar totalmente estas reentrâncias, criando uma espécie de vazios que se materializa posteriormente numa maior facilidade de deslizamento de dentro da argamassa, conduzindo a valores de força de arrancamento menores. Por outro lado, na rugosidade de 16 fios, isto pode não acontecer porque a área de aderência pode ser suficiente para criar ligações entre varões e argamassa uma vez que a rugosidade é mais volumosa e, assim, geram-se forças de arrancamento mais semelhantes que no caso da rugosidade de 8 fios devido ao maior efeito de imbricamento oferecido pela rugosidade mais saliente do varão. Ou seja, poderá concluir-se que os fatores que influenciam a força máxima resultam da interação da área de aderência e do efeito de imbricamento controlado pelas rugosidades.

- No que se refere ao comportamento dos provetes ao longo do ensaio, selecionou-se uma curva típica de cada tipologia de varão compósito, uma vez que os gráficos força-deslocamento dos provetes validados foram bastante semelhantes. Assim, através da análise da Figura 4.11 é possível verificar que o comportamento dos varões na série 1 é ligeiramente diferente da série 2. Por isso, na série 1 os valores de pico são menores do que na série 2, e apresentam um comportamento pós-pico mais dúctil do que no caso da série 2 em que o pós-pico se apresenta menos achatado (redução mais acentuada da resistência para valores crescentes do deslocamento). Este tipo de comportamento pode ter a ver com as interações que existem no momento do arrancamento, isto porque, à medida que se arranca o varão do provete, as ligações entre estes materiais quebram-se lentamente devido ao facto dos pontos de união serem vastos uma vez que a textura do varão ou mesmo a presença de rugosidades, permite que existam vários pontos de contacto da argamassa no varão. Assim, atingida a carga máxima na série 1, e sendo a argamassa mais fraca, esta vai cedendo mais facilmente do que no caso da série 2 em que a argamassa é ligeiramente mais forte e acaba por desagregar-se mais rápido em vez de ir desfazendo progressivamente à medida que decorre o ensaio e permitindo assim uma ductilidade tão acentuada como na série 1.

- Na mesma ordem de ideias, na série 1, as rugosidades com 16 fios apresentam uma menor rigidez elástica relativamente aos varões com rugosidades com 8 fios, embora o mesmo não aconteça com a série 2 em que a rigidez elástica é semelhante entre todas as rugosidades,

talvez pelo facto das forças máximas serem consideravelmente mais elevadas do que no caso da série 1 e mais próximas entre as diferentes rugosidades. Verifica-se também que a rigidez da ligação do varão com 8 fios na rugosidade com a argamassa é semelhante entre os diferentes tipos de velocidades. No entanto, no caso da rugosidade com 16 fios, para além da rigidez possuir valores globalmente menores do que as rugosidades com 8 fios, esta varia entre as diferentes velocidades, sendo de salientar que as rugosidades com velocidade de tiragem máxima apresentam menor rigidez. Este comportamento pode ter a ver com o facto do varão produzido em velocidades altas apresentar menor ângulo de entrançamento.

Em termos de valores percentuais médios, os varões da resistência de aderência sem rugosidade apenas apresentam uma variação de 3% entre as duas séries apresentadas. Apesar disso, o benefício dado pelas rugosidades com 8 fios em relação aos varões sem rugosidade é mais evidente do que nas rugosidades com 16 fios. Assim, a rugosidade com 8 fios na série 1 proporciona um aumento de cerca de 179%, enquanto na série 2 é mais elevado atingindo um aumento de cerca 200%. No caso das rugosidades com 16 fios, este efeito deixa de ser tão elevado, passando a existir um benefício de cerca de 78% na série 1 e 150% na série 2 em relação aos varões sem rugosidade da mesma série. Por outro lado, a rugosidade com 8 fios apresenta valores de força máxima significativamente mais elevados em relação à rugosidade de 16 fios no caso da série 1 (cerca de 48%), em relação ao que acontece no caso da série 2 (cerca de 14%). Esta redução de forças entre varões com rugosidades diferentes poderá dever-se ao facto da quantidade de argamassa envolvente diminuir nos provetes com rugosidades de 16 fios, uma vez que estes varões têm maior área transversal, ocupando mais espaço dentro do provete cilíndrico (ver Figura 4.8 – diferença da área ocupada pelos diferentes varões nos provetes). Como as dimensões do provete são as mesmas para as diferentes tipologias de varão, os varões com rugosidades de 16 fios podem sentir menor confinamento oferecido pela argamassa envolvente devido às suas maiores dimensões relativamente aos varões com rugosidade de 8 fios. De facto, a diferença entre as áreas dos varões com diferentes rugosidades varia entre 10% a 40% (Figura 3.9), mas como a dimensão do provete não é muito elevada, este efeito pode influenciar o confinamento do varão. Por outro lado, uma vez que a rugosidade com 16 fios possui maior quantidade de material de poliéster, poderá existir um maior esticamento e reajustamento do material, o que faz com que as ligações se percam e isso se traduza numa menor resistência. Verifica-se ainda que a rigidez elástica é menor na rugosidade com 16 fios comparativamente com a rugosidade com 8 fios. Estes valores aproximam-se mais no caso da série 2 talvez pelo facto da argamassa ser mais forte e o efeito

da área ocupada pelo varão não ser tão significativa como no caso da série 1, ou mesmo através do impedimento do esticamento e alongamento do varão dentro do provete.

- Relativamente ao modo de arrancamento do varão, é possível verificar que não existe nenhum padrão de rotura dos provetes à medida que existe arrancamento varão. Por isso, verifica-se que à medida que existe o arrancamento do varão, existe desagregação da argamassa e/ou deslizamento do varão ao longo da interface do varão com a argamassa aderente. À medida que a área transversal aumenta, e principalmente nas rugosidades de 16 fios, o efeito de desagregação da argamassa (dilatância) é maior junto ao ponto de saída do varão, fruto das saliências maiores da rugosidade (Figura 4.8).

- Notar que, apesar da rugosidade que apresenta melhor desempenho ser a rugosidade 1evmax_8, constatou-se mediante fabrico das malhas a serem aplicadas nas paredes, que era inviável a utilização desta rugosidade. De facto, para aplicação dos varões compósitos em malhas com reforço semelhante ao que existe comercialmente foi necessário aumentar a quantidade de material no núcleo, o que inviabilizou a adequada produção dos varões associada à falta de homogeneidade do acabamento do entrançado. Por isso, a estrutura de entrançado seleccionada para fabrico de malhas foi a rugosidade 1evmin_8, uma vez que é a que apresenta um melhor comportamento a seguir à rugosidade 1evmax_8.

4.3.2 Ensaio de aderência em malhas

A viabilidade dos ensaios de aderência em malhas requer que no momento do ensaio não haja deslizamento da malha na maxila, e isso foi conseguido com algum sucesso na maioria dos provetes. Assim, em cada tipo de provete ensaiado, foi possível obter algumas conclusões de acordo com o desempenho da malha ao longo do ensaio e em termos de força máxima evidenciada. Os diagramas força-deslocamento apresentam-se na Figura 4.12 para as diferentes malhas de reforço, nomeadamente as malhas produzidas (1evmin_8 e 0evmin-referência) e as malhas comerciais (Mapei e S&P).

Tal como se pode verificar no Quadro 4.5, os valores médios das forças em cada tipo de malha apresentam coeficientes de variação razoáveis (C.O.V). Contudo, o mesmo não se pode concluir acerca dos deslocamentos associados que variam bastante entre provetes do mesmo tipo.

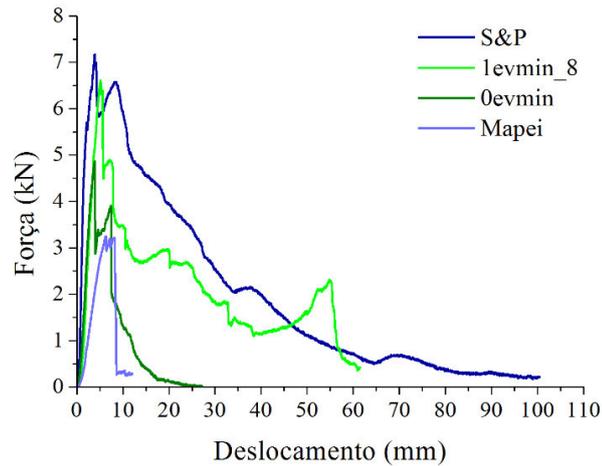


Figura 4.12 – Comportamento típico força - deslocamento das malhas nos ensaios de aderência em tijolos

Quadro 4.5 – Resultados das forças médias dos ensaios de aderência das malhas

	F_{max} (kN)	C.O.V (%)	δ_{max} (mm)	C.O.V (%)
0evmin	5,74	16,77	7,08	91,87
levmin_8	6,39	2,96	6,39	24,57
Mapei	3,39	11,92	6,60	9,32
S&P	7,21	5,46	7,04	48,57

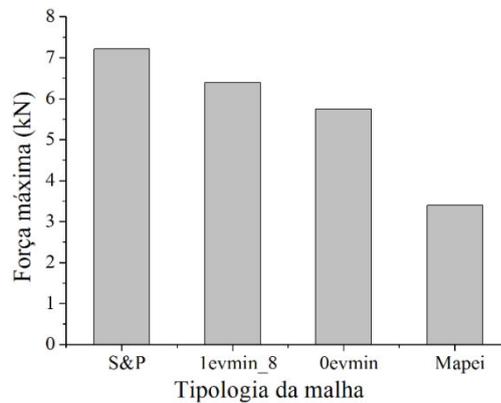


Figura 4.13 - Forças máximas médias de cada tipo de malha

Relativamente a valores máximos da resistência de aderência em tração, destaca-se a malha comercial S&P (maior valor da resistência), enquanto que a malha Mapei apresenta o desempenho menos interessante (menor valor da resistência). As malhas produzidas com a rugosidade utilizada no reforço de paredes de alvenaria e a malha sem rugosidade apresentaram valores intermédios, juntamente com comportamentos bastante interessantes.

Paralelamente à análise da força máxima deve ser analisado o modo de rotura que resulta muito do funcionamento da malha (Figura 4.14 e Figura 4.15). Em relação à malha S&P,

existe o arrancamento de parte da argamassa de cima que é arrastada lentamente pela malha em deslizamento de dentro do reboco, geralmente através de uma fenda localizada (Figura 4.15 (a)). Com efeito, a malha S&P possui de facto um comportamento muito interessante, que promove largas deformações e um comportamento bastante dúctil. Por outro lado, no caso da malha 0evmin e 1evmin_8 é evidente outro tipo de rotura, onde a formação de múltiplas fendas associadas ao efeito da distribuição de forças na malha é claramente identificado, havendo algumas vezes desagregação e destacamento da argamassa em qualquer zona do reboco e não uma zona comum como acontecia no caso da malha S&P (Figura 4.15 (b) e Figura 4.15 (c)). Este efeito acontece muito provavelmente devido ao efeito de travamento que a malha oferece quando é tracionada conferido pelo entrelaçamento dos varões longitudinais e transversais. De facto, percebe-se que as malhas produzidas não são totalmente planas como as malhas comerciais, o que faz com que uma vez tracionadas, não consigam deslizar continuamente de dentro do reboco (como acontece na malha S&P), acabando por induzir a fendilhação da argamassa devido às irregularidades da malha produzida. Este efeito é mais relevante na malha 1evmin_8 devido à adicional rugosidade que cada varão possui, funcionando também como agente de atrito que promove a aderência, embora no caso da malha 0evmin também exista alguma redistribuição de forças devido ao imbricamento conferido pelo entrelaçamento dos varões. Por isso, na curva representativa do comportamento das malhas na Figura 4.12, a malha 1evmin_8 possui um comportamento mais dúctil na zona pós pico relativamente à malha 0evmin, havendo redistribuição de forças ao longo de todo o desempenho da malha. Em termos comparativos, pode dizer-se que a malha 1evmin_8 se aproxima da malha comercial S&P, ainda que apresente um comportamento de pós-pico ligeiramente mais frágil. No que concerne à malha Mapei, os varões não são suficientemente resistentes e acabam por ceder mesmo antes de existir qualquer sinal de deslizamento de dentro do reboco (Figura 4.15 (d)). Neste caso a resistência final obtida nos ensaios corresponde à rotura das malhas à tração. Notar que os pontos da malha que apresentam rotura são normalmente pontos de ligação entre os varões longitudinais e transversais, pontos de união da malha com a maxila, ou mesmo na ligação da malha com a argamassa, devido ao facto de ser zonas suscetíveis de concentração de forças.

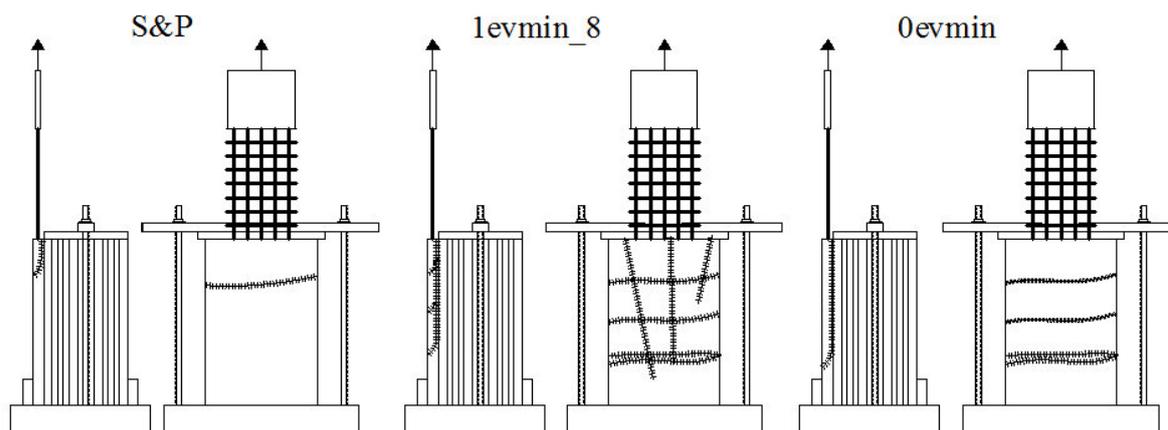


Figura 4.14 – Esquemas representativos dos modos de rotura dos ensaios de aderência

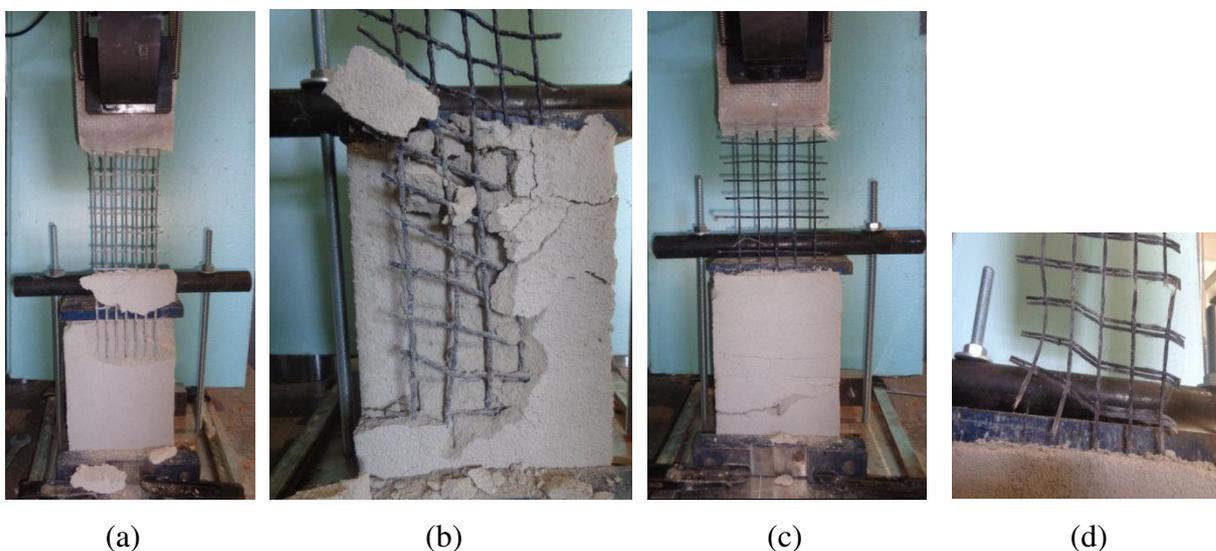


Figura 4.15 Modos de rotura: (a) malha S&P; (b) malha 1evmin_8; (c) malha 0evmin; (d) malha Mapei

Estes ensaios foram realizados no seguimento dos ensaios de aderência em cilindros e por isso, tentou-se comparar os resultados obtidos. Apesar de não ser linear, multiplicou-se a força média máxima existente nos varões individuais pelo número de varões longitudinais existentes nas malhas (5 varões), e comparou-se com os valores obtidos experimentalmente das malhas, obtendo-se duas relações completamente diferentes (Quadro 4.6). Enquanto que no caso dos varões sem rugosidade, a força experimental foi maior cerca de 85% em relação à força estimada através dos varões individuais, no caso da malha 1evmin_8 o mesmo não aconteceu, sendo a força experimental menor cerca de 40% em relação à força estimada, tal como se pode verificar no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Comparação do desempenho de varões individuais e malhas

Tipologia do varão	$F_{max\ malha}$ (kN)	$F_{max\ varão}$ (kN)	$F_{estimada\ na\ malha}$ ($F_{max\ varão} \times 5$) (kN)	$\Delta F_{\frac{estimada\ na\ malha}{experimental}}$ (%)
0evmin	5,74	0,62	3,10	185,29
1evmin8	6,39	2,09	10,45	61,21

De facto, perante a análise destes varões percebe-se que os resultados obtidos através da tração de varões individuais do tipo 0evmin não são satisfatórios, sendo estes subestimados, uma vez que é obtido um valor experimental de um conjunto deles superior ao valor teórico. Além disso, percebe-se que muito mais que a capacidade de aderência dos varões longitudinais, existem efeitos de interação, como por exemplo o entrelaçamento com varões transversais e a quantidade de argamassa que confina os varões que afetam os valores obtidos.

4.4 Caracterização do comportamento à tração dos materiais de reforço

No que se refere ao comportamento à tração dos BCR, foi efetuado o estudo de caracterização mecânica em varões compósitos individuais e em malhas. Este tipo de ensaios de tração mecânica uniaxial revela-se de extrema importância uma vez que pode fornecer informações importantes ao nível da força máxima de rotura, mas também do seu comportamento mecânico em termos de deformação e ductilidade. Esta informação é importante para o estudo analítico para comparação dos valores experimentais da resistência de provetes de alvenaria reforçada sujeitos à flexão.

4.4.1 Materiais

4.4.1.1 Varões

Com o intuito de conhecer as propriedades mecânicas dos varões a ser aplicados nas paredes de alvenaria, foram desenvolvidos ensaios à tração em varões com as mesmas características que os varões a serem utilizados nas paredes de alvenaria. Isto porque, tal como se sabe, a malha de reforço a ser aplicado no reboco pretende combater os efeitos de flexão das paredes, que, por sua vez, implicam esforços de tração que o sistema normal de alvenaria não absorve com muito sucesso. Assim, interessa perceber qual o desempenho à tração dos varões a serem utilizados na malha de reforço, de modo a ser possível estimar analiticamente a capacidade resistente das malhas de reforço das paredes de alvenaria a serem ensaiadas.

Com efeito, o núcleo resistente foi constituído por 3 multifilamentos de fibra de carbono de 1600 tex e, por 5 multifilamentos de fibra de vidro de 544 tex, tal como se considera nas malhas de reforço utilizadas nas paredes de maneira a equiparar-se às malhas comerciais. Em relação às estruturas de entrançado, foi adotada a rugosidade utilizada nos varões da malha de reforço, ou seja, 1evmin_8, e também se considerou pertinente considerar a estrutura de entrançado simples como referência, isto é 0evmin. Deste modo, apresenta-se no Quadro 4.7 as tipologias estudadas no que diz respeito ao comportamento à tração dos varões.

Quadro 4.7 – Tipologias de BCR analisadas à tração uniaxial

Designação do varão	Constituição do núcleo resistente	Número de amostras
0evmin_carbono	3 Multifilamentos de fibra de carbono de 1600 tex	5
0evmin_vidro	5 Multifilamentos de fibra de vidro de 544 tex	5
1evmin_8_carbono	3 Multifilamentos de fibra de carbono de 1600 tex	5
1evmin_8_vidro	5 Multifilamentos de fibra de vidro de 544 tex	5
Total		20

4.4.1.2 Malhas

Em relação ao estudo do comportamento de malhas à tração, foram efetuados ensaios introdutórios que permitiram extrair algumas conclusões importantes. O objetivo desta campanha seria estudar as malhas desenvolvidas e as malhas comerciais aplicados nas paredes de alvenaria à tração, porém, nos ensaios preliminares efetuados com apenas um tipologia de malha, foi possível avaliar a eficiência deste tipo de ensaios. Assim sendo, importa indicar que a malha analisada era constituída por varões cujo núcleo era composto por 5 multifilamentos de fibra de vidro de 544tex, com a estrutura de entrançado simples como referência.

4.4.2 Procedimento de ensaio

4.4.2.1 Varões

O material em estudo é um material de foro complexo uma vez que envolve várias forças internas a atuar em simultâneo entre o núcleo e o entrançado. Assim, o material compósito é dotado de um conjunto de propriedade únicas, o que não permite a aplicação direta de uma

norma padronizada. No entanto, as prescrições de ensaio foram baseadas nas normas NP EN ISO 2062 (1997) [41] e ASTM 5034 (1995) [42].

Foi explorado um equipamento designado por dinamómetro (máquina universal de tração uniaxial) da marca Hounsfield, modelo 100 KS, utilizando uma célula de carga com uma capacidade máxima de 100 kN. Este equipamento consiste num dispositivo de dois grampos utilizados para fixar a amostra e tensioná-la até à rotura a uma velocidade constante, registando as forças envolvidas e correspondentes deslocamentos.

Uma vez que as deformações envolvidas são consideradas como pequenas deformações, foi utilizado um extensómetro externo para adquirir os deslocamentos do material (Figura 4.16). A distância entre pontos de medição do extensómetro é de 25 mm e a velocidade de ensaio foi de 50 mm/min, o que equivale a uma velocidade de 0,8 mm/s.

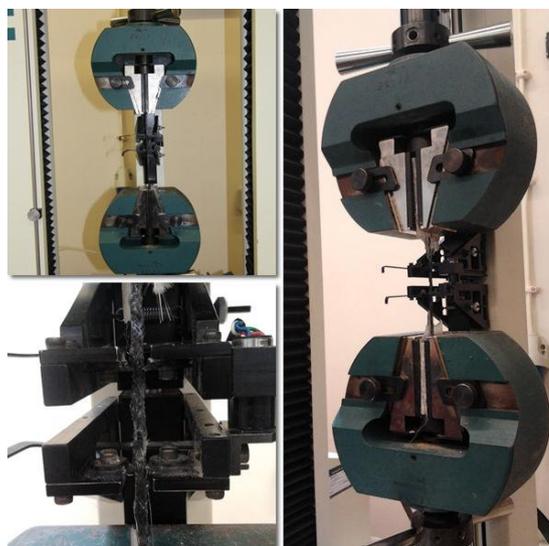


Figura 4.16 – Dinamómetro e ensaio de tração de varões BCR

Como os ensaios à tração uniaxial exigem maxilas suficientemente resistentes para que não haja deslizamento dos varões no momento do carregamento, também neste caso se procedeu à introdução do varão numa malha de vidro impregnada em resina, pois é uma solução que evidenciou resultados satisfatórios. Assim, as amostras apresentam duas maxilas em cada extremidade com dimensões iguais à amarra utilizada, ou seja, 45mm x 70mm, com um comprimento livre de varão de cerca de 110mm (Figura 4.17). A norma associada a este tipo de ensaio recomenda outro tipo de configuração de amarras, no entanto, essas não se utilizaram uma vez que o nível de carga mobilizado é baixo e torna-se mais simples aplicar este método.



Figura 4.17 – Amostras de varões com maxilas prontos a serem ensaiados

4.4.2.2 Malhas

Relativamente ao ensaio de malhas submetidas à tração direta, este foi baseado nas mesmas indicações recomendadas pelas normas NP EN ISO 2062 (1997) [41] e ASTM 5034 (1995) [42].

Os ensaios foram efetuados num pórtico em tudo semelhante ao pórtico utilizado nos ensaios de tração de varões, no entanto, a amarra utilizada é maior para que se consiga uma amostra de uma malha meramente representativa da malha de reforço a ser utilizada nas paredes de enchimento. Para além disso, não se utilizou LVDT's externos, admitindo que as medições das deformações das malhas são suficientemente registadas internamente.

Foi considerada uma velocidade de cerca de 7mm/min, equivalente a cerca de 0,10 mm/s.

Como é recomendado uma dimensão de provete (largura/comprimento) de 1/3, e uma vez que a amarra utilizada permite fixar uma área de (largura x altura) 120mm x 100 mm, a amostra possui 5 varões longitudinais com espaçamento exatamente igual ao utilizado nas malhas das paredes de enchimento, ou seja, 25 mm, o que perfaz uma largura de 100mm e, na outra direção é constituída por cerca de 13 varões transversais com igual espaçamento, permitindo assim uma razão aproximada entre dimensões de 1/3, tal como recomendado. Tal como nos restantes casos de preparação de malhas, foi efetuado o entrelaçamento intercalado entre os varões das duas direções, de modo a simular as malhas de reforço a utilizar nas paredes de alvenaria.



Figura 4.18 – Fabrico e ensaios de malhas à tração com amarras com Cola de Epoxi
Multiaplicações Sikadur 31®

Por outro lado, a preparação das amarras nas amostras está intrinsecamente relacionado com a falta de sucesso nos resultados alcançados, pois os dois métodos explorados de amarras nas malhas não permitiram que a rotura ocorresse pelos varões constituintes das malhas, mas sim pelo deslizamento dos varões dentro das amarras. Numa primeira fase, tentou-se aplicar Cola de Epoxi Multiaplicações Sikadur 31®, entre duas chapas de aço com os varões constituintes das malhas inseridos na mesma. No entanto, não foi possível garantir que durante o ensaio os varões ficassem completamente seguros à amarra, tal como se demonstra na Figura 4.18, em nenhuma das 4 amostras desenvolvidas. Com efeito, uma vez que os varões deslizaram dentro da cola, optou-se por inserir os varões constituintes das malhas numa malha de vidro impregnada por resina poliéster, porém também neste caso o deslizamento dos varões foi bastante evidente nas 4 amostras de malhas desenvolvidas, tal como se pode comprovar na Figura 4.19.



Figura 4.19 – Fabrico e resultados de malhas submetidas à tração com amarras de malha de vidro impregnada em resina poliéster

4.4.3 Resultados e análise de resultados

4.4.3.1 Varões

A este tipo de ensaios está muitas vezes inerente a falta de sucesso nos resultados obtidos uma vez que, durante o ensaio, o varão compósito pode deslizar da maxila, o que invalida de imediato as deformações e as forças reais associadas à tração dos varões. Assim sendo, de um conjunto de 5 amostras, conseguiu-se pelo menos 3 amostras cujos resultados foram considerados válidos.

A análise de resultados deste tipo de testes materializam-se num diagrama força-deslocamento, em que a força medida diz respeito à força de tração do varão, e os deslocamentos são deformações medidas entre os pontos do extensómetro. Não foi considerado adequada a apresentação dos gráficos em tensão-extensão, uma vez que se trata de um compósito em que as áreas dos materiais constituintes do mesmo variam bastante, e, para além disso, não se deve considerar a secção em estudo como uma secção homogénea pois torna-se difícil conhecer as propriedades mecânicas e a área dos materiais reais de modo a proceder ao cálculo de tensão homogeneizada. Assim sendo, é possível ver na Figura 4.20, o

comportamento dos varões à tração em termos de força-deslocamento e no Quadro 4.8 os resultados obtidos em termos de força e deslocamento médios, com coeficientes de variação (C.O.V) aceitáveis.

Quadro 4.8 – Apresentação dos resultados dos ensaios à tração dos varões

Tipologia de varão	Média F_{max} (kN)	Média δ_{max} (mm)	C.O.V (%)
levmin_8_vidro	1,45	0,38	9,14
levmin_8_carbono	4,92	0,27	9,21
$\Delta_{carbono/vidro}$ (%)	339,19	71,05	

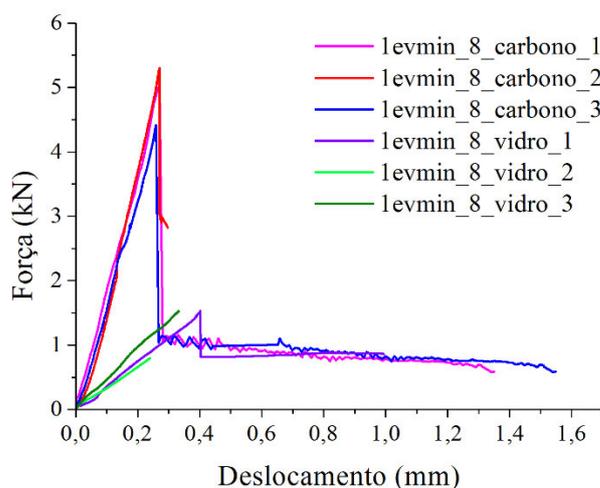


Figura 4.20 - Diagramas típicos força - deslocamento dos varões levmin_8_vidro e levmin_8_carbono

Este tipo de material compósito possui características muito próprias que fazem com que o comportamento do mesmo apresente variações entre os mesmos tipos de varões muitas das vezes inesperadas. Isto porque, é praticamente impossível assegurar que a tensão de entrada utilizada nos filamentos garanta o perfeito e igual alinhamento dos materiais constituintes, o que pode influenciar o comportamento dos varões. Por conseguinte, não é considerada uma tensão maior pois pode ocorrer dano nas fibras. Este fator influencia o momento em que o compósito começa a ser responsável pela absorção das cargas. Notar que, as amostras selecionadas não apresentam variações que sejam justificadas por este defeito intrínseco do material, o que torna neste caso o processo de fabrico viável e satisfatório.

Assim sendo, o comportamento deste tipo de varões à tração é descrito através de duas etapas: (1) o material apresenta um comportamento linear elástico, com eventual reajuste do material logo no início do tramo, uma vez que este compósito é constituído por 3 materiais a colaborar simultaneamente mas com tensões diferentes entre eles, o que faz com que não entrem em

carregamento simultaneamente. Neste sentido, foi atingida a carga máxima devido essencialmente à presença dos multifilamentos de carbono e de vidro, uma vez que a linearidade do material compósito no regime de pré-pico parece ser controlada pelo comportamento linear do material de reforço presente no núcleo do compósito, afetando autenticamente a rigidez do mesmo; (2) o núcleo resistente do varão compósito entrou em rotura, em que a capacidade de carga final é da responsabilidade da estrutura de entrançado, atingindo elevadas deformações uma vez que a estrutura fibrosa apresenta propriedades elásticas muito maiores em relação ao material de reforço utilizado devido ao facto do ângulo de distribuição dos multifilamentos diminuir à medida que o varão permanece em carga, o que permite atingir elevadas deformação devido ao alongamento do mesmo. Este rearranjo do material do entrançado apesar de ocorrer desde o início, é mais evidente nesta fase em que o núcleo perdeu as suas capacidades resistentes e começou a deslizar dentro do entrançado que asseguram uma carga residual importante em termos de ductilidade. Além disso, o entrançado é constituído por um conjunto de multifilamentos, e por isso, as deformações atingidas são muito elevadas uma vez que os filamentos não atingem a rotura simultaneamente, o que confere ao varão capacidades dúcteis que sem a presença do entrançado jamais seriam evidenciadas. O comportamento pós pico apresenta semelhanças entre os tipos de varões muito interessantes uma vez que em ambas as tipologias o desempenho do material torna-se praticamente o mesmo. Isto porque, após a rotura do material fibroso resistente, os varões passam a ser controlados praticamente pela presença da estrutura do entrançado, material comum nas duas tipologias.

Em relação aos resultados comparativos entre as duas tipologias estudadas, percebe-se que quando se utilizam os multifilamentos de carbono existe um aumento de capacidade resistente de cerca de 240% e um decréscimo de cerca de 30% de deformação registada associada à força máxima em relação aos varões compostos por fibras de vidro. De facto, o aumento de capacidade de carga visível nos varões com fibras de carbono é justificado pelas capacidades resistentes associadas a cada tipo de fibras. No entanto, o número de multifilamentos utilizados em cada tipologia também pode ser um fator importante no desempenho global das fibras, uma vez que, devido à utilização de um número maior de multifilamentos de vidro, o deslizamento interno entre as fibras pode ser mais evidente e provocar eventualmente até o seu dano. Além disso, é muito difícil assegurar que a tensão no momento de fabrico do varão seja exatamente a mesma em todas as fibras, o que faz com que o desempenho delas possa não ser o expectável.

No que diz respeito à ductilidade do compósito, é evidente que os varões cujo núcleo é composto por fibras de vidro apresentam uma ductilidade mais acentuada do que os varões cujo núcleo é constituído por fibras de carbono. Assim, a rigidez média dos varões compósitos apresenta-se no Quadro 4.9, obtida através de linhas de tendência de cada ramo linear do comportamento pré pico das amostras com coeficientes de correlação (R^2) de cerca de 0,99. De facto, a rigidez do material compósito com fibras de carbono é muito maior (cerca de 485%), comparada com a rigidez do varão compósito cujo núcleo é composto por fibras de vidro.

Quadro 4.9 – Resultados de rigidez obtidos através dos ensaios à tração

Tipologia de varão	Média rigidez (kN/mm)	C.O.V (%)
levmin_8_vidro	3,84	17,53
levmin_8_carbono	18,64	10,17
$\Delta_{rigidez\ carbono/ rigidez\ vidro}$ (%)	485,14	

No que se refere aos modos de rotura dos varões, apresentam-se nas Figura 4.21 e Figura 4.22 a rotura de varões compósitos constituídos por fibras de vidro e de carbono, respetivamente. Assim, constata-se que a rotura quer nos varões com fibras de vidro, quer nos varões com fibras de carbono é muito localizada, apresentando-se a maior parte das vezes em pontos muito próximos da maxila. Este facto não é desejável, uma vez que indica que muito provavelmente não existiam apenas esforços axiais envolvidos, mas também esforços de corte que proporcionam concentração de esforços e desenvolvem pontos frágeis. Por isso, a configuração da maxila deve ser repensada tendo em conta a norma, de modo a provocar a rotura a meio do varão e evitar zonas de concentração de esforços como é evidente neste tipo de configuração. Além disso, o compósito com fibras de carbono evidenciou deslizamento e desfasamento do núcleo em relação ao entrançado.

Notar que este compósito é dotado de um conjunto de fatores que lhe confere um conjunto de propriedades não lineares pois apresenta muitas vezes comportamentos diversos e difíceis de estimar. Isto porque, há aspetos que ainda não estão muito claros, tal como a modo de ligação entre os constituintes dos varões. Esta incerteza do funcionamento interno do varão pode contribuir para comportamentos imprevisíveis e nem sempre desejados. Fatores como presença de vazios, imperfeição dos filamentos, processo de produção manual pouco industrializado devem ser refletidos e corrigidos, de modo a conhecer melhor o funcionamento do varão compósito.



Figura 4.21 – Tipologias de rotura de varões 1evmin_8_vidro



Figura 4.22 – Tipologias de rotura de varões 1evmin_8_carbono

Devido a este tipo de rotura apresentado e tendo em conta que foi aplicado um extensómetro para medição das deformações no centro do varão, pode-se dizer que os valores de deformação medidos não são totalmente corretos, podendo existir erros de medição muito significativos. Assim, os valores da rigidez apresentados, bem como a extensão associada ao valor máximo de força calculada para efeitos de análise analítica dos varões quando aplicados nas paredes, podem não corresponder à realidade uma vez que são valores incorretos. Isto porque, como a rotura ocorre em pontos de ligação com a maxila, o extensómetro não consegue registar totalmente as principais deformações do material, medindo apenas numa zona central do varão que nem sempre evidencia deformações importantes.

Em relação aos resultados dos varões cuja rugosidade é 0evmin, não foi possível alcançar resultados satisfatórios uma vez que no decorrer do ensaio existiu deslizamento em todos os varões nas maxilas, tal como se apresenta na Figura 4.23.



Figura 4.23 – Deslizamento dos varões 0evmin na maxila

Assume-se que os resultados seriam importantes para avaliar a influência da rugosidade na estrutura do entrançado em relação ao comportamento à tração do compósito. Contudo, uma vez que não foi possível atingir o sucesso do ensaio, não será feita essa análise. Numa fase posterior, poderá ser refletida uma nova solução da maxila tendo em conta o método preconizado pela norma, de modo a que não ocorra deslizamento dos varões sem rugosidade, isto é 0evmin.

4.4.3.2 Malhas

Tal como já se referiu, o sucesso dos ensaios à tração das malhas não foi o desejado, porém foi interessante desenvolver esta campanha uma vez que permitiu extrair importantes aspetos conclusivos do comportamento da malha. À medida que a malha foi submetida à tração, foi possível perceber que a presença dos varões transversais da área livre não interferem no desempenho da malha, isto porque as ligações existentes entre as duas direções através da aplicação de resina poliéster não são suficientes para que haja transmissão de cargas, e isso manifesta-se claramente na rotura imediata das mesmas. Com efeito, tracionar uma malha torna-se em tudo semelhante à tração de varões longitudinais, o que justifica o desinteresse em obter uma solução eficaz de amarras de modo a conseguir obter sucesso neste tipo de ensaios. Assim sendo, é importante destacar que a insuficiência das amarras pode estar relacionada com as forças de tração envolvidas neste tipo de ensaio, uma vez que a resistência que as duas amarras oferecem é maior que a resistência mobilizada, por exemplo, no arrancamento de malhas inseridas no reboco de alvenaria.

CAPÍTULO V

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE ENCHIMENTO

5.1 Introdução

Um dos aspetos importantes nesta dissertação é caracterizar o desempenho das malhas de reforço desenvolvidas através da sua aplicação em estruturas reais tais como paredes de alvenaria de enchimento. Para além da obtenção de valores característicos resistentes, também se pretende avaliar a interação entre a malha de reforço e a argamassa envolvente. Outro aspeto importante é o facto de poder avaliar a sua eficiência em relação a malhas comerciais, em termos de comportamento mecânico.

Nesta campanha experimental as paredes de enchimento são testadas à flexão simples cujo plano de rotura é perpendicular às juntas horizontais, pretendendo-se representar uma situação típica de comportamento de paredes de alvenaria de enchimento fora do plano sujeitas à ação sísmica, embora não seja a situação mais desfavorável. A situação mais desfavorável em termos de comportamento da alvenaria à flexão ocorre quando esta provoca plano de rotura paralelo às juntas horizontais da alvenaria.

Neste capítulo será feita uma descrição da campanha experimental no que diz respeito à caracterização das paredes e seus materiais, bem como todo o processo de construção e aplicação das malhas, procedimento de ensaio e resultados obtidos em termos de comportamento global e de propriedades mecânicas. Também é apresentada uma análise analítica do comportamento previsto nas paredes de alvenaria, de modo a estimar resultados expectáveis e efetuar uma comparação com os resultados experimentais.

5.2 Definição dos provetes de alvenaria

Na campanha experimental em questão pretende-se testar diferentes soluções de reforço (TRM) através da variação do tipo de malha a considerar. Um dos objetivos desta dissertação, é precisamente o desenvolvimento de malhas de reforço que sejam mais eficientes do que as

malhas comerciais selecionadas. Para ser possível efetuar essa análise, foram consideradas duas malhas comerciais e duas malhas produzidas, tal como se apresenta Quadro 5.1. De modo a ser efetuada uma comparação direta do desempenho das malhas fabricadas no Departamento de Engenharia Têxtil, foram definidas duas malhas de varões compósitos com núcleos de fibras de carbono e fibras de vidro, tal como são associadas as malhas comerciais associadas.

Quadro 5.1 – Definição das amostras a ser testadas

Designação das amostras	Descrição das amostras	Número de amostras
Referência	Parede de alvenaria sem malha de reforço	3
S&P	Parede de alvenaria com malha de reforço comercial S&P	3
Mapei	Parede de alvenaria com malha de reforço comercial Mapei	3
levmin_8_carbono	Parede de alvenaria com malha de reforço constituída por varões cujo núcleo é composto por multifilamentos de carbono e a estrutura do entrançado é do tipo “levmin_8” (ver Quadro 3.2)	3
levmin_8_vidro	Parede de alvenaria com malha de reforço constituída por varões cujo núcleo é composto por multifilamentos de vidro e a estrutura do entrançado é do tipo “levmin_8” (ver Quadro 3.2)	3
Total		15

5.2.1 Geometria dos provetes

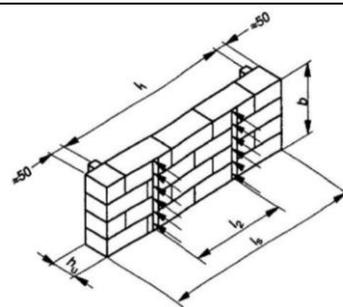
A definição da geometria surge na continuidade dos trabalhos já efetuados por Abreu (2011) e Gómez (2012) [6, 9] e é baseada na norma EN-1052-2-99 [43], no que diz respeito à normalização do ensaio de flexão simples com plano de rotura paralelo e perpendicular às juntas horizontais das paredes. Embora não seja a situação mais desfavorável, foi selecionado a configuração de flexão cujo plano de rotura é perpendicular às juntas para ser possível a comparação com resultados obtidos por autores anteriores [6, 9].

Assim, foi efetuada uma pesquisa de ensaios semelhantes de modo a avaliar que relações de esbelteza foram consideradas. Nos ensaios efetuados por Abreu (2011) [6] a relação de extensão/espessura da amostra era cerca de 5, o que é consideravelmente baixo e não cumpre integralmente as recomendações da norma (Quadro 5.2). O mesmo se repete no caso do

estudo desenvolvido por Gómez (2012) [9], embora a esbelteza já fosse mais adequada apresentando uma relação de extensão/espessura de cerca de 7 (Quadro 5.2). De facto, os valores de esbelteza apresentados não são os ideais, pois tornam a amostra muito rígida. Este aspeto pode não ser favorável para este tipo de ensaios uma vez que a amostra pode não apresentar um nível de deformação em flexão adequado para se potenciar o desempenho das malhas de reforço que, de acordo com estudos efetuados, é uma das principais vantagens do reforço TRM. Outros autores [23] apresentam trabalhos desenvolvidos em que a relação de esbelteza é maior, apresentando valores na ordem de 12, tal como se apresenta no Quadro 5.2. Neste trabalho pretendeu-se aproximar a esbelteza do valor apresentado por Rupika (2010) [23], tendo adotado um valor próximo de 10 de modo a tornar a amostra mais representativa da realidade, minimizar o efeito do esforço transversal e, para além disso, obter resultados que sejam mais diretamente comparáveis com os resultados apresentados pela bibliografia. Notar que, as dimensões consideradas para além de apresentar uma esbelteza muito próxima de 10, cumpre na íntegra as recomendações da norma EN-1052-2-99 [43], o que é favorável em termos de desempenho da amostra, ver Quadro 5.2 e Figura 5.1.

Quadro 5.2 – Diferentes relações de esbelteza de amostras ensaiadas à flexão simples

Referência	Parede (mm)			Blocos (mm)			Esbelteza (l_1/h_u)	Norma 1052-2-99 (mm)		
	b	l_1	h_u	h_u	b_u	h_u		$b > 3h_u$; $b > 240$	b = 4 h_u	Verificação
Abreu (2011) [6]	630	515	110	300	200	110	4,68			
Gómez (2012) [9]	630	1000	150	300	200	150	6,67			
Rupika (2010) [23]	390	930	75	210	100	75	12,40			
Dissertação	620	1400	150	300	200	150	9,33	450	600	OK



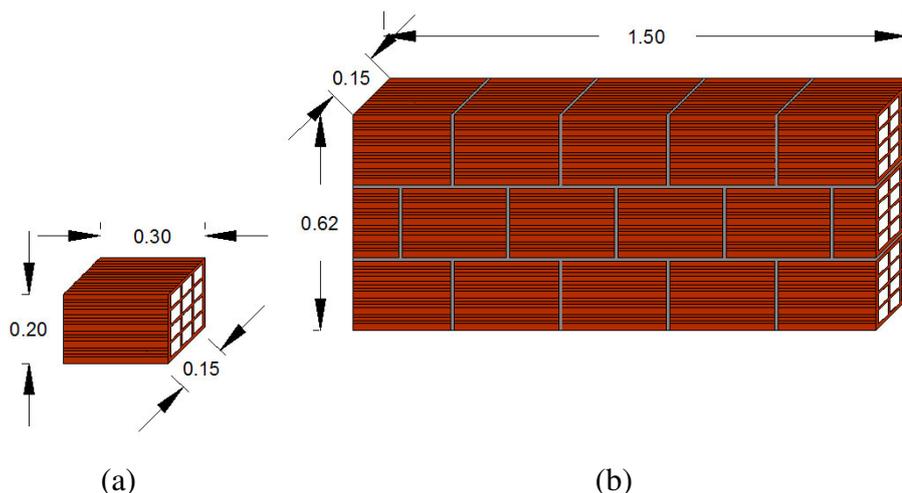


Figura 5.1 – Detalhe da geometria dos provetes; (a) geometria do tijolo; (b) Provete de alvenaria de tijolo (dimensões em metros).

Relativamente à configuração da aplicação da carga, adotou-se a configuração de flexão em 4 pontos de acordo com as recomendações da norma. Os apoios encontram-se distanciados do limite da parede de cerca de 50 mm, enquanto que os pontos de aplicação da carga se distanciam entre eles cerca de 350 mm e cerca de 525 mm do apoio. Esta configuração foi considerada tendo em conta que a norma recomenda a existência no mínimo de uma junta vertical entre os pontos de aplicação de carga, e neste caso existe no mínimo uma junta vertical em cada camada de tijolos. Para além disso, também foi nota de referência o trabalho efetuado por Gómez (2012) [9] que evidenciou roturas inesperadas por corte em casos em que a distância entre pontos de aplicação da carga era de 500mm. Esta ainda que normalizada conduzia a distâncias da carga muito próximas dos apoios promovendo as roturas por corte.

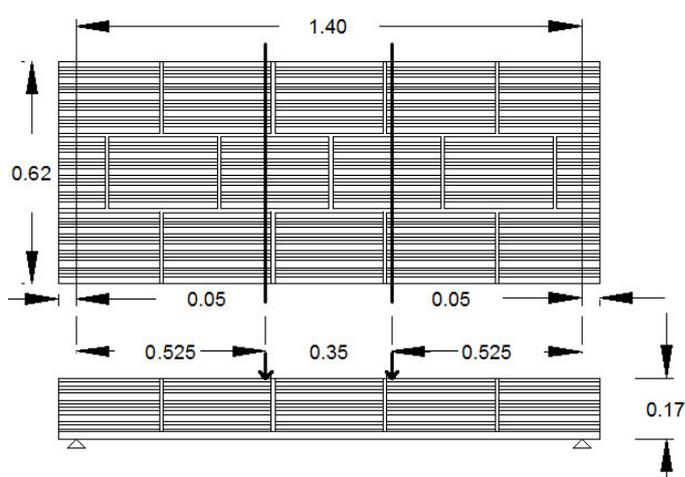


Figura 5.2 – Configuração de carga a aplicar no provete de alvenaria rebocado (dimensões em metros).

5.3 Caracterização dos materiais das paredes de alvenaria

5.3.1 Tijolo

As amostras das paredes de alvenaria são compostas por unidades de tijolo de uso comum na construção de paredes de enchimento. Note-se que apesar das paredes de enchimento serem paredes duplas, admite-se que o reforço será em princípio aplicado no pano exterior pela maior facilidade de aplicação do reforço. Foi selecionado tijolo de 15cm de espessura com as dimensões apresentadas uma vez que é um tipo de tijolo mais utilizado no pano exterior das paredes duplas.

O presente trabalho não contempla a caracterização mecânica experimental do material tijolo, uma vez que esta já foi efetuada por Gómez (2012) [9] e admite-se que se trata de valores de referência que podem ser utilizados neste trabalho. Desta forma, no trabalho efetuado ensaiaram-se tijolos à compressão uniaxial, na direção das perfurações, uma vez que esta é a direção em que o mesmo será comprimido quando a parede de alvenaria é ensaiada à flexão na direção perpendicular às juntas horizontais, tal como se demonstra na Figura 5.3.

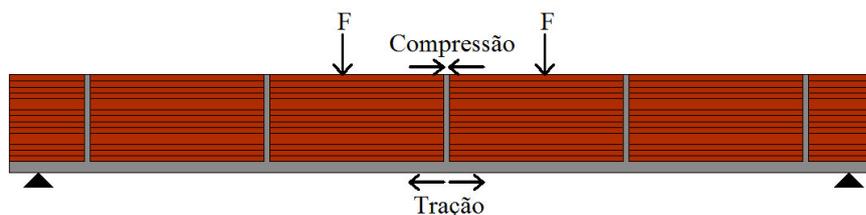


Figura 5.3 – Corte transversal representativo da direção da compressão dos tijolos no ensaio da parede à flexão simples cujo plano de rotura é perpendicular às juntas horizontais

Foram consideradas 4 amostras de tijolos submetidas a ensaio de compressão com base na norma EN 771-2 (2002) [44], das quais 3 revelaram resultados satisfatórios, tendo em conta o modo de rotura e valor de resistência obtidos. Assim, o valor de resistência à compressão médio foi de 4,5 MPa. Tendo em conta as dimensões do tijolo e o modo de carregamento foi feita a correção do valor médio pelo fator de correção δ , igual a 1,35, obtendo assim uma resistência à compressão normalizada do tijolo de 6,1 MPa, na direção paralela à furação do tijolo.

5.3.2 Argamassa

Na construção dos provetes e aplicação do reforço foram utilizadas dois tipos de argamassa: (1) argamassa para assentamento; (2) argamassa de reboco para a camada de reforço. Numa primeira fase, no assentamento dos tijolos, foi utilizada uma argamassa de assentamento designada por “AA – ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO Cinzenta, Tipo G M10”, enquanto que no reboco dos provetes foi utilizada a mesma argamassa da segunda campanha dos ensaios de aderência nos cilindros, ou seja, “AREM - Argamassa de Reboco Exterior Manual Hidrofugada – Ciarga”. De forma a existir controlo de qualidade de argamassa, foram feitos no mínimo três provetes a cada 3 paredes, com dimensões 40x40x160mm, com a finalidade de ser ensaiados à flexão e à compressão aos 28 dias de modo a conhecer as suas propriedades mecânicas com base na norma EN 1015-11 (1999) [37]. As amostras foram mantidas nas mesmas condições ambientais laboratoriais das paredes, mesmo que a norma mencionasse outro tipo de condições.

Na fase de construção das paredes foram efetuados testes de trabalhabilidade com base na norma EN 1015-3 (1999) [36], em que o valor do espalhamento da argamassa foi de cerca de 19 cm. Considera-se este valor um pouco elevado, o que seria facilmente corrigido pela redução da quantidade de água. No entanto, o objetivo era a obtenção de paredes construídas com base na prática habitual de construção e foi este nível de espalhamento considerado adequado pelo trabalhador que construiu as paredes. Por isso, considerou-se mais adequado proceder ao fabrico das mesmas conforme indicações de profissionais da área, em que adicionou cerca de 4,5 litros em cada 25kg de argamassa, em vez de 4 litros em casa 25 kg, segundo recomendações do fabricante.

Com efeito, a resistência à compressão da argamassa de assentamento é de cerca de 7,2 MPa com coeficiente de variação de 5%, enquanto que a resistência à flexão é de 2,4 MPa com coeficiente de variação de 5% também. Por outro lado, também foi efetuado o mesmo procedimento para o caso da argamassa de reboco, sendo o valor da trabalhabilidade registado de 17cm, tal como é recomendado para este tipo de aplicação. Assim, os valores obtidos foram de 1,02 MPa para a resistência à flexão com coeficiente de variação de 21,31% e 2,65 MPa para a resistência à compressão com coeficiente de variação de 3,87%.

Estes valores são mais baixos do que os valores apresentados pelas especificações técnicas mas admite-se que possam resultar da maior quantidade de água utilizada na amassadura da argamassa feita com uma misturadora mecânica.

5.3.3 Malhas - Metodologia de produção das malhas de reforço

Com base no pressuposto de desenvolver malhas de reforço equiparáveis às malhas comerciais, de modo a ser possível comparar coerentemente o comportamento de paredes reforçadas submetidas a ensaios de flexão simples, foi necessário proceder ao dimensionado correto das malhas a ser desenvolvidas através das características das malhas comerciais tais como capacidade resistente, espaçamento e densidade das mesmas. Assim, uma vez que as malhas comerciais S&P ARMO L500 e MAPEI Mapegrid G220 (ver Capítulo 3) são constituídas por fibras de carbono e de vidro respetivamente, um dos primeiros passos foi o cálculo do número de multifilamentos das fibras de carbono e de vidro (Figura 5.4) a utilizar nos varões das malhas desenvolvidas.



Figura 5.4 – Bobines preenchidas com fibra de carbono (esquerda) e fibra de vidro (direita)

Portanto, uma vez que a malha comercial S&P ARMO L500 é constituída por fibras de carbono na direção principal e fibras vidro na direção oposta, e se conhece o valor da densidade das fibras de carbono, o cálculo do número de multifilamentos de carbono de 1600tex necessário para a malha a fabricar é apresentado de seguida.

Tendo como base a densidade da malha comercial S&P ARMO L500 de 200 g/m e a densidade das fibras de carbono utilizadas nas malhas em desenvolvimento de 1600tex igual 1600 g/km, pretende-se conhecer o número aproximado de fios que se podem colocar num metro de malha. Para o efeito, foi necessário conhecer o espaçamento da malha comercial S&P ARMO L500, sendo este aproximadamente 25 mm. Dado o valor da largura do provete de alvenaria, a largura da malha seria do mesmo valor (0,62m) houve necessidade de colocar 23 fiadas de varões com espaçamento aproximado de 25mm, o que significa que num espaço de 1 metro se colocariam aproximadamente 38 fiadas. Apesar de o valor correto do número de fiadas fosse de 40 espaços correspondendo a 41 fios/m, foram considerados apenas 38 fios/m

uma vez que através da construção da malha se percebeu que seria impossível colocar os 41 fios/m.

Por outro lado, como a malha comercial S&P ARMO L500 possui 200g/m, e considerando os 38 espaços verifica-se que cada varão deverá ter 5,2g ($=200/38$). Como as fibras de carbono utilizadas possuem a densidade de 1600g em cada 1000 metros, em apenas 1 metro, possuem 1,6 g/m e como cada varão deverá ter 5,2 g, serão necessários 3 fios de carbono para o núcleo de reforço ($5,2/1,6=3,25 \approx 3$). Na direção transversal da malha, serão colocados varões cujo núcleo é ocupado por fibras de vidro, embora não se dimensione devido ao facto da malha em questão não apresentar especificações na direção transversal à direção solicitada à flexão. Por isso, considera-se por simplificação varões iguais aos varões utilizados nas malhas equivalentes à malha Mapei.

Por outro lado, os cálculos foram efetuados igualmente no caso da malha produzida equivalente à malha comercial MAPEI Mapegrid G220, sendo esta malha bidirecional em termos de composição da mesma. Tendo como base a densidade da malha comercial MAPEI:Mapegrid G220 de 225 g/m², obtém-se em cada direção uma densidade de 112,5 g/m. Tendo em conta a densidade das fibras de vidro utilizadas nas malhas em desenvolvimento de 544 tex (544 g/km) e de modo semelhante ao que foi explicado anteriormente adota-se o mesmo número de varões por cada metro de desenvolvimento, ou seja 38 fios/m.

Assim, sabendo que a malha comercial MAPEI Mapegrid G220 possui 112,5g/m, o valor de reforço a considerar em cada varão de material compósito é de 2,96g (m varão) ($112,5/38$). Como as fibras de vidro utilizadas possuem de densidade 544 g em cada 1000 metros (em apenas 1 metro possuem 0,544 g), serão necessários 5 fios de vidro em cada varão ($2,96/0,544=5,44 \approx 5$) utilizado em ambas as direções.

Deste modo, serão desenvolvidos varões cuja composição do núcleo possuem 3 multifilamentos de carbono 1600 tex e 5 multifilamentos de vidro de 544 tex. Notar que quer na malha de carbono, quer na malha de vidro, os valores de número de filamento de fibras por varão foram arredondados por defeito, o que quer dizer que efetivamente a densidade das malhas desenvolvidas não é exatamente a mesma das densidade das malhas comerciais, pois na verdade a densidade da malha desenvolvida de carbono representa cerca de $((3 \times 1,6 \times 38) / 200 \times 100 = (182,4 / 200) \times 100 \approx 91,2\%$ da malha comercial associada, enquanto que a malha de vidro desenvolvida representa cerca de $((5 \times 0,544 \times 38) / 112,5 \times 100 = (103,36 / 112,5) \times 100 \approx 91,9\%$ em termos de densidade em relação à respetiva malha comercial.

Por outro lado, na sequência dos ensaios de aderência, foi possível avaliar dentro do conjunto vasto das rugosidades estudadas, qual a rugosidade que conduziria a um melhor desempenho do compósito em termos da máxima força de aderência. Assim, numa fase em que a rugosidade já estaria selecionada, procedeu-se ao fabrico dos varões cujo núcleo era composto por 3 multifilamentos de fibras de carbono. No entanto, no início da produção verificou-se que era inviável a utilização do entrançado com a rugosidade com os melhores resultados em termos de força de aderência (levmax_8), uma vez que este não envolvia o núcleo completamente, deixando espaços abertos, o que expunha as fibras de carbono à superfície, ver Figura 5.5 (a). Este problema implicaria perda de capacidades resistentes do compósito, pois facilmente as fibras de carbono ficariam danificadas com o desgaste e perderiam qualidades. Na prática, uma das grandes vantagens da utilização deste tipo de compósito é precisamente o facto do material do interior do núcleo estar protegido, sem que haja exposição direta do mesmo à superfície do compósito. Caso fosse considerada a rugosidade em questão, esta qualidade do compósito deixaria de existir, o que não faz sentido pois existem outras rugosidades possíveis de se aplicar. Note-se que este problema não foi identificado anteriormente uma vez que nos ensaios de aderência, apenas se utilizou dois multifilamentos de fibras de carbono, o que implica um diâmetro de núcleo menor, permitindo a envolvimento total do mesmo no caso do entrançado cuja rugosidade é levmax_8. Uma vez que no caso das malhas de reforço é necessário implementar 3 multifilamentos de carbono, foi considerada a rugosidade alternativa que permite uma melhor aderência de forma a que sejam criadas todas as condições ao bom funcionamento do compósito. Portanto, assumiu-se que o entrançado cuja rugosidade é levmin_8 seria o mais adequado, (Figura 5.5 (b)), pois para além de ser uma alternativa à força máxima de aderência, o facto de ser a velocidade mínima permite que os multifilamentos de poliéster envolvam o núcleo central de uma forma mais confinada. Notar que este material possui uma maior elasticidade que a rugosidade anterior, pois os filamentos de poliéster estão muito mais entrançados que no caso anterior devido à velocidade adotada.

Uma vez alterada a rugosidade utilizada nas malhas de carbono, considerou-se oportuno manter as mesmas condições de fabrico de entrançados para o caso das malhas de vidro, embora neste caso pudesse ser aplicada a rugosidade considerada inicialmente, devido ao seu pequeno diâmetro quando comparado com o entrançado cujo núcleo com 3 multifilamentos de carbono.

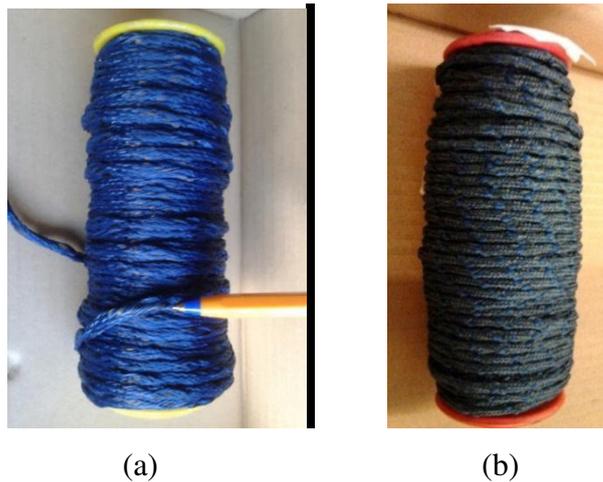


Figura 5.5 – (a) Pormenor das fibras de carbono à superfície no entrançado com rugosidade 1evmax_8; (b) Compósito com rugosidade 1evmin_8

No que diz respeito à metodologia de processo da construção das malhas, e sendo estas bidirecionais, considerou-se mais adequado proceder ao entrelaçamento intercalado entre os varões das duas direções, assumindo que, o relevo que as ligações dos varões das duas direções provoca, poderá eventualmente manifestar algum efeito de imbricamento e tornar-se uma rugosidade adicional no conjunto malha com a argamassa, ver Figura 5.6 e Figura 5.7.

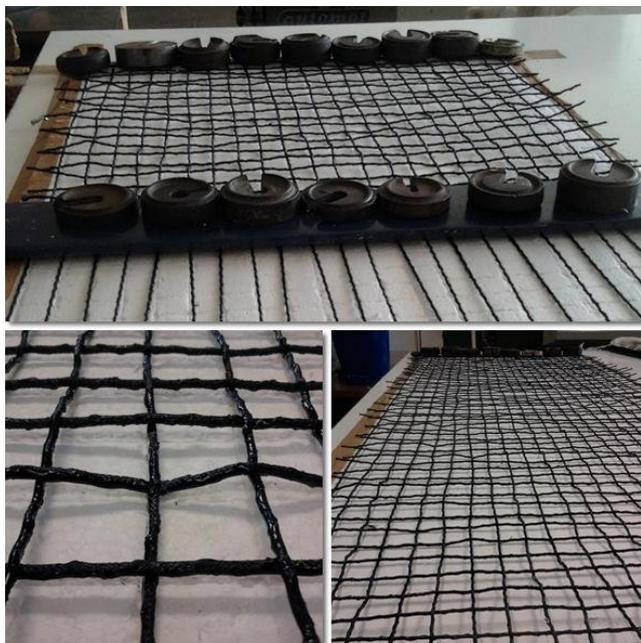


Figura 5.6 – Processo de fabrico de malhas de reforço e pormenor das ligações dos varões nas duas direções

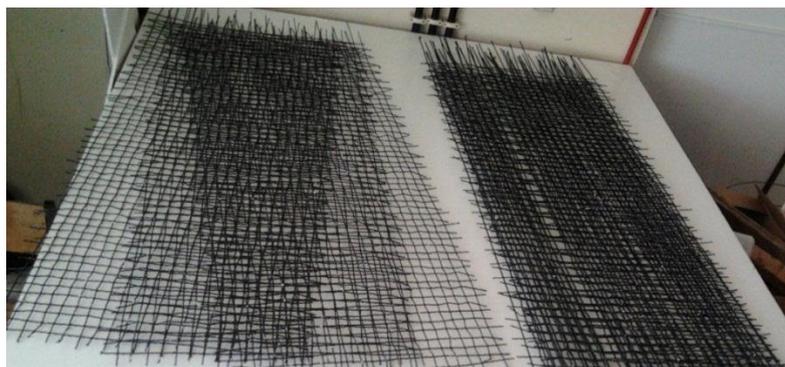


Figura 5.7 – Malhas de reforço a ser aplicadas nas paredes de alvenaria

Existem aspetos no fabrico das malhas de reforço que podem eventualmente interferir no seu desempenho e comportamento mecânico aquando aplicadas nas paredes de alvenaria. Isto porque é de difícil precisão garantir que todos os varões estejam dispostos com o mesmo espaçamento entre si. Para além disso, o facto de os varões não estarem devidamente alinhados na construção da malha, pode inviabilizar alguma capacidade resistente do material composto uma vez que as fibras constituintes do núcleo central possuem bom desempenho em termos de força axial mas não possuem um comportamento tão interessante quando submetidas a esforços de corte, que é o que acontece quando não permanecem alinhadas completamente na construção da malha. A estabilidade da malha foi assegurada pelas ligações naturais do cruzamento dos varões que permite o manuseamento necessário para aplicação das mesmas na parede de alvenaria.

5.4 Construção dos provetes de alvenaria

A construção dos provetes de alvenaria contou com a colaboração de profissionais experientes da área, de modo a criar as mesmas características construtivas das estruturas correntes. De facto, uma vez que estes provetes tinham como objetivo serem experimentalmente testados, existiu cuidado especial no que diz respeito à tentativa de controlo de propriedades dos materiais e da parede, com o objetivo de obter a máxima homogeneidade e uniformidade nas características do processo construtivo e resultado final. Para isso, tentou-se efetuar o controlo do fabrico da argamassa aplicada às paredes através de amostras de argamassa que foram ensaiadas posteriormente. No entanto, de modo a garantir as condições que habitualmente o trabalhador encontra em obra, optou-se por permitir que o trabalhador definisse a sua própria metodologia de construção de paredes de alvenaria, mesmo que contrariasse de certo modo as regras estabelecidas para o fabrico da argamassa.

Assim, a metodologia de construção utilizada pode ser descrita da seguinte forma:

- Imersão dos tijolos em água previamente à sua aplicação, a fim de evitar a secagem rápida da argamassa quando aplicada devido à sua absorção de água e, assim, evitar a redução das suas propriedades mecânicas e a adesão entre os tijolos e argamassa.
- Aplicação de argamassa para assentamento, nivelando e regularizando os tijolos na camada inicial, permitindo assim uma manipulação mais fácil das amostras para a sua movimentação, ver Figura 5.8.
- Controlo uniforme da quantidade de água da argamassa de acordo com as condições adequadas de trabalhabilidade para assentar os tijolos, conforme as recomendações do fabricante e experiência do profissional.
- Recolha de amostras de argamassa para posterior caracterização mecânica, nomeadamente à flexão simples (3 pontos) e compressão uniaxial, com base na norma EN 1015-11 (1999) [37].
- Controle da espessura das juntas e das dimensões dos provetes, bem como a sua regularidade em altura, ver Figura 5.8.



Figura 5.8 – Construção das paredes: Controlo da regularidade plana e espessura de juntas



Figura 5.9 – Fase final da construção das paredes: aplicação do chapisco

- Por último, procedeu-se à aplicação de uma fina camada de chapisco sobre uma face do provete, de modo a melhorar numa fase posterior a adesão ao reboco, ver Figura 5.9.
- Após a sua execução, aplicou-se água sobre as paredes para evitar a secagem rápida da argamassa. Em seguida, as amostras foram mantidas sob condições relativamente estáveis de temperatura e humidade no interior do laboratório.

5.5 Metodologia de aplicação das malhas de reforço

A fase final do processo de construção dos provetes a serem ensaiados consiste na aplicação do reboco reforçado três semanas após o assentamento dos provetes (Figura 5.10). Pretendeu-se aplicar no reboco das paredes os dois tipos de malhas comerciais apresentados, em conjunto com os dois tipos de malhas produzidas, tal como já foi referido. Também se considerou pertinente existir uma tipologia de reboco sem malha de reforço para poder servir como parede de alvenaria de referência.



Figura 5.10 – Metodologia de aplicação das malhas de reforço

Antes da aplicação do reboco, as paredes foram limpas de modo a eliminar possíveis impurezas e imperfeições que pudessem afetar a aderência, e, em seguida, adicionou-se água para evitar que os tijolos absorvessem a água da argamassa e esta se tornasse seca. Assim, foi aplicada uma fina camada de argamassa, com posterior colocação da malha de reforço embebida numa nova camada de argamassa de reboco, perfazendo uma espessura total de cerca de 20mm. Por outro lado, mesmo nas paredes não reforçadas, designadas como paredes

de referência, foi aplicado um reboco com espessura igual às restantes, ou seja, 20mm (Figura 5.10).

Durante a aplicação da malha de reforço, também foi tido em conta o mesmo processo de controlo de quantidade de água constante a adicionar na argamassa, bem como a recolha de amostras para futuros ensaios de caracterização mecânica da argamassa, nomeadamente ensaios de flexão (3 pontos) e de compressão com base na norma EN 1015-11 (1999) [37]. Tal como na construção dos provetes, foi tido em conta a máxima homogeneidade de processo de fabrico, de modo a criar os mesmos atributos em todas as amostras.

Notar que o reboco reforçado só foi aplicado numa das faces porque se pressupõe que numa situação real de aplicação do reboco no pano exterior da parede de fachada, apenas uma superfície está acessível para aplicação do reforço. Na face oposta considerou-se parede sem reboco, tal como deverá ser na realidade. Numa circunstância real, a rotura para fora do plano pode existir em qualquer uma das faces, pelo que a aplicação do reforço em ambas faces da parede de fachada seria nos dois panos. Mas também nesta situação apenas uma face é acessível.

Outro aspeto a reter tem a ver com o facto da malha ser aplicada em toda a extensão da parede, o que significa que, segundo a configuração do ensaio, a malha também será ancorada indiretamente aos elementos estruturais envolventes (pilares e viga do pórtico de betão armado).

5.6 Procedimento de ensaio

O pórtico de ensaio consiste numa estrutura de aço ligado a uma laje de reação na qual está associado um macaco hidráulico com uma capacidade de carga de 500 kN, ligado a uma célula de carga adicional de 200kN. Dado que o nível de carga envolvido nos ensaios é reduzido face à capacidade da célula de carga, verifica-se que os resultados obtidos podem apresentar algum ruído.

No que diz respeito à configuração do ensaio à flexão de paredes de alvenaria, foi considerado o mesmo procedimento que nos trabalhos anteriores efetuados por Gómez (2012) [9], Rupika (2010) [23], e por Triantafyllou et al. (2007) [29], embora neste último sejam apresentados ensaios de carregamento cíclico de flexão de 3 pontos. Para além disso, também foi tido em conta a norma EN 1052-2- 99 [43]. Desta forma, considerou-se como o vão livre de flexão,

um comprimento de 1400 milímetros, de acordo com as possibilidades de a estrutura auxiliar e com as relações de esbelteza mencionadas. A distância entre as duas linhas de aplicação da carga foi definida de acordo com a norma e o trabalho desenvolvido por Gómez (2012) [9], considerando-se como distância eficaz para avaliar os efeitos de flexão 350mm, tal como já se abordou na secção 5.2.

No que diz respeito ao procedimento de ensaio utilizado, foi considerado considerar ensaios monotónicos e ensaios cíclicos. Assim, as paredes não reforçadas e duas das paredes reforçadas foram ensaiadas monotinamente, enquanto que em cada tipologia de parede reforçada, um provete foi carregado ciclicamente de modo a avaliar o mecanismo de dissipação de energia envolvido neste tipo de estruturas reforçadas bem como as deformações plásticas desenvolvidas.

No que se refere ao ensaio monotónico, este desenvolveu-se em três etapas de acordo com os diferentes fenómenos observados, em que a aplicação de carga é controlada através da medição do deslocamento externo. A primeira etapa corresponde a uma velocidade de 0,004 mm/s durante os primeiros 6 milímetros. Por experiência dos trabalhos anteriores ([9]) é possível observar a parede a exibir as primeiras fendas que ocorre aproximadamente aos 1mm de deslocamento medido. A segunda etapa é efetuada a uma velocidade de 0,01 mm/s, durante os 4 milímetros seguintes de deslocamento, fazendo com que o reforço entre em carga após a parede apresentar as primeiras fendas. Na terceira e última etapa, o ensaio decorre a uma velocidade de 0,02 mm/s, de modo a conjugar o tempo total do ensaio disponível para cada parede com as elevadas deformações que a parede atinge.

No que diz respeito ao ensaio cíclico, foi testado numa das amostras a primeira lei de carregamento de modo a avaliar os mecanismos envolvidos e definir uma lei de carga adequada. Assim, a primeira lei de carregamento era composta por 7 ciclos cujas velocidades variavam entre ciclos, com base no procedimento e resultados obtidos nos ensaios monotónicos, resultando a lei de carregamento apresentada na Figura 5.11.

Porém, constatou-se mediante análise do diagrama força vs deslocamento do comportamento da amostra que faria mais sentido adotar um menor número de ciclos na fase inicial uma vez que não apresentava informação muito relevante e compensar a fase final com mais ciclos, de modo a avaliar a dissipação de energia patente numa fase não linear e por conseguinte obter mais informação acerca do comportamento de cada ciclo de uma forma mais gradual. Por isso, considerou-se a segunda lei de carregamento adotada na Figura 5.11.

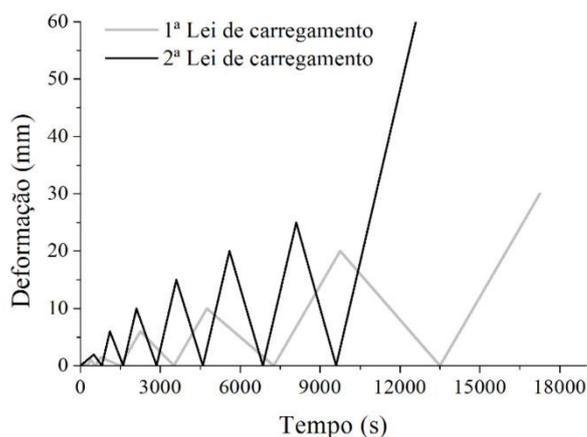


Figura 5.11 – Leis de carregamento

No que se refere aos dispositivos de medição, a deformação das amostras foi medida através de 4 LVDT's, com capacidade de medição de 50 mm: um dispositivo a meio do vão, um LVDT num ponto de aplicação da carga e dois entre o apoio e o ponto de aplicação, de modo a traduzir as deformações mais elevadas e a curvatura da parede, ver Figura 5.12 e Figura 5.13.

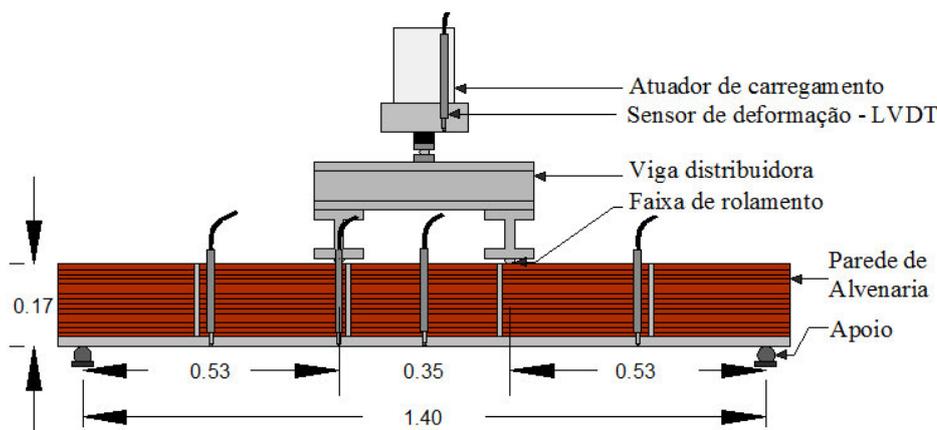


Figura 5.12 – Esquema representativo do esquema de ensaio de flexão nas paredes
(dimensões em metros)

Também foi utilizado um LVDT com a mesma capacidade de medição fixado no atuador utilizado como LVDT de controlo (Figura 5.13). Relativamente à aplicação da carga, o esquema estrutural adotado consiste num suporte simples conseguido através da utilização de hastes metálicas, adicionando um material entre a haste e a amostra designado por “massa de ferro” de maneira a evitar o atrito entre a amostra e a suporte de aplicação de carga (Figura 5.13).



Figura 5.13 – Esquema de ensaio de flexão de paredes de alvenaria

\

5.7 Resultados e análise de resultados

Nesta secção pretende-se apresentar os resultados para cada tipo de parede estudada individualmente de modo a que numa fase posterior se possa avaliar e equiparar o desempenho das malhas de reforço. Notar que, os dígramas das paredes são apresentados em termos de força em função do deslocamento registado no LVDT de controlo uma vez que o registo era praticamente igual ao registo do LVDT colocado na posição central da parede.

Foi determinado um conjunto de parâmetros a partir dos diagramas força-deslocamento obtidos, nomeadamente a carga correspondente à fendilhação F_{cr} , deslocamento correspondente ao início da fendilhação, δ_{cr} , força máxima, F_{max} e deslocamento correspondente à força máxima, δ_{max} . O momento máximo, M_{max} , é calculado tendo em conta a configuração de carga considerada (Figura 5.12), e a força máxima, F_{max} , sendo obtido pela expressão (5.1).

$$M_{max} = \frac{F_{max}}{2} \times 0,525 \text{ (kNm)} \quad (5.1)$$

Por outro lado, a rigidez elástica e a rigidez plástica são parâmetros determinados a partir de linhas de tendência lineares definidas no ramo linear (do início do gráfico até à F_{cr}) e no ramo plástico (de F_{cr} até à F_{max}), respetivamente. Notar que, embora não sejam apresentados, foi possível obter bons coeficientes de correlação (R^2), no desenvolvimento destas linhas de tendência.

5.7.1 Parede de referência

Na Figura 5.14 é apresentado o diagrama força-deslocamento das paredes sem reforço e no Quadro 5.3 estão resumidos os valores médios obtidos dos principais parâmetros que definem os diagramas força-deslocamento. Apresentam-se coeficientes de variação aceitáveis (C.O.V), embora o número de amostras seja apenas de três. Os deslocamentos associados à carga máxima apresentam alguma variabilidade e, por sua vez a rigidez elástica também, embora se considere normal existir alguma variabilidade.

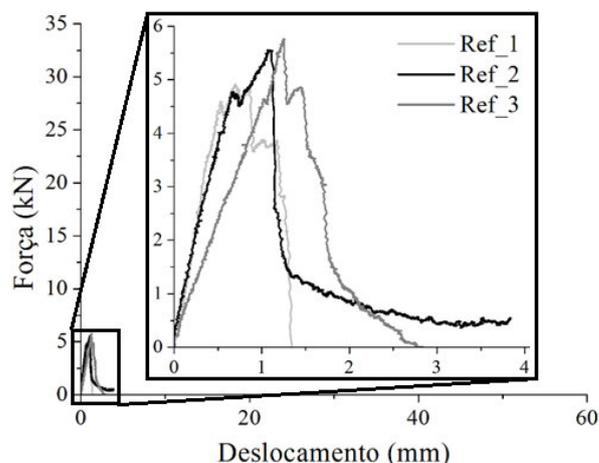


Figura 5.14 – Diagramas força – deslocamento das paredes de referência submetidas a ensaio de flexão

Quadro 5.3 – Resultados médios obtidos na parede de referência

	Referência	
	Média	C.O.V (%)
F_{cr} (kN) (aprox.)	4,55	1,21
δ_{cr} (mm)	0,73	33,24
F_{max} (kN)	5,41	8,14
δ_{max} (mm)	1,01	27,76
M_{max} (kNm)	1,42	8,14
Rigidez elástica (kN/mm)	6,90	34,83

Verifica-se que os valores de carga máxima, F_{max} , são relativamente baixos, sendo o comportamento associado bastante frágil (Figura 5.15 e Figura 5.16), o que se traduz numa rotura dos provetes brusca. A deformação atingiu valores relativamente baixos, uma vez que o material em questão é muito rígido e frágil.

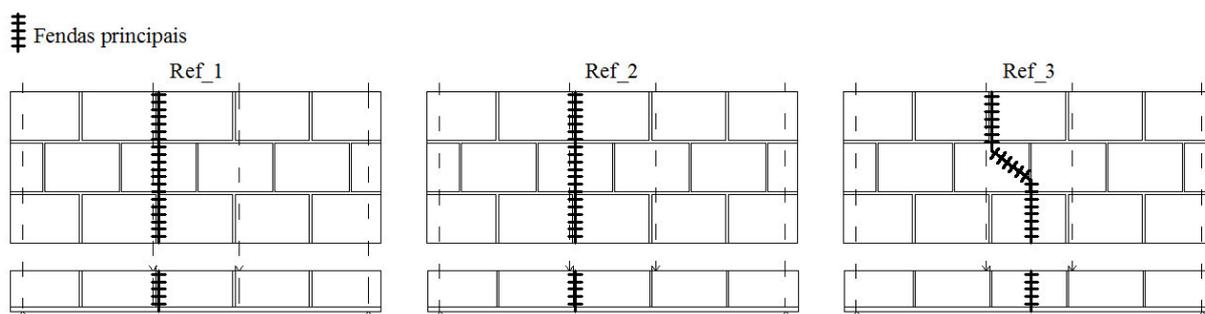


Figura 5.15 – Padrão de fendilhação dos provetes de referência



Figura 5.16 – Modo de rotura típico das paredes de referência

O comportamento das três amostras foi semelhante, apesar das amostras 2 e 3 evidenciarem de facto um comportamento menos frágil do que o provete 1. Este comportamento deve-se possivelmente à existência de uma quantidade de argamassa nas juntas verticais diferente entre as amostras que pode eventualmente promover alguns vínculos adicionais que permitem alguma deformação pós pico. Note-se que durante a construção das paredes se constatou que devido à argamassa ser muito fluida havia tendência de penetração da argamassa na furação horizontal quando se preenchia as juntas verticais. O padrão de fissuração resume-se à formação de uma fenda bem localizada, que acaba por dividir a parede totalmente em duas partes pouco tempo depois de atingir a carga máxima (Figura 5.15 e Figura 5.16).

Pretende-se obter a resistência à flexão da alvenaria, admitindo-se tensões normais de flexão numa secção homogénea e uniforme, em que se encontra no regime elástico até à rotura. Na norma EN1052-2-99 [43] é apresentada uma expressão simplificada do cálculo da resistência à flexão da alvenaria, expressão (5.2):

$$f_{x2} = \frac{3F_{i,max}(l_1-l_2)}{2bt_u^2} \quad (5.2)$$

sendo que,

$F_{i,max}$ – Carga máxima aplicada em cada ponto de reação, $\frac{F_{max}}{2}$ (N)

t_u – Profundidade de alvenaria, neste caso, 170mm

$(l_1 - l_2)$ – Diferença entre apoios e pontos de aplicação da carga, neste caso, $0,525 \times 2 = 1050\text{mm}$

b – Largura da secção, neste caso, 620mm

f_{x2} – Resistência à flexão da alvenaria (N/mm^2)

Substituindo os valores apresentados, obtém-se uma resistência à flexão da alvenaria de $f_{x2} = 0,24 \text{ N}/\text{mm}^2$.

O EC6 [10] apresenta para casos de alvenaria em que a linha de rotura da parede é perpendicular às juntas e resistência de argamassa de assentamento $f_m > 5\text{N}/\text{mm}^2$, (neste caso, $f_m = 7\text{N}/\text{mm}^2$), um valor característico de resistência da alvenaria de $f_{xk2} = 0,4\text{N}/\text{mm}^2$.

Os resultados obtidos apresentam um decréscimo de cerca de 40% em relação ao valor recomendado pelo EC6 [10]. Considera-se que a diferença pode residir na capacidade resistente da argamassa sofrer algumas alterações tendo em conta o processo manual adotado, uma vez que o EC6 [10] apresenta para casos em que a argamassa de assentamento é $f_m < 5\text{N}/\text{mm}^2$, valores de resistência característica de alvenaria de $f_{xk2} = 0,2\text{N}/\text{mm}^2$. Uma vez que o valor obtido se encontra entre os valores característicos recomendados, pode-se concluir que a diferença pode estar associada à capacidade resistente da argamassa de assentamento.

Por outro lado, pode-se também comparar com os resultados obtidos pelo autor Gómez (2012) [9], em que apenas variava a dimensão da amostra (comprimento \times largura de 1000mm \times 620mm) e por isso a diferença entre apoios e pontos de aplicação da carga (650mm). Este autor obteve resultados muito próximo dos resultados experimentais registados, com apenas 3% de diferença, podendo ser justificada pela variabilidade de construção uma vez que as paredes foram construídas por profissionais diferentes.

5.7.2 Malha S&P Armo L500

No que se refere às paredes com a malha de reforço unidirecional S&P Armo L500 com fibras de carbono na direção longitudinal, duas das amostras foram ensaiadas monotonicamente, enquanto que uma delas foi ensaiada ciclicamente. Como se pode verificar na Figura 5.17 o comportamento pré-pico é muito semelhante entre todas as amostras. No entanto, no comportamento pós-pico o mesmo não acontece uma vez que o provete 1 apresenta um desempenho consideravelmente dúctil, enquanto que os restantes provetes apresentam um comportamento frágil. De facto, as evidências registadas durante o ensaio, não justificam a diferença de comportamento pós pico entre as amostras 1 e as restantes, pois existiu quer num caso quer noutros, um comportamento à rotura bastante semelhante durante o ensaio. Além disso, em todas as amostras se registou um padrão de fissuração muito semelhante, tal como se apresenta na Figura 5.18 e Figura 5.19.

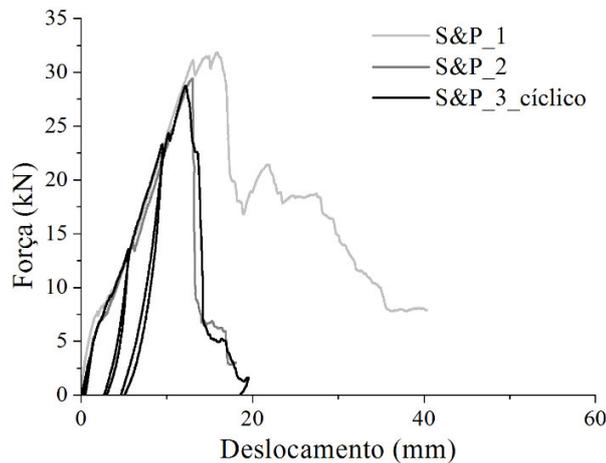


Figura 5.17 - Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com malha S&P Armo L500

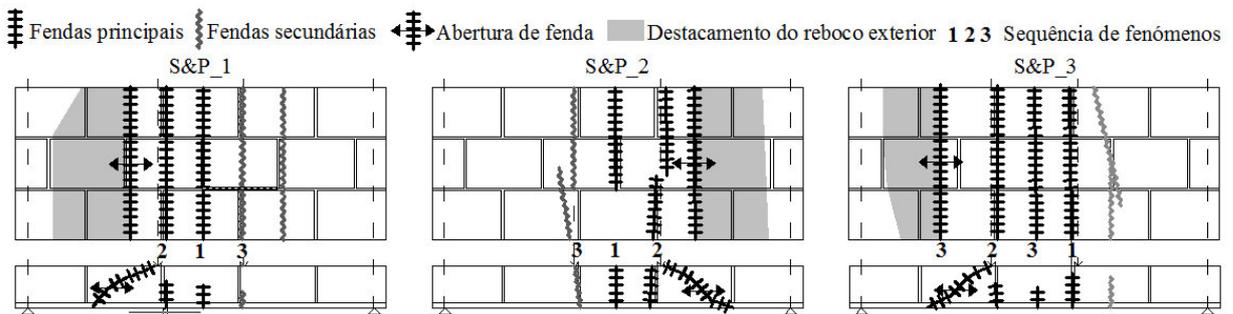


Figura 5.18 – Padrão de fendilhação das paredes com malha S&P Armo L500

Em todas as amostras existiu uma redistribuição de forças importante que proporcionou formação de múltiplas fendas principalmente na zona de flexão pura, embora na vizinhança

também tenha aparecido macro-fendas devido a fenômenos de corte. Explica-se que redistribuição de esforços neste tipo de análise não tem a ver com os fenômenos normais associados a uma estrutura hiperestática, uma vez que a estrutura analisada é puramente isostática. Por isso, esta expressão diz respeito à malha poder perder as suas capacidades em diferentes zonas, e a diferentes níveis de deformação, o que se traduz num padrão de múltiplas micro-fendas em vez da existência de uma macro-fendas de rotura.

A diferença existente entre a ductilidade das amostras pode estar simplesmente associada a qualquer tipo de efeito de travamento residual obtido, que permitiu adquirir um comportamento pós-pico com algum nível de resistência e com níveis de deformação elevados. Esta diferença pode também estar relacionada com o modo de rotura das paredes, uma vez que em todas elas a rotura ocorreu por corte, embora durante o ensaio sejam evidentes fenômenos de flexão tais como formação de múltiplas micro-fendas típicas de flexão pura associadas a uma curvatura elevada. Outro sinal da existência do comportamento de flexão é identificado no comportamento das paredes da Figura 5.17, em que é possível obter uma rigidez linear até à fendilhação, altura em que a rigidez apresenta uma considerável diminuição, na ordem dos 50% relativamente à rigidez elástica (Quadro 5.4).



Figura 5.19 – Modo de rotura típico das paredes reforçadas com malha S&P

Assim, admite-se que a rotura apresentada sucede de alguma forma de um comportamento inesperado, resultando de um modo misto em que, dado o nível de carga elevado, a resistência por corte não é suficiente, acabando por ocorrer rotura por corte (Figura 5.18 e Figura 5.19).

Por outro lado, salienta-se que os valores máximos de carga (F_{max}), são 5 vezes maiores do que os valores apresentados pela parede de referência, o que torna a aplicação do reforço de carbono muito vantajosa em termos de valores máximos atingidos. Relativamente à carga de

fendilhação deste tipo de parede, F_{cr} , não existe muita variação positiva relativamente à parede de referência, sendo superior em 22,5%, enquanto que a rigidez elástica média nestas paredes é 33% inferior à rigidez elástica média das paredes de referência.

Quadro 5.4 – Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha S&P Armo L500

	S&P Armo L500		$\Delta_{Referência}(\%)$
	Média	C.O.V (%)	
F_{cr} (kN) (aprox.)	5,58	17,52	122,54
δ_{cr} (mm)	1,39	3,54	190,35
F_{max} (kN)	28,20	15,59	521,13
δ_{Fmax} (mm)	12,78	24,94	1266,45
M_{Fmax} (kNm)	7,40	15,59	521,13
Rigidez elástica (kN/mm)	4,65	18,28	67,47
Rigidez plástica (kN/mm)	2,26		
$\Delta_{rigidez\ plástica/elástica}(\%)$	48,57		

Além disso, destaca-se os elevados níveis de deformação que são atingidos em comparação com a parede de referência, resultado imediato da existência da malha que proporciona uma degradação de rigidez à qual correspondem deformações crescentes, o que se traduz numa curvatura da parede acentuada. Por outro lado, uma vez ocorrida a localização da fendilhação que condiciona a rotura, as deformações aumentam continuamente provocando desagregação da argamassa exterior devido ao facto da malha se alongar de tal forma que faz com que a argamassa ligada a ela se destaque, acabando mesmo por gerar zonas sem argamassa exterior.

Em termos de valores máximos de força atingida, a variação não é significativa entre todas as amostras, embora o número de amostras não seja muito elevado, tal como se pode verificar no Quadro 5.4.

Os deslocamentos associados à carga máxima (δ_{Fmax}), apresentam alguma variabilidade, principalmente no caso da parede com um desempenho pós-pico relativamente dúctil, bem como a rigidez inicial.

Relativamente ao ensaio cíclico, é possível identificar claramente que o ramo virgem do gráfico acompanha inteiramente os restantes ensaios monotónicos, o que seria de esperar. Além disso, este tipo de parede foi ensaiado com a primeira lei de carregamento ensaiada, em que a maioria dos ciclos eram limitados por níveis de deslocamentos baixos, e, por isso, é possível entender de imediato que a informação obtida nesses ciclos não se torna muito relevante, daí ter-se modificado a lei de carregamento para níveis de deslocamentos mais elevados de modo a obter mais informação numa fase pós-pico. Não obstante, é possível

perceber que nos primeiros ciclos a deformação residual é praticamente nula visto que a parede recupera a posição inicial (comportamento elástico) enquanto que após abertura de fendas, o mesmo não sucede visto existirem deformações plásticas irreversíveis e possíveis de visualizar no gráfico da Figura 5.17. Apesar disso, é possível visualizar a diferença de inclinação existente nos ramos de descarga e carga entre os ciclos, tendo-se determinado a partir de linhas de tendências lineares em cada ramo de descarga a carga, a rigidez média associada a cada ciclo do carregamento de modo a perceber o seu decréscimo à medida que o carregamento aumenta, tal como se pode visualizar no Quadro 5.5 e Figura 5.20. Notar que os coeficientes de correlação (R^2) obtidos foram aceitáveis.

Quadro 5.5 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes com malha S&P

	Rigidez Descarga (kN/mm)	Rigidez Carga (kN/mm)	Média (kN/mm)	C.O.V (%)	Força (kN)	Deformação (mm)	$\Delta_{Rigidez\ elástica}$ (%)
Rigidez Elástica		4,97	4,97		5,01	1,44	
Ciclo 1	5,27	4,88	5,08	5,43	3,23	1,01	102,11
Ciclo 2	4,62	4,38	4,50	3,77	13,55	5,49	90,54
Ciclo 3	3,86	4,19	4,03	5,80	23,27	9,51	80,99

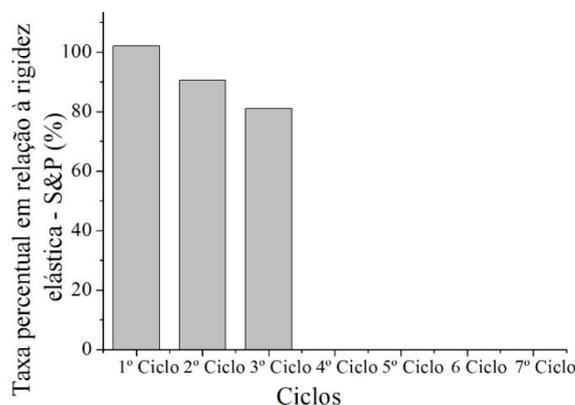


Figura 5.20 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha S&P

No entanto, verifica-se que a diferença não é muito significativa o que se traduz em ciclos de carga e descarga muito pouco dissipativos devido ao comportamento predominantemente linear até ao pico (rigidez plástica). A partir dos cálculos obtidos, é possível obter correlações entre a rigidez média de cada ciclo em função da deformação e do nível de carga associados a cada nível de carregamento, tal como se pode visualizar na Figura 5.21. Verifica-se que existe uma correlação linear entre a rigidez e a deformação e entre a rigidez e o nível de força para

cada ciclo. Observa-se a partir das correlações que a rigidez decresce mais rapidamente em função do deslocamento em comparação com o decréscimo de rigidez em função da força. De facto, esta tendência é compreensível devido ao facto da deformação atingir valores mais altos que a força. Além disso, os coeficientes de correlação (R^2) justificam a ótima aproximação das linhas de tendências calculadas.

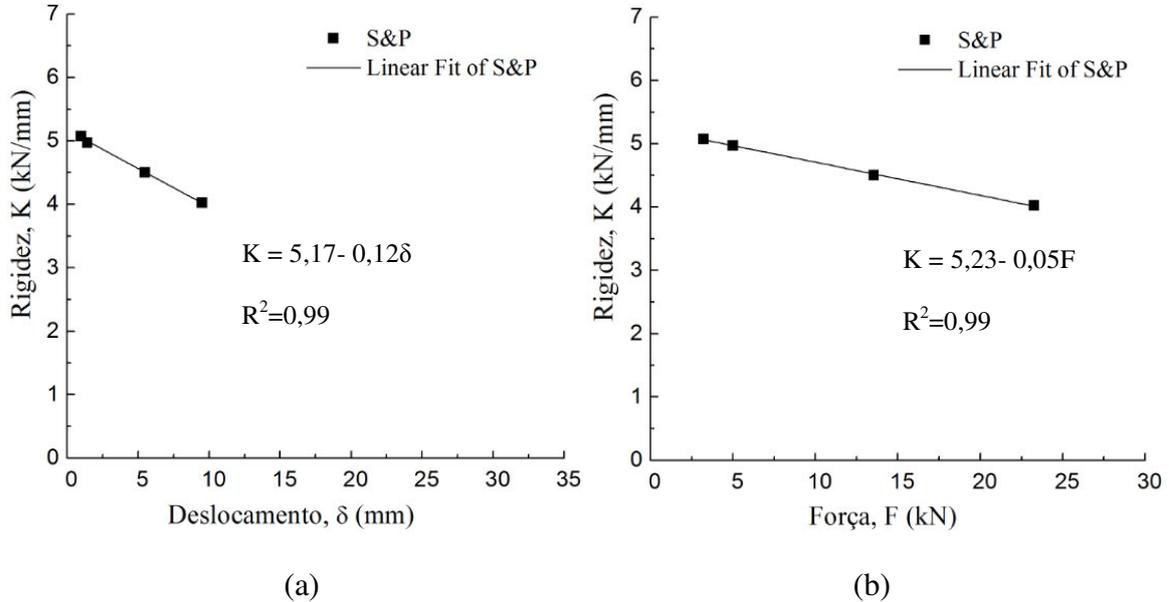


Figura 5.21 – Correlação entre a rigidez e: (a) deformação; (b) força

5.7.3 Malha 1evmin_8_carbono

Relativamente à parede cuja malha de reforço é 1evmin_8_carbono, a análise de resultados deve ser feita em comparação com a malha S&P. Numa primeira análise do comportamento deste tipo de paredes reforçadas a partir da Figura 5.22 (a), constata-se que o provete 2 foi carregado ciclicamente de uma forma não uniforme devido a descargas elétricas ocorridas durante o ensaio, o que resulta num gráfico com algum ruído irreparável, embora apresente o mesmo aspeto que os restantes provetes. Por isso, considerou-se os resultados obtidos para efeitos de média de igual forma que os restantes provetes, no entanto, para efeitos de representação das curvas se considere pertinente considerar apenas as curvas da Figura 5.22 (b). Relativamente ao comportamento pré-pico, existe tal como no caso da malha S&P, sucessiva redistribuição de forças considerável que permite a formação de múltiplas microfendas de flexão. A força de fendilhação registada neste tipo de parede é mais elevada em cerca de 34% em relação à parede de referencia, enquanto que a força máxima regista um aumento de 544% relativamente à parede de referência. Em contrapartida, a rigidez elástica

deste tipo de parede apresenta apenas 57% da rigidez registada na parede de referência (Quadro 5.6).

A redução de rigidez após o início de fendilhação por flexão é de 60% da rigidez elástica da parede, passando a exibir uma deformação muito interessante até um nível de resistência elevado, sendo a rotura final motivada pela fendilhação por corte.

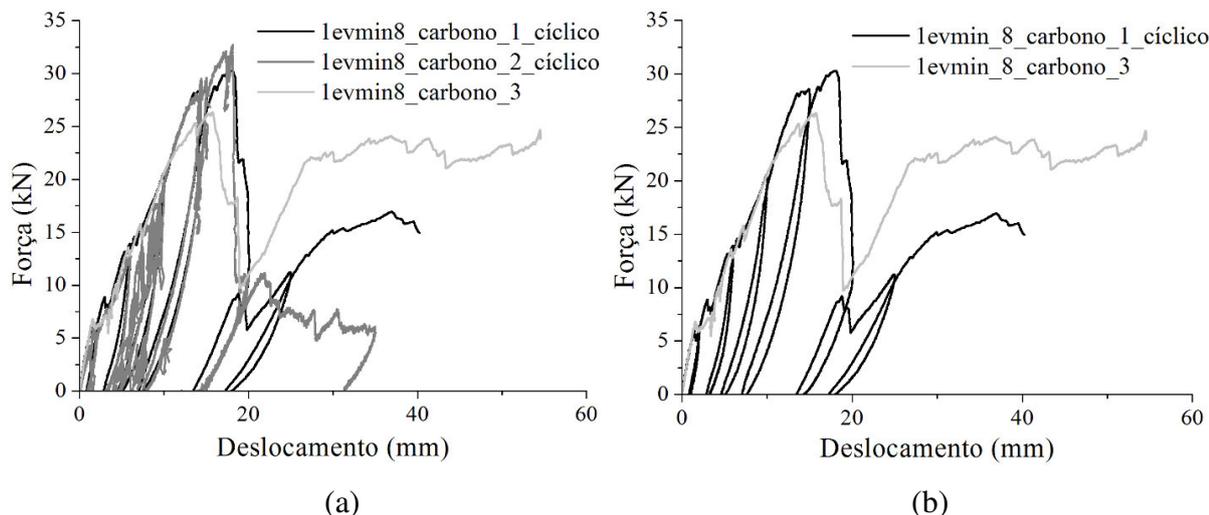


Figura 5.22 – Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço levmin_8_carbono (a) totais; (b) válidos

Quadro 5.6 - Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha levmin_8_carbono

	levmin_8_carbono		$\Delta_{Referência}(\%)$
	Média	C.O.V (%)	
F_{cr} (kN) (aprox.)	6,11	11,20	134,26
δ_{cr} (mm)	2,00	35,38	273,71
F_{max} (kN)	29,44	9,45	544,09
δ_{Fmax} (mm)	16,99	7,11	1683,09
M_{Fmax} (kNm)	7,73	9,45	544,09
Rigidez elástica (kN/mm)	3,98	15,26	57,71
Rigidez plástica (kN/mm)	1,60		
$\Delta_{rigidez\ plástica/elástica}$ (%)	40,20		

Pode-se dizer que à semelhança das paredes reforçadas com a malha comercial de carbono, existe a combinação de um comportamento predominantemente de flexão com corte, mas a carga máxima deverá ser condicionada pela resistência ao corte (Figura 5.23 e Figura 5.24), possivelmente devido à fraca resistência de corte comparando com a resistência à flexão. Notar que os valores resistentes apresentam pouca variabilidade apesar do número de amostras não ser muito elevado.

Relativamente ao comportamento pós-pico, é possível perceber que após rotura e perda de carga, a malha recupera quase a totalidade da força máxima no caso do provete 3 (cerca de 93% da carga máxima), embora o mesmo não aconteça no provete 1 talvez devido ao facto do carregamento ser cíclico e ter atingido uma resistência mais elevada, ainda que a tendência de recuperação seja semelhante (recuperação de 50% da carga máxima).

No provete 2, não se verifica recuperação de carga mas deve referir-se que o comportamento pós-pico do provete foi obtido após a paragem do ensaio numa primeira fase devido a descargas elétricas existentes. Posteriormente, tentou-se retomar o ensaio mas verifica-se que o provete é incapaz de recuperar a carga.

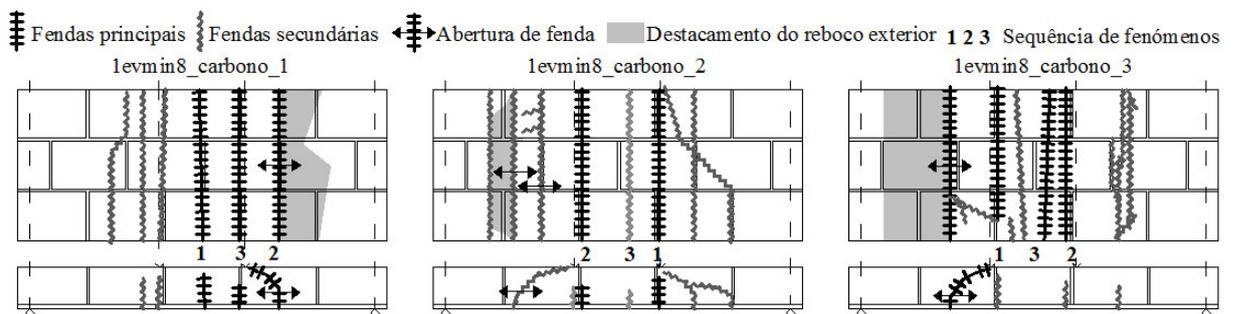


Figura 5.23 - Padrão de fendilhação das paredes com malha levmin_8_carbono

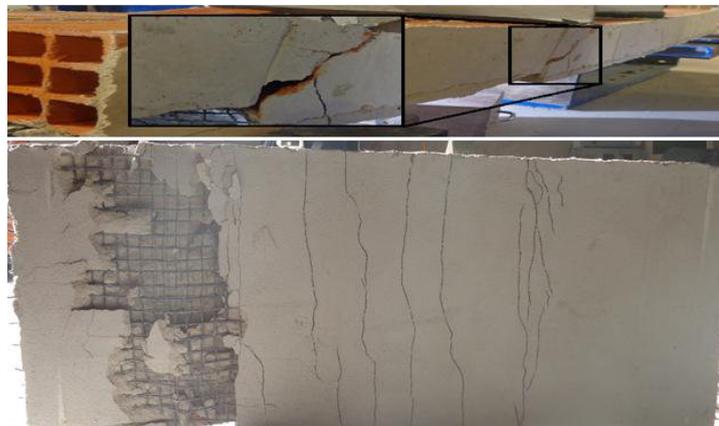


Figura 5.24 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha levmin8_carbono

A recuperação da força resistente e o patamar visível nos provetes 1 e 3 tornam-se muito importantes uma vez que permitem que a parede apesar de ter fendilhação considerável, consiga assegurar até altos níveis de deformação, níveis de carga muito satisfatórios. Este comportamento é de todo interesse neste trabalho cujo objetivo principal é obtenção de comportamentos dúcteis no comportamento fora do plano de paredes de alvenaria de enchimento e distingue claramente de forma positiva a malha desenvolvida da malha

comercial. Note-se que em termos médios a malha desenvolvida apresenta uma resistência muito semelhante (superior em 4,4%) ainda que tenha apenas 91% da quantidade de reforço da malha comercial. O efeito de recuperação da resistência deve estar associada ao facto dos multifilamentos de carbono não sofrerem rotura no mesmo instante, o que contribui para a formação de múltiplas fendas em diferentes zonas (Figura 5.23 e Figura 5.24), mediante as roturas individuais de cada multifilamento de carbono. Por outro lado, a presença do material poliéster a envolver o núcleo permite que, no momento em que parte do núcleo resistente rompe, este confira à parede níveis de carga não muito elevados, mas suficientes em conjunto com alguma percentagem de núcleo que ainda resista, de maneira a exibir a sua elevada deformação sem que haja perda total da resistência da parede. Notar que a presença de um fio de rugosidade torna-se muito importante para, além de promover a aderência, poder contribuir ainda mais para a deformação axial do material uma vez que esta estrutura é aplicada numa forma helicoidal, o que faz com que, submetida a forças axiais, estique e proporcione níveis de deformação elevados. Devido ao baixo poder de plasticidade de argamassa, esta não consegue acompanhar estas deformações, acabando mesmo por existir o destacamento da argamassa exterior uma vez que se vai desagregando à medida que a malha de reforço fica mais tencionada por causa da transferência de cargas gradual ocorridas ao longo do ensaio.

No que diz respeito ao carregamento cíclico aplicado neste tipo de paredes, já foi considerada a segunda lei de carregamento, em que os ciclos de descarga e recarga foram impostos para níveis de deformação mais elevado do que no caso da malha comercial S&P. Verifica-se que o desempenho da parede carregada ciclicamente acompanhou muito bem a tendência normal das paredes carregadas monotonicamente (ramo virgem) (Figura 5.22).

Quadro 5.7 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes levmin_8_carbono

	Rigidez Descarga (kN/mm)	Rigidez Carga (kN/mm)	Média (kN/mm)	C.O.V (%)	Força (kN)	Deformação (mm)	$\Delta_{Rigidez\ elástica}$ (%)
Rigidez elástica		4,29	4,29		6,25	1,41	
Ciclo 1	4,81	4,73	4,77	1,19	6,13	2,00	111,19
Ciclo 2	4,05	4,05	4,05	0,00	13,44	6,01	94,41
Ciclo 3	3,5	3,55	3,53	1,00	19,94	10,02	82,17
Ciclo 4	3,27	3,29	3,28	0,43	28,00	15,00	76,46
Ciclo 5	1,81	1,68	1,75	5,27	13,18	20,00	40,68
Ciclo 6	1,5	1,38	1,44	5,89	11,03	25,01	33,57

Por outro lado, foi possível verificar o nível de deformações plásticas atingido em cada ciclo, bem como a perda de rigidez associada apresentada no Quadro 5.7 e Figura 5.25.

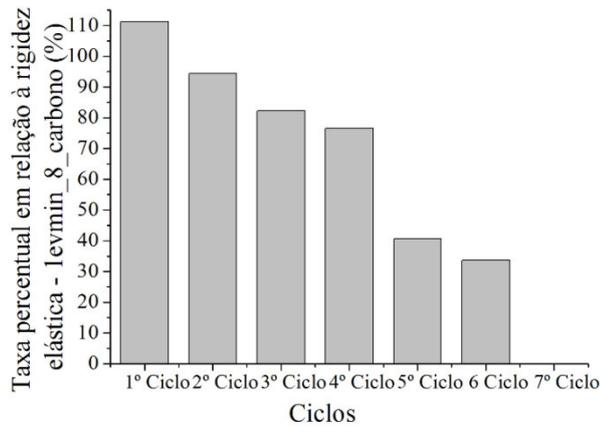


Figura 5.25 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha levmin_8_carbono

Do mesmo modo, é possível visualizar a tendência linear com uma aproximação boa da rigidez média de cada ciclo em função da deformação e da força associada a cada ciclo de carga. Pode-se constatar que a rigidez diminui mais rapidamente à medida que a deformação da parede aumenta do que propriamente com o aumento da força, tal como no caso anterior da malha S&P (Figura 5.26). Refira-se por último que as deformações plásticas associadas aos diferentes ciclos de carga são superiores neste caso do que nas paredes com malha comercial, o que resulta de um comportamento não linear no regime de pré-pico mais significativo.

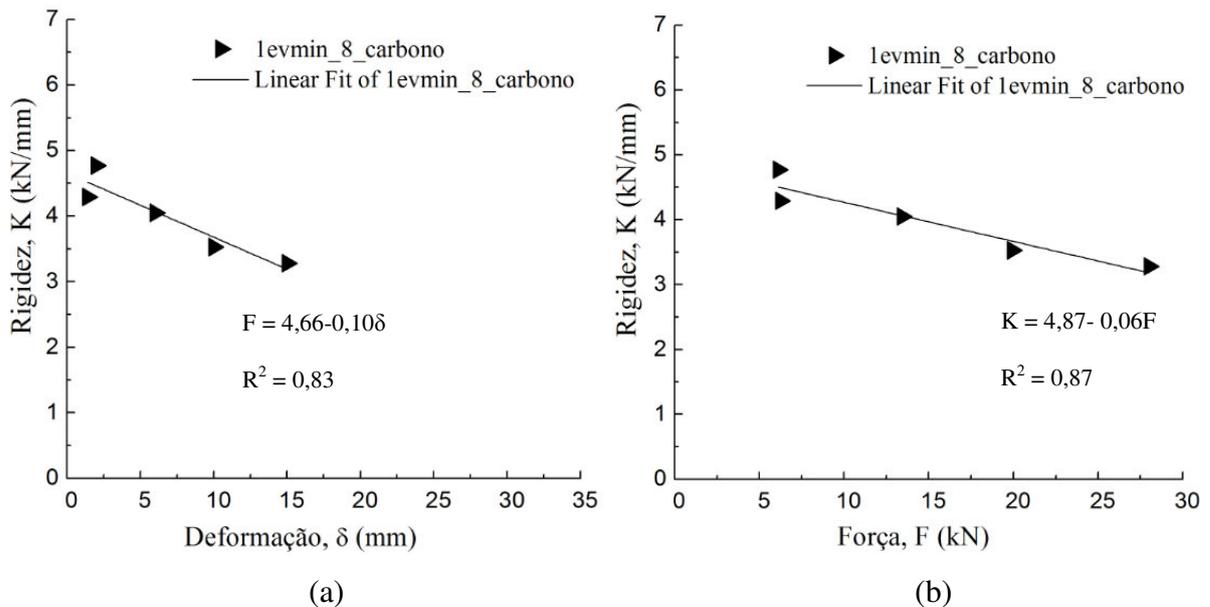


Figura 5.26 – Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força

5.7.4 Malha Mapei Mapegrid G220

Relativamente à malha Mapei Mapegrid G220, apresenta-se na Figura 5.27 o comportamento dos três provetes ensaiados segundo a segunda lei de carregamento (cíclico). Salienta-se a existência de vários picos de carga associados à perda e rápida recuperação de forças devido ao facto da malha não perder a sua capacidade de imediato, uma vez que esta é constituída por vários varões que vão rompendo em níveis de deformação diferentes. A rápida recuperação de forças após abertura da primeira fenda pode ter a ver com o facto das fibras estarem em contacto direto com a argamassa, o que permite a ligação e transferência imediata de esforços, enquanto que no caso das malhas produzidas o mesmo não se aplica devido à existência do material poliéster a envolver o núcleo resistente.

Por outro lado, salienta-se a diminuição muito mais acentuada da rigidez registada no comportamento após abertura de fendas, representando apenas cerca de 9% da rigidez elástica da parede, tal como se pode verificar no Quadro 5.8.

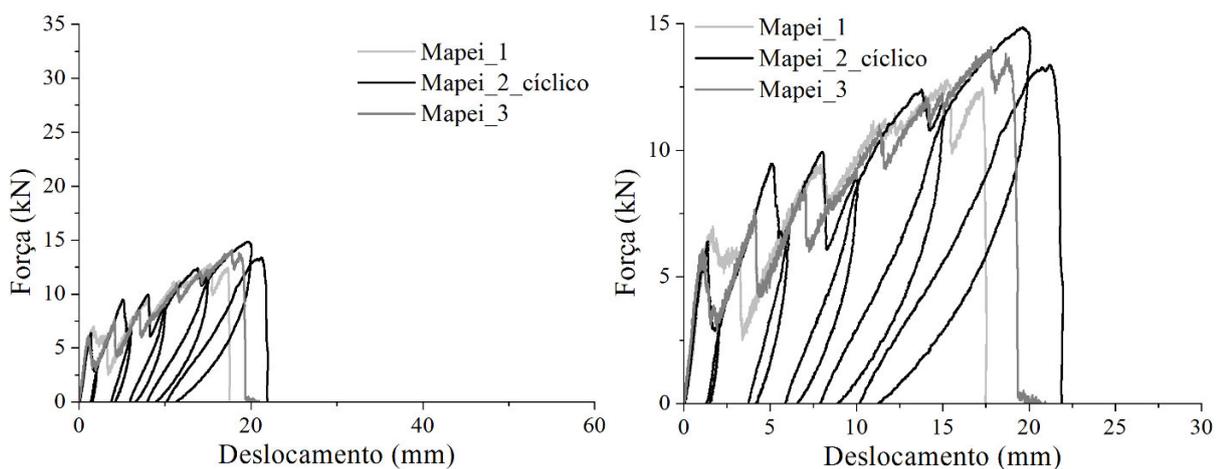


Figura 5.27 – Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço Mapegrid G220

Todos os provetes reforçados com este tipo de malha apresentaram roturas frágeis, residindo nesta característica a principal desvantagem da utilização deste tipo de malha comercial. De facto, apesar ter existido no decorrer do ensaio fenómenos de redistribuição de forças que proporcionou a formação de algumas fendas de flexão, a parede apresentou rotura frágil, dividindo-a totalmente em duas partes aproximadamente a meio vão, no momento em que a malha mapei rompe na totalidade (Figura 5.28 e Figura 5.29).

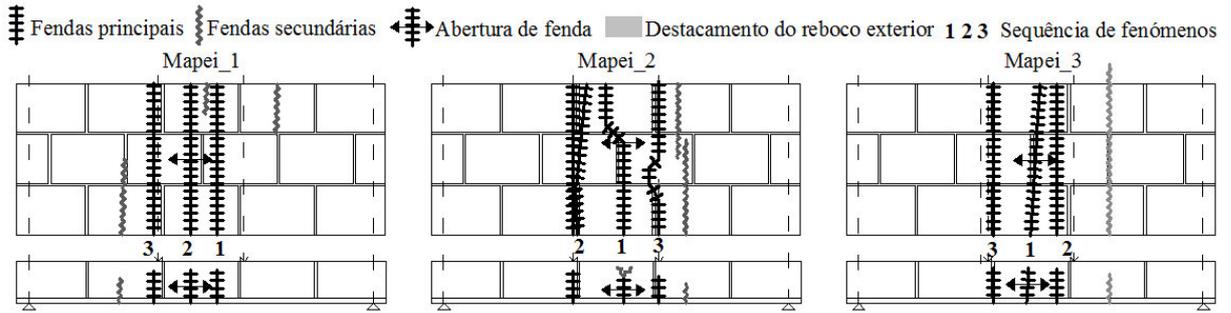


Figura 5.28 - Padrão de fendilhação das paredes com malha Mapei Mapegrid G220

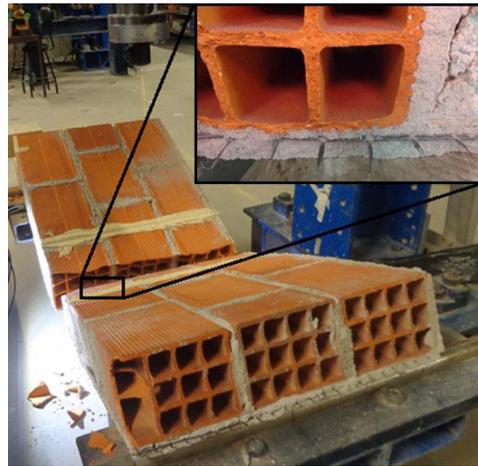


Figura 5.29 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha Mapei

A força de fendilhação neste tipo de paredes é mais elevada em cerca de 22% em relação à parede de referência e no caso do valor máximo atingido, existe uma relação de 226%. A rigidez desta tipologia é mais baixa em cerca de 20% relativamente à rigidez da parede de referência. Os valores dos parâmetros avaliados apresentam alguma variabilidade aceitável (Quadro 5.8).

Quadro 5.8 - Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha Mapegrid G220

	Mapei Mapegrid G220		$\Delta_{Referência}(\%)$
	Média	C.O.V (%)	
F_{cr} (kN) (aprox.)	5,56	8,12	122,23
δ_{cr} (mm)	1,03	12,71	141,56
F_{max} (kN)	12,27	17,22	226,74
δ_{Fmax} (mm)	13,68	37,14	1355,71
M_{Fmax} (kNm)	3,22	17,22	226,74
Rigidez elástica (kN/mm)	5,64	11,47	81,81
Rigidez plástica (kN/mm)	0,50		
$\Delta_{Rigidez\ plástica/elástica}$ (%)	8,86		

Relativamente ao carregamento cíclico, verifica-se que o comportamento cíclico no regime de pré-pico é satisfatório, acompanhando as curvas dos carregamentos monotónicos de uma forma muito semelhante. O efeito de redistribuição é muito relevante também no desempenho desta parede, não perdendo suas capacidades resistentes devido às descargas e cargas de cada ciclo. Também neste caso é possível identificar claramente as deformações plásticas permanentes em cada ciclo. No Quadro 5.9 e Figura 5.30 é apresentado os valores da rigidez média obtidos em cada ramo de descarga e carga de cada ciclo, bem como a perda de rigidez evidenciada à medida que o a deformação aumenta.

Quadro 5.9 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes com Mapegrid G220

	Rigidez Descarga (kN/mm)	Rigidez Carga (kN/mm)	Média (kN/mm)	C.O.V (%)	Força (kN)	Deformação (mm)	$\Delta_{Rigidez\ elástica}$ (%)
Rigidez elástica		5,17	5,17		5,10	0,98	
Ciclo 1	5,12	4,32	4,72	11,98	3,17	2,07	91,30
Ciclo 2	3,03	2,78	2,91	6,09	6,92	6,04	56,19
Ciclo 3	1,98	1,94	1,96	1,44	8,77	10,04	37,91
Ciclo 4	1,53	1,54	1,54	0,46	11,76	15,06	29,69
Ciclo 5	1,32	1,28	1,30	2,18	14,38	20,03	25,15

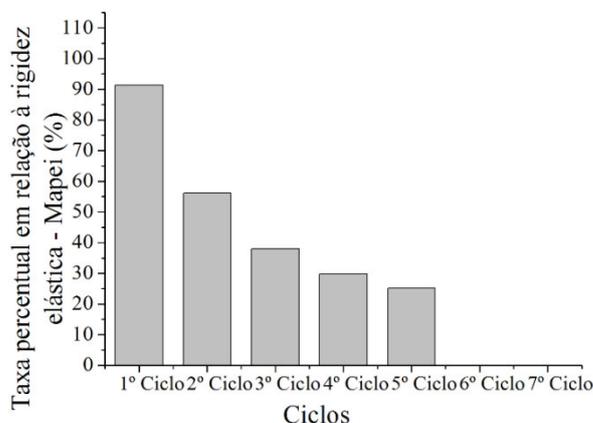


Figura 5.30 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha Mapei Mapegrid G220

A partir dos resultados obtidos foi possível obter uma tendência exponencial com boa aproximação entre a perda de rigidez associada às deformações e forças em cada ciclo. Notar que no caso da correlação entre a rigidez e força, a aproximação não é tão boa devido à existência de fenómenos de redistribuição em que o ciclo pode começar num momento em que existe perda de resistência, embora a tendência geral do gráfico traduza aumento de força (Figura 5.31).

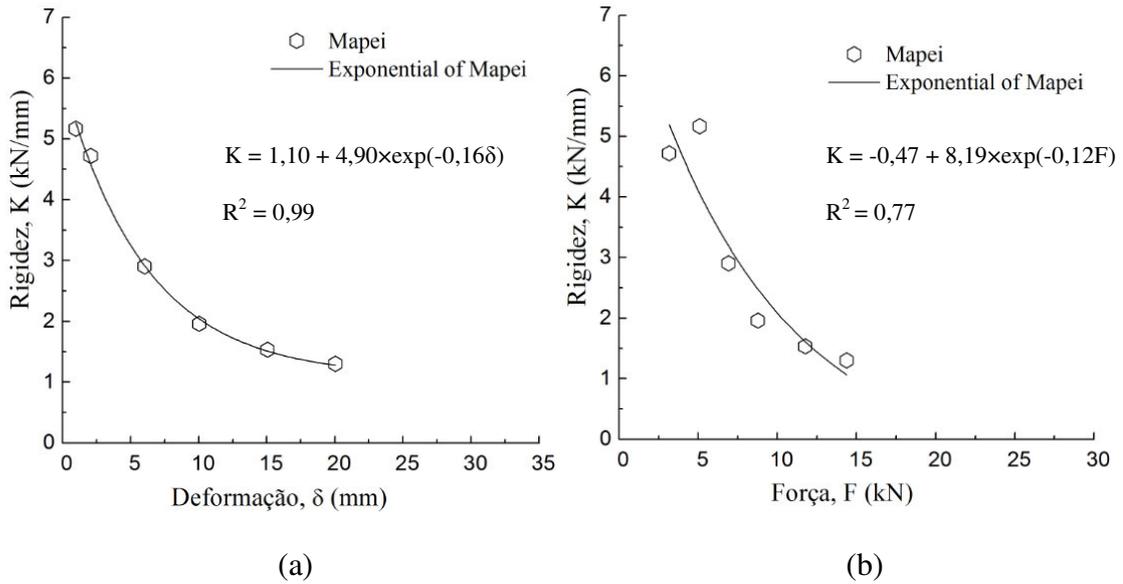


Figura 5.31 - Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força

5.7.5 Malha levmin_8_vidro

No que diz respeito aos provetes com a malha produzida levmin_8_vidro, é representado na Figura 5.32 o desempenho das amostras em termos de força vs deslocamento, enquanto que no Quadro 5.10 apresentam-se os valores característicos que definem estes diagramas. Estes resultados apresentam alguma variação na carga de fendilhação e nos deslocamentos associados, bem como na rigidez inicial, apesar de nos restantes parâmetros avaliados existir aceitáveis coeficientes de variação (C.O.V).

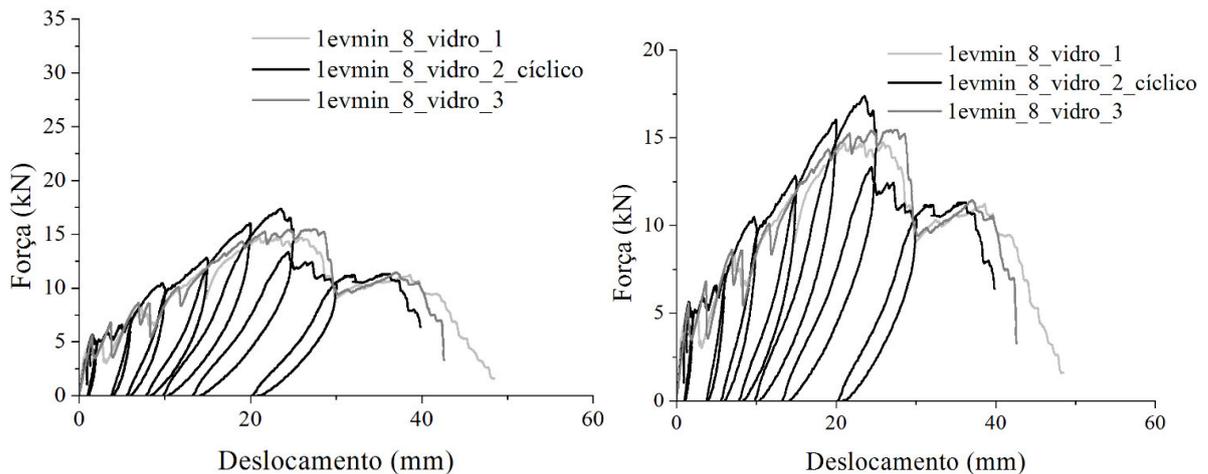


Figura 5.32 - Diagramas força – deslocamento das paredes reforçadas com a malha de reforço levmin_8_vidro

Após regime elástico, existe um decréscimo de rigidez de aproximadamente de 90%, até atingir uma resistência máxima aproximadamente 3 vezes superior à obtida na parede de referência. No que diz respeito à máxima carga de início de fendilhação, pode-se constatar que existe apenas um aumento de 10% relativamente à parede de referência (Quadro 5.10).

Relativamente ao comportamento pós-pico, existe perda de resistência, mas tal como acontece nos restantes caso de paredes reforçadas, existe redistribuição de forças uma vez que os varões não perdem resistência num instante imediato, o que permite assegurar níveis de carga interessantes para elevadas deformações (cerca de 60% da carga máxima). Por outro lado, tal como acontece no caso da malha produzida com fibras de carbono, existe a contribuição do material de poliéster que confere à estrutura da malha a vantagem de suportar algum nível de resistência e promover elevadas deformações, permitindo obter comportamentos dúcteis muito interessantes. Tal como já foi explicado, este efeito promovido pelo poliéster é devido à sua elasticidade e à presença da rugosidade em cada varão que, para além de funcionar como pontos de ancoragem em relação à argamassa, quando estica atinge valores enormes de deformação. Um outro aspeto deve-se à existência de entrelaçamento dos varões longitudinais com varões transversais que promove imbricamento na malha e não permite o deslizamento dentro da mesma. Por isso, observa-se que existe uma redistribuição de forças muito significativa que se materializa num padrão de múltiplas micro-fendas num zona bastante extensa do provete, ver Figura 5.33 e Figura 5.34.

Quadro 5.10 – Resultados obtidos no ensaio de flexão da parede com malha levmin_8_vidro

	levmin_8_vidro		$\Delta_{Referência}(\%)$
	Média	C.O.V (%)	
F_{cr} (kN) (aprox.)	4,89	24,58	107,47
δ_{cr} (mm)	1,20	42,56	164,84
F_{max} (kN)	15,85	8,68	292,96
δ_{Fmax} (mm)	25,67	7,74	2543,13
M_{Fmax} (kNm)	4,16	8,68	292,96
Rigidez elástica (kN/mm)	5,31	42,94	76,99
Rigidez plástica (kN/mm)	0,56		
$\Delta_{rigidez\ plástica/elástica}$ (%)	10,55		

Por outro lado, à medida que a parede se deformava, existia naturalmente desagregação da argamassa, com consequência de algum destacamento, uma vez que se torna complicada a plasticidade da argamassa acompanhar a curvatura da parede.

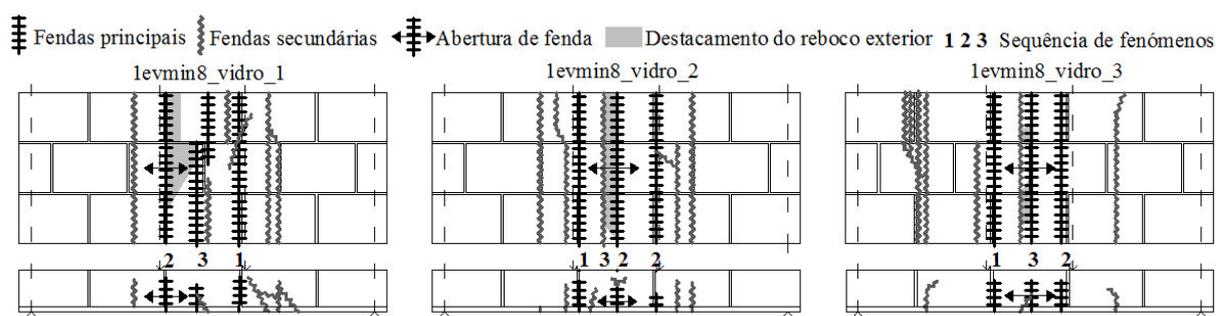


Figura 5.33 - Padrão de fendilhação das paredes com malha levmin8_vidro

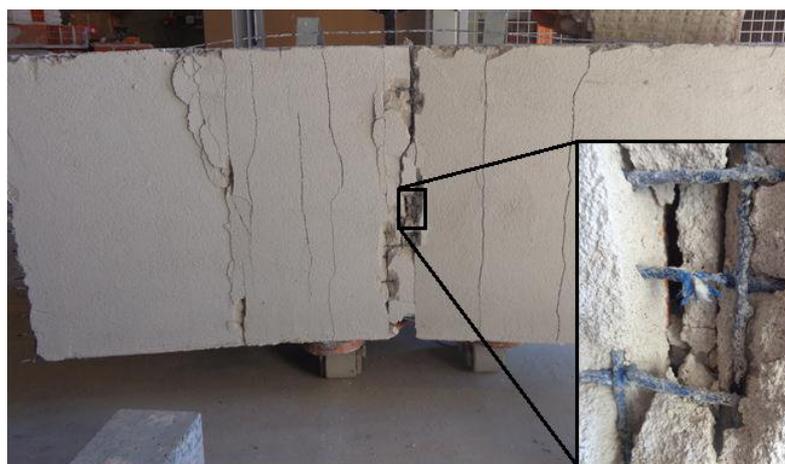


Figura 5.34 – Modo de rotura típico de paredes reforçadas com malha levmin8_vidro

O carregamento cíclico neste tipo de paredes reforçadas desenvolveu-se segundo a segunda lei de carregamento. Verifica-se uma vez mais a semelhança entre os provetes carregados monotonicamente e o provete carregado por ciclos no regime de pré-pico, em termos de comportamento no ramo virgem nas curvas (Figura 5.32).

Quadro 5.11 – Rigidez de cada nível no carregamento cíclico das paredes levmin8_vidro

	Rigidez Descarga (kN/mm)	Rigidez Carga (kN/mm)	Média (kN/mm)	C.O.V (%)	Força (kN)	Deformação (mm)	Δ Rigidez elástica (%)
Rigidez elástica		4,37	4,37		5,64	1,53	
Ciclo 1	4,39	4,44	4,42	0,80	4,83	2,00	101,03
Ciclo 2	2,81	2,95	2,88	3,44	7,21	6,01	65,90
Ciclo 3	1,98	2,00	1,99	0,71	9,95	9,99	45,54
Ciclo 4	1,45	1,65	1,55	9,12	12,44	15,01	35,47
Ciclo 5	1,30	1,47	1,39	8,68	15,87	20,02	31,69
Ciclo 6	1,07	1,21	1,14	8,68	15,16	25,01	26,09
Ciclo 7	0,91	1,07	0,99	11,43	10,36	30,02	22,65

Além disso, é possível verificar as deformações permanentes associadas a cada nível de ciclo, que são claramente superiores às obtidas nas restantes malha, incluindo a malha comercial Mapegrid 220. No Quadro 5.11 e na Figura 5.35 é apresentada a rigidez média obtida a partir dos ramos de descarga e carga de cada ciclo, bem como a relação de perda de rigidez em relação ao ramo linear.

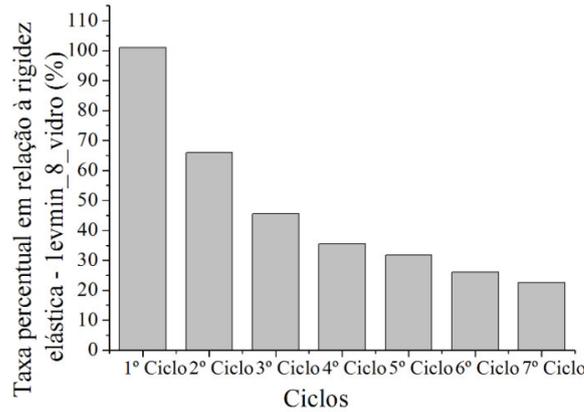


Figura 5.35 – Taxa percentual de cada nível do carregamento cíclico em relação à rigidez elástica na parede com a malha 1evmin_8_vidro

As correlações obtidas relacionando a rigidez com a deformação e a força de cada ciclo são do tipo exponencial com bons coeficientes de correlação (R^2) (Figura 5.36). Verifica-se que este tipo de tendência apresenta um decréscimo muito acentuado e apresenta a mesma tendência da malha comercial Mapegrid 220.

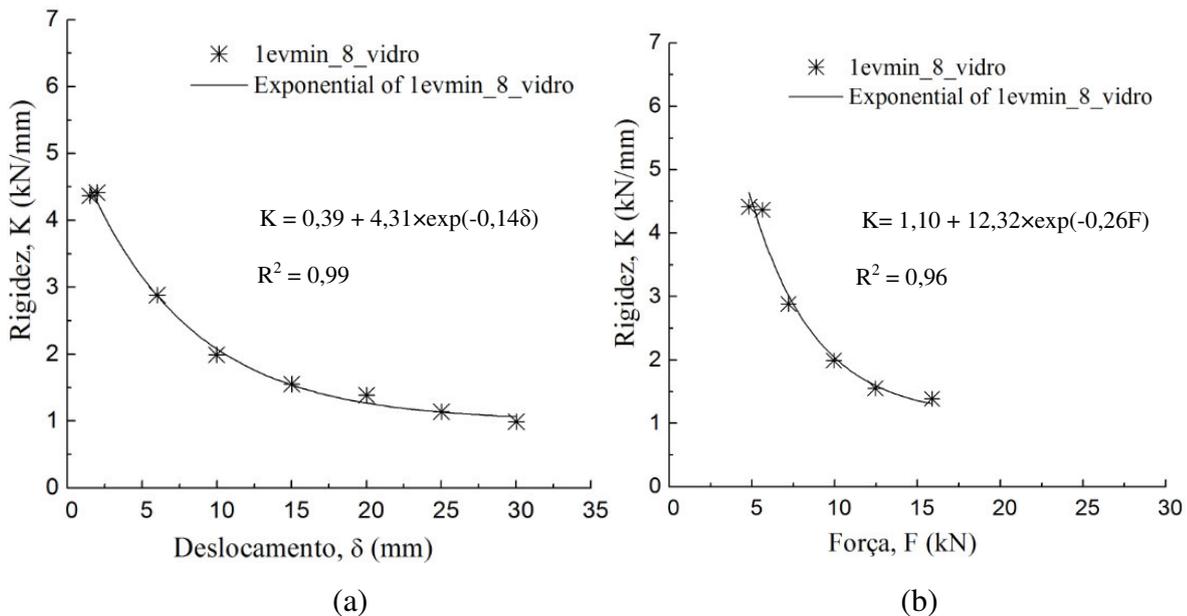


Figura 5.36 - Correlação entre rigidez e: (a) deformação; (b) força

5.7.6 Análise comparativa

Mediante os resultados apresentados em paredes reforçadas com cada tipologia de malha de reforço, segue-se uma análise comparativa de modo a avaliar a eficiência de cada um das malhas estudadas. Assim, na Figura 5.37 é representado o comportamento típico geral do comportamento de cada tipologia de parede estudada, permitindo aferir claramente a diferença de comportamento entre malhas constituídas por carbono e vidro, e a semelhança entre as malhas comerciais e as malhas produzidas com as mesmas características mecânicas.

Quer nas paredes sem malhas de reforço, quer nas paredes com malhas constituídas por fibras carbono ou fibras de vidro, o comportamento pré-pico é muito semelhante, nomeadamente no regime linear elástico. Assim, a força de fendilhação registada em todas as tipologias é muito semelhante entre todas as tipologias, diferindo a deformação associada que faz com a rigidez elástica de cada tipologia seja um pouco diferente (Figura 5.38 e Figura 5.39).

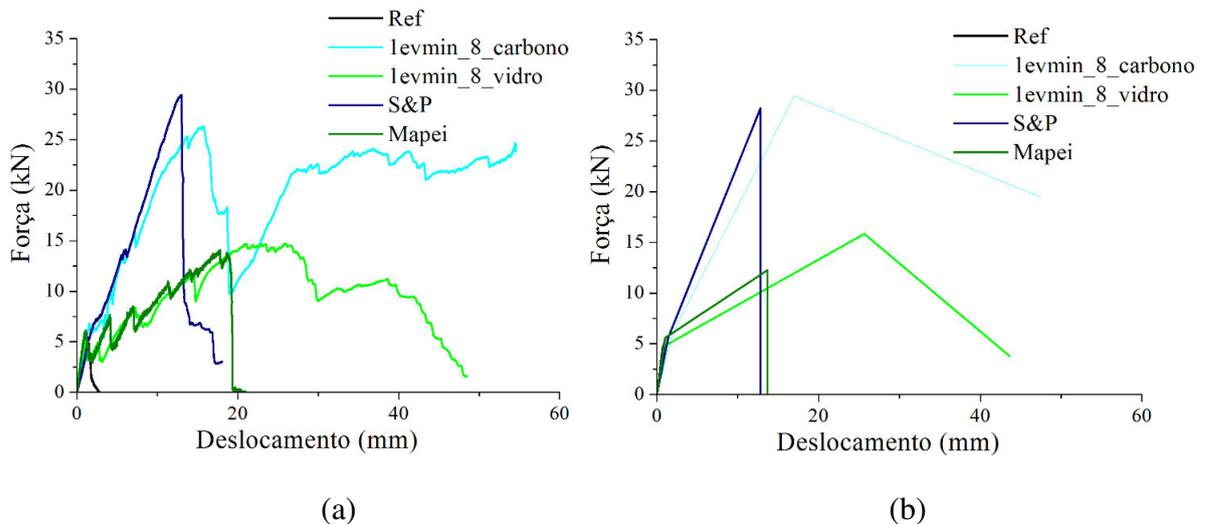


Figura 5.37 – Diagramas força – deslocamento de cada tipologia de parede: (a) típico; (b) esquemático

Regista-se a rigidez elástica máxima na parede de referência, seguidamente a malha comercial e a malha produzida constituídas por fibras de vidro, e por fim a malha comercial e malha produzida constituídas por fibras de carbono com o valor mínimo de rigidez. Notar que, embora haja esta tendência, a variação entre os valores registados não é muito significativa, o que comprova a semelhança entre o ramo linear do comportamento de todas as amostras enquanto secção homogénea e totalmente ativa. Por outro lado, admitindo que a alvenaria com reforço funciona como uma secção mista em regime linear, seria de esperar que as paredes reforçadas tivessem uma rigidez elástica superior. No entanto, uma vez que isso não

se verifica, admite-se a possibilidade das paredes de referência terem eventualmente sido construídas de um modo mais favorável.

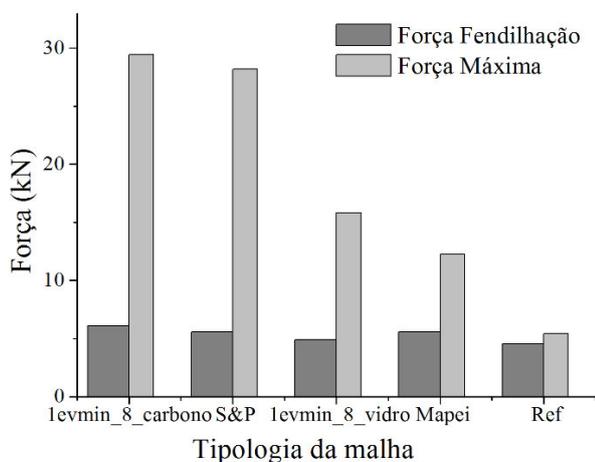


Figura 5.38 – Comparação da força máxima de início da fendilhação

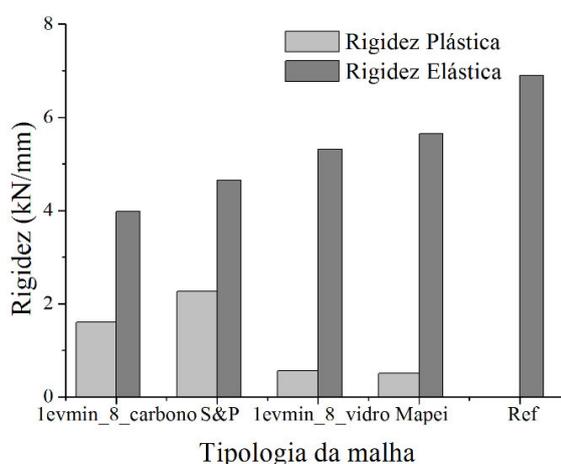


Figura 5.39 – Comparação de rigidez entre as diferentes tipologias de parede

Por outro lado, salienta-se a aproximação de rigidez registada no ramo plástico entre malhas constituídas pelo mesmo tipo de fibras. Embora haja uma pequena variação entre as malhas de carbono, no caso das malhas de vidro não existe variação praticamente nenhuma da rigidez calculada no ramo após abertura de fendas (Figura 5.39). Isto significa que no momento em que as fibras entram verdadeiramente em carga tendem a desempenhar comportamentos semelhantes, o que se torna satisfatório para validar a eficiência das malhas produzidas face às malhas comerciais, uma vez que se confirma o bom funcionamento do núcleo de reforço nos varões compósitos neste tipo de configuração.

Verifica-se que a força máxima é registada nas malhas produzidas e nas malhas comerciais constituídas por fibras de carbono, com posterior redução das malhas produzidas e comerciais com fibras de vidro. A parede de referência apresenta o menor valor em termos de força máxima, tal como era expectável (Figura 5.37 e Figura 5.38). Salienta-se que as malhas produzidas apresentam valores de força máxima mais elevados que as respetivas malhas comerciais, o que se torna mais significativo se se considerar que em ambos os casos a percentagem de material de reforço é de cerca de 91% do reforço das malhas comerciais.

Relativamente ao comportamento pós-pico das tipologias de parede reforçada, destaca-se o desempenho das malhas produzidas uma vez que ambas atingiram elevados níveis de deformação com níveis de resistência bastante importantes para promover o equilíbrio necessário à parede para que esta não apresente roturas frágeis. No entanto, o mesmo não se

conseguiu obter nas malhas comerciais, embora tenham atingido valores máximos de resistência muito próximos das malhas produzidas. Anteriormente já se explicou a razão pela qual as malhas produzidas apresentam este comportamento muito satisfatório. No entanto volta-se a referir a importância da presença do poliéster que permite assegurar uma carga residual importante após a resistência máxima e a rotura do núcleo resistente, alongando-se o varão de poliéster até níveis de deformação elevados devido à sua capacidade elástica. Por outro lado, o efeito múltiplo das fibras permite que a rotura das fibras ocorra em níveis de deformação diferentes, o que permite uma elevada redistribuição de forças e formação de múltiplas fendas (Figura 5.40), conferindo à estrutura uma elevada ductilidade, característica procurada neste tipo de aplicação de reforço. Notar que aparentemente a presença da resina nos varões não tem muita influência no desempenho dos mesmos, assegurando apenas estabilidade e a transferência de alguns esforços caso a resina tenha infiltrado no varão e preenchido os espaços vazios entre o núcleo e a estrutura do entrançado.

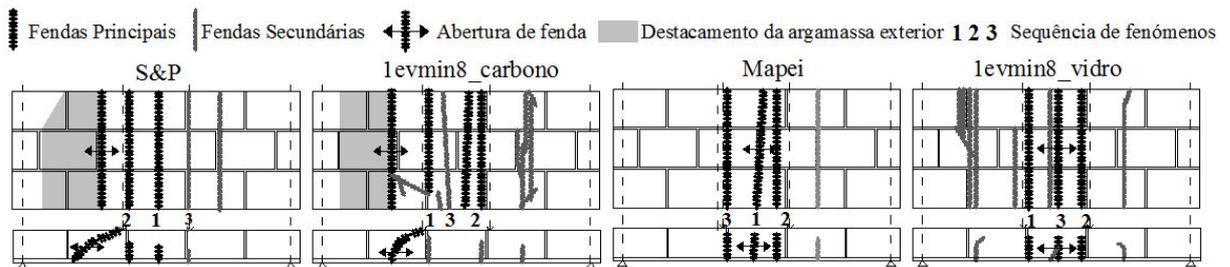


Figura 5.40 – Comparação dos modos de rotura típicos das paredes reforçadas

Como comparação adicional da capacidade de deformação das paredes reforçadas, calculou-se o fator de ductilidade de cada tipologia com base nas expressões (5.3) e (5.4):

$$\mu_{F_{max}} = \frac{\delta_{F_{max}}}{\delta_{cr}} \quad (5.3)$$

$$\mu_{max} = \frac{\delta_{max}}{\delta_{cr}} \quad (5.4)$$

em que,

$\mu_{F_{max}}$ – Fator de ductilidade tendo em conta a deformação correspondente à carga máxima

$\delta_{F_{max}}$ – Deslocamento médio correspondente à força máxima (mm)

δ_{cr} – Deslocamento médio correspondente à força de iniciação da fendilhação (mm)

μ_{max} – Fator de ductilidade tendo em conta o deslocamento máximo obtido

δ_{max} – Deslocamento médio máximo (mm)

Os resultados estão apresentados no Quadro 5.12 e na Figura 5.41. Consta-se a ductilidade elevada nas paredes reforçadas com malhas produzidas face às malhas comerciais. Além disso, a ductilidade associada ao comportamento até à carga máxima segue a mesma tendência decrescente que a resistência máxima, à exceção da malha comercial S&P. Assim, apresenta valor máximo nas paredes reforçadas com malha levmin_8_carbono e mínimo nas paredes de referência.

Em contrapartida, o mesmo não se verifica no caso da ductilidade máxima registada, que apresenta o seu máximo na parede com malha produzida levmin_8_vidro, o que significa que em termos de comportamento pós-pico a malha com varões reforçadas com fibras de vidro é mais eficiente em termos de ductilidade. Todavia, notar que estes indicadores não são normalizados pela força máxima resistente.

Nas paredes reforçadas com malhas comerciais e nas paredes de referência não existem valores de ductilidade máxima, pois não existe comportamento pós-pico que possibilite o cálculo.

Quadro 5.12 – Resultados obtidos em relação ao fator de ductilidade

	Referência	S&P	Mapei	levmin_8_carbono	levmin_8_vidro
μ_{Fmax}	1,38	9,21	13,26	8,51	21,36
μ_{max}				23,73	36,32

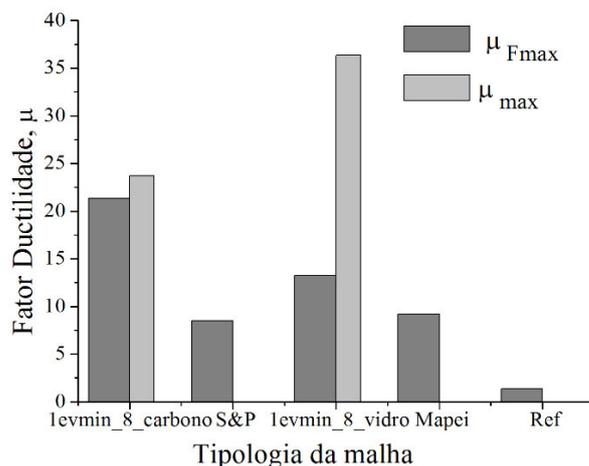


Figura 5.41 – Comparação do fator de ductilidade de cada tipo de malha

Complementarmente foi calculada a energia dissipada no regime pós-pico. Para o efeito, foi calculada a área abaixo do gráfico força-deslocamento após atingir a carga máxima. Os resultados estão apresentados no Quadro 5.13 e na Figura 5.42.

Quadro 5.13 – Energia de dissipação calculada

	Referência	S&P	Mapei	levmin_8_carbono	levmin_8_vidro
Média (kNmm)	7,30	61,72	25,77	763,02	242,73
C.O.V (%)	9,92	47,16	19,14	40,96	1,66

A malha produzida com fibras de carbono e fibras de vidro apresentam os valores mais elevados, tal como era expectável tendo em conta o comportamento dúctil apresentado. Mesmo assim, a parede reforçada com a malha levmin_8_carbono apresenta maior quantidade de energia dissipada em relação à malha produzida com fibras de vidro, uma vez que a sua resistência é mais elevada, e o seu comportamento possui patamares plásticos com níveis de carga muito altos face à malha de vidro. Contudo, as malhas comerciais e a parede de referência possuem valores de energia dissipada muito baixos, o que está associado ao comportamento frágil que as caracteriza. Ainda assim, a parede reforçada com a malha S&P consegue apresentar valores mais altos, uma vez que também é a que possui maior resistência em relação às paredes reforçadas com a malha mapei e à parede sem reforço.

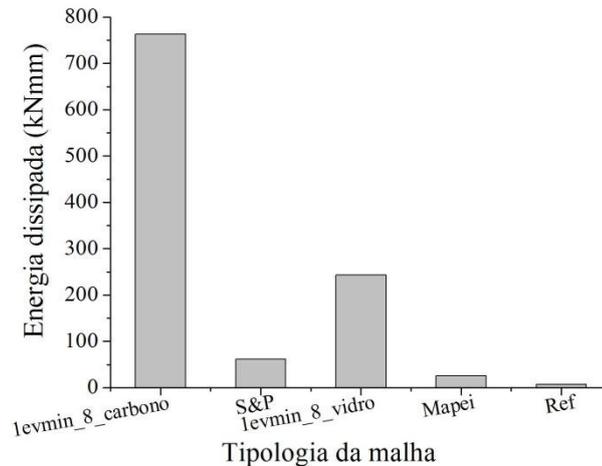


Figura 5.42 – Comparação da energia de dissipação

A presença das malhas de reforço nas paredes proporcionam valores de força máxima muito mais elevados do que a parede de referência, enquanto que esta verificação já não se verifica no caso da força de fendilhação. Assim, as malhas constituídas por fibras de carbono apresentam valores máximos cerca de 5 vezes maiores do que a parede de referência, enquanto que as malhas de vidro registam forças de aproximadamente 3 vezes superiores relativamente às forças máximas das paredes de referência (Figura 5.43). Em relação à força de início da fendilhação o mesmo não acontece, havendo apenas variação entre 7% e 34% da

força da parede de referência (Figura 5.43). Assim, constata-se, tal como já foi dito, que o regime linear elástico em termos de força é muito semelhante entre todas as tipologias.

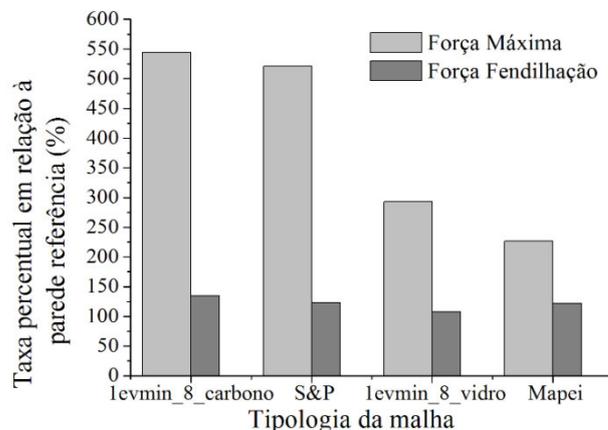


Figura 5.43 – Relação percentual da força de cada tipologia em relação a referência

Em relação ao comportamento das paredes carregadas ciclicamente, é possível verificar na Figura 5.44 a variação percentual das paredes reforçadas em cada ciclo relativamente à rigidez elástica associada. De facto, percebe-se que a rigidez das malhas constituídas por fibras de vidro decresce muito mais rapidamente nos primeiros ciclos que a rigidez das malhas de carbono, enquanto que a partir do ciclo 4 tende a estabilizar, ao contrário das malhas de carbono que apresenta precisamente um maior descréscimo a partir do 4º ciclo. A informação existente revela que a redução entre as malhas comerciais e as malhas produzidas do mesmo tipo não é muito diferente à medida que os ciclos avançam, sendo uma confirmação de que são as fibras resistentes presente no núcleo das malhas produzidas que promovem maior ou menor rigidez em regime plástico.

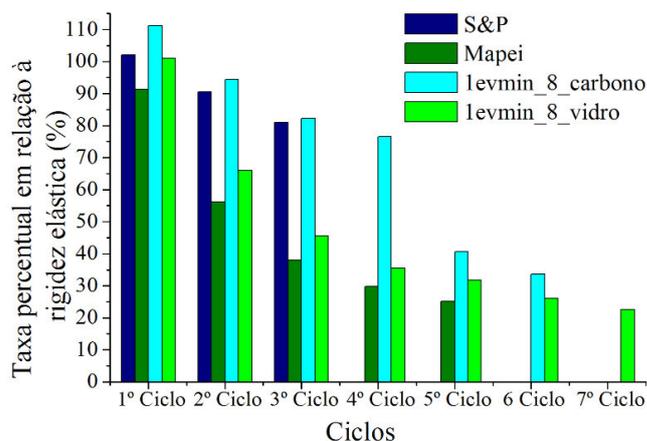


Figura 5.44 – Relação percentual da rigidez de cada ciclo em relação à rigidez inicial

Na Figura 5.45 são representadas as correlações obtidas entre a perda de rigidez e a deformação ou força associadas a cada ciclo. Constata-se a diferença de tendências lineares e exponenciais existentes entre as malhas com fibras de carbono e fibras de vidro, respetivamente. Assim, as paredes com as malhas constituídas por fibras de vidro diminuem muito mais rapidamente a sua rigidez elástica à medida que a deformação e força aumentam, comparando com as malhas de fibras de carbono que conseguem apresentar uma maior percentagem da rigidez inicial. Este facto também se verifica no gráfico de barras da Figura 5.44 tal como já se abordou, comprovando que as malhas produzidas com fibras de carbono são muito mais resistentes que as malhas com fibras de vidro, tal como era expectável tendo em conta as suas características de resistência.

No entanto, é importante referir que a avaliação efetuada das malhas produzidas com fibra de vidro não se torna desvantajosa face às malhas produzidas com fibras de carbono, considerando também o fator económico entre elas. Por isso, a malha produzida com fibras de vidro torna-se a malha que, tendo em conta as suas características físicas, económicas e mecânicas, nomeadamente a ductilidade, apresenta um desempenho mais interessante.

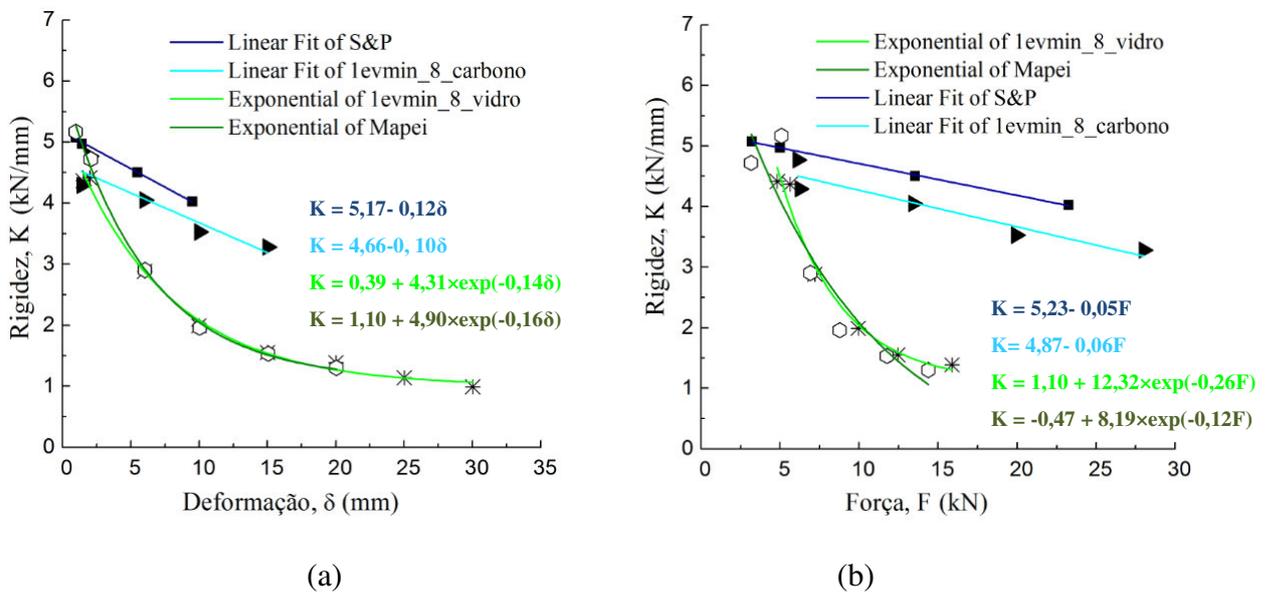


Figura 5.45 – Correlação entre a rigidez e: (a) deformação; (b) força

5.8 Análise analítica e comparação com resultados experimentais

Pretende-se apresentar um modelo analítico baseado na teoria clássica de flexão de modo a estimar propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência máxima das paredes reforçadas. Para isso, numa primeira fase foram determinadas as características dos materiais a serem consideradas no modelo analítico considerado. Com efeito, calcularam-se valores resistentes analíticos de maneira a efetuar as devidas comparações com os resultados obtidos experimentalmente.

5.8.1 Características dos materiais

O ensaio das paredes foi submetido a uma configuração de carga de flexão em 4 pontos, e será efetuada uma análise da resistência com base na teoria clássica de flexão aplicado ao betão armado e alvenaria como recomenda o EC6 [10].

Na Figura 5.46 apresenta-se o equilíbrio de forças, sendo possível perceber que a alvenaria é responsável pelas forças de compressão e o reforço responsável pelas tensões de tração, considerando a secção fendilhada.

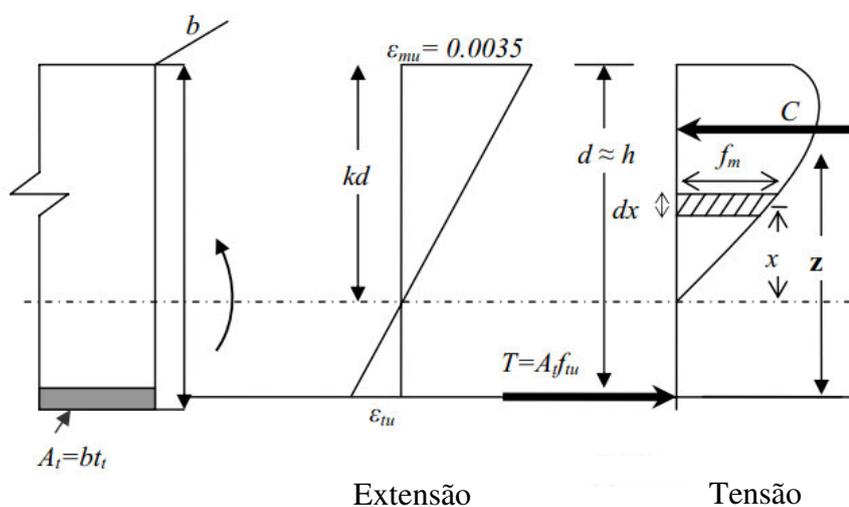


Figura 5.46 – Diagrama da extensão e tensão na secção da parede submetida à flexão (adaptado [23])

Assim sendo, a resistência à compressão da alvenaria é estimada com base no EC6 [10], expressão (5.5)

$$f_m' = K \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (5.5)$$

em que,

K é um fator de redução da resistência à compressão e que depende dos materiais.

f_m é resistência à compressão da argamassa de assentamento (N/mm^2)

f_b é a resistência à compressão das unidades de tijolos na direção solicitada na parede de alvenaria, (N/mm^2).

f_m' é resistência à compressão da alvenaria, (N/mm^2)

Neste caso, como se utilizaram tijolos cerâmicos, e tendo em conta que a direção de aplicação da carga é perpendicular às juntas considera-se $K = 0,35$. Além disso, tal como refere no capítulo 5.3.1, a resistência à compressão dos blocos na direção adequada é de $f_b = 6,1 \text{ N/mm}^2$, e a resistência à compressão da argamassa de assentamento é de f_m de $7,2 \text{ N/mm}^2$. Considerando estes valores na fórmula (5), obtém-se um valor da resistência à compressão da alvenaria (direção paralela às juntas horizontais) de:

$$f_m' = 0,35 \times 6,1^{0,7} \times 7,2^{0,3} = 2,24 \text{ N/mm}^2$$

Além disso, o EC6 [10] recomenda que o módulo de elasticidade da alvenaria seja calculado aproximadamente entre 700 a 1000 vezes a resistência à compressão da alvenaria. Neste caso considera-se a seguinte expressão (5.6):

$$E = 1000 \times f_k \tag{5.6}$$

Obtendo-se um valor de $E = 1000 \times 2,24 = 2243,88 \text{ N/mm}^2$

É necessário conhecer os valores das extensões associadas à carga última, ε_{mu} , e à carga máxima da alvenaria, ε'_m , para ser possível estimar capacidades resistentes. Segundo Triantafillou (2007) [29], são:

$$\varepsilon_{mu} = 0,0035$$

$$\varepsilon'_m = 0,0030$$

Em relação à capacidade resistente à tração do reforço, nas malhas comerciais foi tida em conta a referência da ficha técnica (Capítulo 3.4).

$$T_u^{S\&P} = 93,90 \text{ kN/m}$$

$$T_u^{Mapei} = 45 \text{ kN/m}$$

Para além da capacidade resistente das fibras, é necessário conhecer o valor das extensões de rotura do material de reforço. Para as malhas de reforço comerciais consideraram-se os valores mencionados na ficha técnica (Capítulo 3.4).

$$\varepsilon_{tu}^{S\&P} = 0,0175$$

$$\varepsilon_{tu}^{Mapei} = 0,03$$

Nas malhas produzidas foi considerado o valor registado nos ensaios à tração de varões apresentados no Capítulo 4.4. De modo a obter uma ideia aproximada do desempenho de um conjunto de varões, considerou-se o desempenho obtido dos varões nas malhas estudadas nos ensaios de aderência desenvolvidos em tijolos, comparativamente com o valor estimado através dos ensaios de aderência individuais em cilindros. Assim, constata-se no Quadro 4.6 que a percentagem da eficiência da malha com rugosidade *levmin_8* em relação ao valor estimado é cerca de 60%. Com efeito, considerou-se 60% do produto do valor da resistência à tração de um varão pelo número total dos varões constituintes da malha de reforço utilizada na parede. Esta consideração apenas se aplicou na malha de carbono visto que a malha dos ensaios de aderência também era constituída por fibras de carbono (embora na malha de aderência fosse utilizado 2 multifilamentos de carbono e nas malhas de reforço foram considerados 3). No que diz respeito à malha de vidro, será considerado a eficiência total do conjunto dos varões a partir dos valores da resistência à tração de varões individuais, visto não existir nenhuma malha de referência ensaiada com fibras de vidro que permita perceber qual o efeito global de um conjunto de varões deste tipo.

No caso das fibras de carbono, tem-se:

Força de tração de um varão com fibras de carbono $t_u = 4,919 \text{ kN}$

Número de varões utilizados na malha = 22, o que significa que por metro linear ter-se-ia cerca de 38 varões. Assim, o valor da resistência à tração do reforço, T_u , é calculada através de:

$$T_u^{levmin_8_carbono} = 4,92 \times 38 \times 0,60 = 109,20 \text{ kN/m}$$

Se por metro de malha a força de tração é de 109,20 kN/m, nas dimensões da parede (0,62m) a malha apresenta aproximadamente 65,52 kN de força de tração.

No caso das fibras de vidro:

Força de tração de um varão com fibras de vidro $t_u = 1,45 \text{ kN}$

Número de varões utilizados na malha = 22, o que significa que por metro linear ter-se-ia cerca de 38 varões. Assim, o valor da resistência à tração do reforço, T_u , é calculada através de:

$$T_u^{1evmin_8_vidro} = 1,45 \times 38 = 55,10 \text{ kN/m}$$

Se por metro de malha a força de tração é de 55,10 kN/m, nas dimensões da parede (0,62m) a malha apresenta aproximadamente 33,03 kN de força de tração.

Para as malhas produzidas, foram considerados os valores obtidos nos ensaios de tração de varões, embora estes não sejam totalmente corretos devido à dificuldade de medição exata através do equipamento utilizado, tal como já foi abordado no Capítulo 4.4

$$\varepsilon_{tu}^{1evmin_8_carbono} = 0,0103$$

$$\varepsilon_{tu}^{1evmin_vidro} = 0,0153$$

5.8.2 Formulação do modelo analítico

O modelo analítico considerado é baseado na metodologia desenvolvida por Rupika (2010), que pressupõe o uso das equações de equilíbrio e compatibilidade tendo em conta a Figura 5.46. Para isso, são considerados os seguintes pressupostos:

- Secções planas permanecem planas durante a flexão;
- Extensão varia linearmente através da secção;
- Distribuição parabólica da tensão na alvenaria;
- Resistência à tração de alvenaria negligenciada;
- Ligação perfeita entre camada de reforço e alvenaria;

O modelo em questão permite determinar a capacidade resistente a partir do modo de rotura previsto. Assim, numa primeira fase, é necessário efetuar a verificação do modo de rotura através da análise da taxa de reforço, comparando com a taxa de reforço equilibrada (situação em que existe rotura simultânea da alvenaria e do reforço). Podem existir dois tipos de rotura, cada uma implicando diferentes formulações desenvolvidas pelo mesmo autor derivadas a partir de condições de compatibilidade de deformação e equilíbrio de forças: (1) rotura pela insuficiente capacidade de compressão de alvenaria (esmagamento da alvenaria); (2) rotura pelo esgotamento da resistência à tração do reforço. Para identificar cada um dos tipos de

rotura são definidos diferentes coeficientes, nomeadamente, η_{bal} , e η , sendo dado pelas expressões (5.7) e (5.8):

$$\eta_{bal} = 0,714 \times f'_m \left(\frac{\varepsilon_{mu}}{\varepsilon_{mu} + \varepsilon_{tu}} \right) \quad (5.7)$$

em que,

f'_m - Resistência à compressão estimada;

ε_{tu} - Extensão última instalada no reforço;

ε'_m - Extensão de pico na alvenaria;

ε_{mu} - Extensão última da alvenaria

$$\eta = \frac{T_u}{bd} \quad (5.8)$$

em que,

b - Largura da secção

d - Distância útil entre o reforço e a superfície inferior da secção

T_u - Capacidade última de tração do reforço

No caso em que $\eta_{bal} < \eta$, a rotura ocorre por esmagamento da alvenaria. Desta forma, o momento resistente M_u (kNm) é dado pela expressão (5.9):

$$M_u = (0,714 - 0,274k)k f'_m b d^2 \quad (5.9)$$

em que,

$k = \frac{\varepsilon_{mu}}{\varepsilon_{mu} + \varepsilon_{tu}}$ - razão entre profundidade do eixo neutro e altura útil

Por outro lado, ocorre rotura pela insuficiente força resistente de tração do reforço, controlada pelo valor T_u , se $\eta_{bal} > \eta$. Neste caso, o momento resistente M_u (kNm) é dado pela expressão (5.10):

$$M_u = b d^2 f'_m \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon'_m} \right) \times \left[- \left(\frac{k^4}{4(1-k)^2} \right) \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon'_m} \right) + 2 \left(\frac{k^3}{3(1-k)} \right) \right] + T_u (1 - k) d \quad (5.10)$$

A força resistente, F_u (kN), é calculada utilizando a configuração simples de ensaio apresentada na Figura 5.12. Assim, a força é calculada através da expressão (5.11):

$$F_u = \frac{2}{0,525} M_u \quad (5.11)$$

Ainda que numa primeira abordagem se tivesse calculado a razão entre as extensões de modo a poder avaliar qual o modo de rotura da parede, optou-se por considerar o cálculo dos valores de resistência para os dois modos de rotura possíveis, devido à equívoca precisão dos valores das extensões do material de reforço produzido. Em trabalhos futuros sugere-se a obtenção do valor mais rigoroso da extensão através de outras configurações de ensaio de tração, de modo a estimar-se com mais rigor o valor dos rácios e consequente modo de rotura do material. No Quadro 5.14 e Figura 5.47 apresentam-se os resultados dos cálculos obtidos.

Quadro 5.14 – Resultados analíticos e comparação com os resultados experimentais

	1evmin_8_carbono		1evmin_8_vidro		Mapei		S&P	
ϵ_{tu}	0,0103		0,0153		0,0300		0,0175	
ϵ_m	0,0030		0,0030		0,0030		0,0030	
ϵ_{mu}	0,0035		0,0035		0,0035		0,0035	
k	0,2536		0,1862		0,1045		0,1667	
$T_u(kN/m)$	109,20		55,10		45,00		93,90	
η_{bal}	406,34		298,27		167,39		267,02	
η	682,51		344,38		281,25		586,88	
Modo de rotura	M_u (kNm)	F_u (kN)	M_u (kNm)	F_u (kN)	M_u (kNm)	F_u (kN)	M_u (kNm)	F_u (kN)
Alvenaria	5,63	21,46	4,25	16,21	2,47	9,40	3,84	14,63
$\Delta_{ana/exp}$	72,83		102,16		76,71		51,90	
Reforço	8,79	33,50	4,83	18,39	4,03	15,36	7,93	30,21
$\Delta_{ana/exp}$	113,79		116,00		125,23		107,14	
Experimental	7,73	29,44	4,16	15,85	3,22	12,27	7,40	28,20

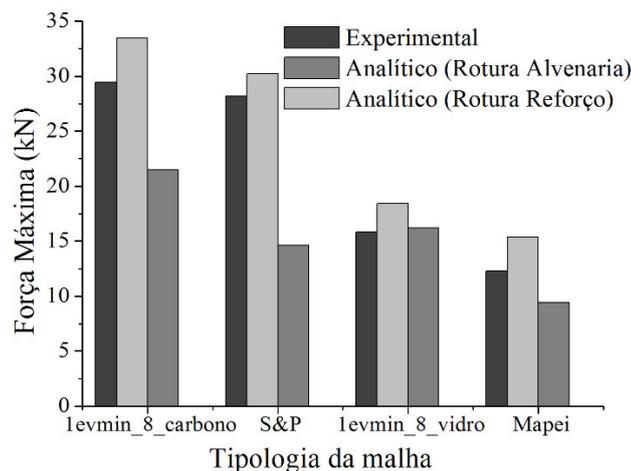


Figura 5.47 – Comparação dos resultados obtidos analítica e experimentalmente

5.8.3 Comparação com os resultados experimentais

A comparação dos resultados analíticos com os resultados experimentais permite concluir o seguinte:

- Relativamente às paredes reforçadas, à exceção da malha levmin_8_vidro, a força estimada através da rotura pelo esmagamento da alvenaria não parece ser uma boa aproximação, uma vez que o valor real se aproxima mais do valor de estimado pela rotura do reforço, que é o fenómeno que realmente acontece. Isto pode ter a ver com o facto da verificação do modo de rotura estimado, tal como já foi explicado, não ser muito correto devido à incerteza do valor exato da extensão do material de reforço. No caso das malhas comerciais, e sendo estes valores normalizados pela ficha técnica, a rotura também é prevista pelo esmagamento da alvenaria, embora a rotura ocorra pelo reforço, cujo valor estimado associado se aproxima mais da realidade. No caso da malha levmin_8_vidro, constata-se um valor estimado pela rotura da alvenaria muito próximo do valor da rotura real, no entanto, a rotura existente está associada ao reforço, cujo valor resistente estimado também não é muito diferente do valor real. De um modo geral, os valores estimados pelo tipo de rotura do reforço não são muito discrepantes dos valores reais obtidos, variando entre 7% e 25%.

- Os valores resistentes espectáveis são sobrestimados, à exceção da malha levmin_8_vidro que apresenta valores estimados, no tipo de rotura pela alvenaria, inferiores aos valores reais obtidos. Como não foi registado nenhum tipo de deslizamento das malhas, a diferença existente pode estar eventualmente associada a deslizamento interno nos varões compósitos e irregularidades na distribuição das tensões das malhas devido ao entrelaçamento dos varões, conduzindo a pontos frágeis mais suscetíveis à rotura.

5.9 Comparação com trabalhos anteriores

Dos resultados apresentados no trabalho anteriormente desenvolvido por Gómez (2012) [9] e apresentados no Capítulo 2, constata-se que só é correto comparar diretamente as paredes de referência e as paredes com malhas comerciais. De facto, os resultados obtidos por Gómez (2012) [9] indiciavam um comportamento razoável das malhas produzidas mas claramente inferiores às malhas comerciais no que refere às forças máximas. O comportamento das malhas produzidas apresentava a mesma eficiência no que diz respeito à elevada redistribuição de forças, e à existência de um comportamento dúctil na fase de pós-pico,

conferido pela presença do poliéster que proporciona níveis elevados de deformação a níveis de carga muito satisfatórios.

Em relação aos ensaios das malhas comerciais S&P, também foi registada rotura por corte, embora existisse um comportamento pós-pico dúctil com elevadas deformações, provocado eventualmente pelo deslizamento da malha que o autor evidenciou, acontecimento não ocorrido nos ensaios apresentados nesta tese e, por isso, não foram registadas elevadas deformações. Para além disso, também no caso da malha Mapei ocorreu rotura frágil, devido à rotura total da malha, como também sucedeu nos trabalhos desenvolvidos nesta tese.

No que diz respeito aos valores registados, pode-se constatar que as paredes sem reforço e as paredes reforçadas com malha S&P apresentaram momentos resistentes mais elevados 3% e 30%, respetivamente, em relação aos valores registados pelo autor Gómez (2012) [9], enquanto que a parede reforçada com a malha Mapei apresenta momentos resistentes mais baixos no presente trabalho em cerca de 20%. Esta diferença de resultados poderá estar associada à variabilidade de mão-de-obra, dado que a construção dos provetes não foi efetuada pelo mesmo profissional.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões sobre o trabalho realizado, pretendendo-se resumir os principais resultados sobre o comportamento dos materiais de reforço desenvolvidos (comportamento à tração, comportamento de aderência) e sobre o desempenho dos materiais de reforço desenvolvidos como reforço à flexão. Adicionalmente, apresentam-se as principais ideias relativamente a trabalho que se pensa pertinente desenvolver no futuro.

6.2 Conclusões

6.2.1 Comportamento de aderência

Em relação ao estudo da aderência, pode-se apontar as seguintes conclusões:

- O desempenho mais satisfatório em termos de força máxima foi registado no varão cuja rugosidade é designada por 1evmax_8. No entanto, constatou-se mediante fabrico das malhas a serem aplicadas nas paredes, que era inviável a utilização desta rugosidade devido à falta de homogeneidade de acabamento do entrançado, uma vez que foi necessário aumentar a quantidade de material no núcleo. Por isso, a estrutura de entrançado selecionada para fabrico de malhas foi a rugosidade 1evmin_8. Pode ainda concluir-se que o fabrico dos varões a partir da técnica de entrançamento com as condições existentes poderá estar dependente do diâmetro do reforço a incluir no núcleo.
- As rugosidades constituídas por 8 fios apresentam comportamento em termos de diagramas força-deslocamento mais satisfatórios do que as rugosidades de 16 fios, visto apresentarem forças de aderência maiores e comportamento bastante dúctil. Por outro lado, a influência das velocidades de produção nas rugosidades com 8 fios parece ser mais determinante do que no caso das rugosidades com 16 fios. Os fatores que influenciam a força máxima de aderência

resultam da interação da área de aderência dos varões e do efeito de imbricamento controlado pelas rugosidades.

- Relativamente ao comportamento dos varões é possível concluir que a argamassa menos resistente conduz a valores de arrancamento menores, o que se reflete também no comportamento pós-pico mais dúctil. Por outro lado, maior confinamento em termos de quantidade de argamassa proporciona valores de aderência maiores.

- A malha comercial S&P apresenta o melhor desempenho em termos de força de aderência, enquanto que a malha Mapei apresenta o desempenho menos interessante. As malhas produzidas com a rugosidade utilizada no reforço de paredes de alvenaria e a malha sem rugosidade apresentaram valores intermédios, mas comportamentos bastante interessantes.

- Para além da capacidade de aderência dos varões longitudinais nas malhas, existem efeitos de interação, como por exemplo o entrelaçamento de varões longitudinais e transversais e a quantidade de argamassa que confina os varões que afetam os resultados de aderência em malhas.

- Destaca-se o efeito de imbricamento das malhas produzidas devido ao entrelaçamento dos varões longitudinais e transversais, funcionando como uma rugosidade adicional que promove a aderência da malha à argamassa. Por isso, ocorre maior redistribuição de forças e formação de múltiplas fendas, o que leva por sua vez à existência de desagregação e destacamento da argamassa exterior.

6.2.2 Comportamento de tração

Em relação ao comportamento à tração, enumeram-se as seguintes conclusões:

- O material compósito BCR possui características muito próprias devido à dificuldade de assegurar que a tensão de entrada utilizada nos filamentos durante a produção assegure um perfeito e igual alinhamento dos materiais constituintes, o que influencia o comportamento dos varões.

- O comportamento deste tipo de varões à tração é descrito através de duas etapas: (1) o material apresenta um comportamento linear devido essencialmente à presença dos multifilamentos de carbono e de vidro, uma vez que a linearidade do material compósito no regime de pré-pico é controlada pelo comportamento linear do material de reforço presente no núcleo, afetando autenticamente a rigidez do mesmo; (2) o material exhibe um comportamento

pós-pico em que o núcleo resistente está já em rotura, e a capacidade de carga final é da responsabilidade da estrutura de entrançado, atingindo elevadas deformações uma vez que a estrutura fibrosa apresenta propriedades “elásticas” muito maiores em relação ao material de reforço utilizado. Este comportamento “elástico” deve-se ao facto do ângulo de distribuição dos multifilamentos de poliéster diminuir à medida que o varão permanece em carga, o que permite atingir elevadas deformações devido ao alongamento do mesmo. Por isso, em ambos os tipos de núcleos de reforço, existe um comportamento pós-pico muito semelhante, dado que as propriedades do varão são as mesmas.

- A rotura dos dois tipos de varões é muito localizada, apresentando-se a maior parte das vezes em pontos muito próximos da maxila. Isto pode significar que além de esforços axiais existentes, provavelmente existem esforços de corte que proporcionam concentração de esforços e desenvolvem pontos frágeis. Por isso, a configuração da maxila deve ser repensada de modo a provocar rotura a meio do varão e evitar zonas de concentração de esforços.

- O varão compósito tem algumas características físicas que lhe atribui propriedades não lineares sendo a variabilidade por vezes elevada em termos de propriedades mecânicas, o que pode conduzir a comportamentos nem sempre desejados. Fatores como presença de vazios, imperfeição dos filamentos, processo de produção manual pouco industrializado devem ser refletidos e corrigidos de modo a conhecer melhor o funcionamento do varão compósito.

- Pode haver alguma limitação em termos dos resultados obtidos, principalmente ao nível da deformação devido ao tipo de rotura observado e, que por isso, pode traduzir alguma percentagem de erro observado no modelo analítico. Como a rotura ocorre em pontos de ligação com a maxila, o extensómetro não conseguiu registar totalmente as principais deformações do material, medindo apenas numa zona central do varão que nem sempre evidencia deformações importantes.

6.2.3 Avaliação do desempenho das malhas de BCR como material de reforço

Relativamente aos resultados obtidos acerca do comportamento das malhas de BCR como reforço de alvenaria de tijolo submetida à flexão, pode-se concluir que:

- As paredes reforçadas não apresentam muita diferença em relação às paredes não reforçadas relativamente à força de início da fendilhação (variações entre 7% e 24% superiores da carga de fendilhação relativamente à parede não reforçada).

- A rigidez plástica atinge valores de cerca de 50% da rigidez linear elástica nas paredes reforçadas. Além disso, os resultados são muito próximos entre as malhas produzidas e as malhas comerciais com fibras de reforço do mesmo tipo.
- A resistência máxima de flexão é maior nas malhas produzidas em relação às equivalentes malhas comerciais, ainda que a taxa de material de reforço seja da ordem dos 90% do reforço das malhas comerciais.
- Nas malhas de fibras de carbono a resistência é cerca de 5 vezes superior à resistência obtida nas paredes não reforçadas, enquanto que nas malhas de fibra de vidro o aumento da resistência é cerca de 3 vezes superior.
- O comportamento é mais dúctil nas malhas produzidas do que nas malhas comerciais. Por isso, os valores de energia de dissipação (no regime de pós-pico) é maior nas malhas produzidas face às malhas comerciais.
- O fator de ductilidade associado à força máxima é maior nas paredes reforçadas com malhas produzidas do que nas malhas comerciais, com valor máximo nas malhas com fibras de carbono. Por outro lado, no caso da ductilidade máxima registada, o fator de ductilidade máximo é obtido na parede com malha produzida levmin_8_vidro. No entanto, este indicador não é normalizado pela força máxima resistente.
- Adicionalmente verifica-se que nas malhas produzidas (1) o dano é mais controlado porque parece haver maior redistribuição; (2) a deformação última é maior e é acompanhada de uma razoável resistência residual. Note-se que as malhas comerciais apresentam um comportamento muito frágil, que corresponde à rotura do material de reforço. De facto, verifica-se que nas malhas produzidas existe muita redistribuição de forças e formação de múltiplas fendas conferido pelo facto das fibras serem compostas por vários filamentos que não rompem instantaneamente. A presença do poliéster assegura elevados níveis de deformação a níveis de carga muito satisfatórios (entre 50 a 90% da carga máxima) após rotura das fibras resistentes devido à sua capacidade elástica. A rugosidade existente nos varões também promove para além de uma melhor aderência, níveis de deformação elevados tendo em conta a sua distribuição espacial ser uma forma helicoidal, que quando submetida a carregamentos axiais se alonga até altos níveis de deformação.
- Em relação ao comportamento das paredes carregadas ciclicamente, a rigidez das malhas constuídas por fibras de vidro decresce muito mais rapidamente do que a rigidez das malhas

de carbono, o que está de acordo com a maior não-linearidade do comportamento. Por isso, nas paredes reforçadas, a rigidez dos provetes com as malhas com fibras de vidro decresce segundo uma ordem exponencial, enquanto que no caso das malhas de fibras de carbono a rigidez decresce segundo uma tendência linear. Comprova-se ainda a maior resistência e capacidade de recuperar a sua rigidez elástica das malhas produzidas com fibras de carbono em relação às malhas de fibras de vidro do regime de pré-pico.

- Notar que a avaliação efetuada das malhas produzidas com fibra de vidro não se torna desvantajosa face às malhas produzidas com fibras de carbono, considerando também o fator económico e o melhor comportamento no regime de pós-pico, o que é fundamental no caso de ocorrência de sismos, em que se pretende ter estruturas capazes de dissipar energia. Por isso, a malha produzida com fibras de vidro torna-se a malha que, tendo em conta as suas características mecânicas, físicas e económicas, apresenta um desempenho mais interessante.

6.3 Trabalhos Futuros

O presente trabalho surgiu na continuidade de alguns outros trabalhos. Do mesmo modo, torna-se pertinente agrupar um conjunto de ideias úteis de melhoramento e evolução dos materiais envolvidos neste estudo. Por isso, as sugestões são:

- Avaliar o potencial de utilização de fibras naturais como base de reforço no compósito e outro tipo de material no entrançado de modo a promover comportamento dúcteis diferentes;
- Avaliar e melhorar a interface entre a estrutura do entrançado e o núcleo. Isto pode implicar um estudo sobre a quantidade de material necessário para preencher a estrutura tubular de modo a evitar espaços vazios, ou a modificação do processo de aplicação de resina;
- Avaliar a proteção química do poliéster no varão compósito, considerando a sua durabilidade e perda de propriedades mecânicas dentro e fora do ambiente da argamassa;
- Avaliar o tensionamento do varão compósito de modo a promover a transferência de cargas instantânea entre a argamassa e o núcleo do varão compósito;
- Avaliar a utilização de varões com núcleos híbridos constituídos por exemplo por fibras de carbono e vidro em malhas de reforço de alvenaria;
- Combinação de diferentes espaçamentos nas malhas de reforço de alvenaria;

- Avaliar o desempenho das malhas em protótipos representativos de paredes de alvenaria através de ensaios no plano em termos de resistência ao corte.
- Utilizar o material carbono como veículo para se introduzir o conceito de monitorização em estruturas de reforço para alvenaria, explorando o seu comportamento piezoresistivo, de modo obter uma melhor compreensão do comportamento real das malhas de reforço em paredes de alvenaria;
- Avaliar o modo de ancoragem das malhas de reforço à envolvente das paredes de alvenaria de enchimento

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. Varum, H., H.R., Vicente, R., Costa, A., A influência das paredes de enchimento na resposta sísmica de estruturas de edifícios in Paredes divisórias: Passado, presente e futuro, P.B. Lourenço et al. (eds.), 2011. p. 111-128.
2. Shing, Benson, A.B.M., Behaviour and analysis of masonry-infilled frames, in Prog. Struct. Engng Mater, 2002. p. 320-331.
3. Dolsek, Matjaz, P.F., The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame — a deterministic assessment. Engineering Structures, 2008. **30**: p. 1991-2001.
4. El-Dakhkhni, W.W., A.A.H., Hakam, Z.H.R., Elgaaly, M., Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. Composite Structures, 2006. **73**: p. 458–477.
5. Cunha, F., Desenvolvimento de uma estrutura com materiais fibrosos para ser utilizada como reforço de paredes de alvenaria, 2012, Universidade do Minho.
6. Abreu, S., Metodologia de reforço de paredes de alvenaria de enchimento, 2011, Universidade do Minho.
7. Harajli, M., H.E., San-Jose, Tomas, Static and Cyclic Out-of-Plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System. Journal of materials in civil engineering, 2010: p. 1171-1180.
8. Papanicolaou, Catherine, T.T., Lekka, Maria, Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. Construction and Building Materials, 2011. **25**: p. 504–514.
9. Gómez, J.M., Innovative retrofitting materials for brick masonry infill walls., in Department of Civil, 2012, University of Minho. p. 117.
10. EN 1996-1-1, in Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, 1996: Brussels: CNE.

11. Gouveia, João P., F.d.M., Lourenço, Paulo B., Alvenaria estrutural: Aplicação a um caso de estudo in 4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2006.
12. Silva, R.M., Fissuração das alvenarias - Estudo do comportamento das alvenarias sob acções térmicas, in FCTUC, 1998, Universidade de Coimbra.
13. Sousa, H., Materiais para alvenaria. Apreciação de algumas produções e sugestões visando a melhoria da sua qualidade, in FEUP, 1988 Universidade do Porto.
14. APICER, C.e.D.-F.T., Manual de Alvenaria de Tijolo 2000, Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção.
15. Silva, J.M., Alvenarias não estruturais Patologias e Estratégias de Reabilitação, in Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço & H. Sousa (Eds.), 2002. p. 187 - 206.
16. FEMA_273, in NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, F.E.M. Agency, Editor 1997: Washington D.C.
17. Oliveira, E.A., Estudo numérico e experimental de paredes de alvenaria não estruturais reforçadas com armadura de junta submetidas à flexão no seu plano in Departamento de Engenharia Civil, 2009, Universidade do Minho.
18. Silva, J. Mendes, V.A., Patologias em paredes de alvenaria: causas e soluções, in Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço, 2007. p. 65-84.
19. Vicente, R. Silva, H.R., Varum, Humberto, Costa, Aníbal, Raimundo, J. António, Silva, Mendes, Performance of masonry enclosure walls: lessons learned from recent earthquakes, in Earthquake engineering and engineering vibration, 2011.
20. Lourenço, Paulo B., M.F.P.P., Leite, João C., Costa, A. Campos, Comportamento das paredes não estruturais a ações sísmicas in Seminário sobre Paredes Divisórias, 2011. p. 103-115.
21. EN-1998-1, in Design of structures for earthquake resistance - Part 1 General rules, seismic actions and rules for buildings, 1998.: Brussels: CNE.
22. Hendra, S., Strengthening of masonry walls against out-of-plane loads using cementitious composite materials, 2007, Singapore: University of Singapore.
23. Rupika, W.K., Out of plane strengthening of unreinforced masonry walls using textile reinforced mortar systems, 2010.

24. Bournas, Dionysios A., T.C.T., Papanicolaou, Catherine G., Retrofit of Seismically Deficient RC Columns with Textile-Reinforced Mortar (TRM) Jackets* in 4^o Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) p. 471-490.
25. Papanicolaou, Catherine G., T.C.T.Æ.K.K., Papathanasiou, Myrto, Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Materials and Structures*, 2007. **40**: p. 1081–1097.
26. Einde, Lelli Van Den, L.Z., Seible, Frieder, Use of FRP composites in civil structural applications. *Construction and Building Materials*, 2003. **17**: p. 389–403.
27. Buchan, P.A., J.F.C., Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review. *Composites: Part B*, 2007. **38**: p. 509–522
28. Elgwady, Mohamed A., P.L., Badoux, Marc, Dynamic In Plane behaviour of URM wall upgraded with composites Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
29. Triantafillou, T.C., C.G.P., Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures, in FRPRCS, 2007. p. 99-118.
30. Papanicolaou, Catherine G., T.C.T., Papathanasiou, Myrto, Karlos, Kyriakos, Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. *Materials and Structures*, 2008. **41**: p. 143–157.
31. Codispoti, R., Oliveira, D.V., Figueiro, R., Olivito, R.S., Lourenço, P.B., Study on natural fiber based composites for strengthening of masonry structures in 41^o Convegno nazionale, 5-8 Settembre 2012, Università Degli Studi Di Pavoda, 2012.
32. Figueiro, R., Fibrous and composite materials for civil engineering applications 2011.
33. Lourenço, P.B., Paredes de alvenaria (I) Possibilidades e Aplicações, in *Ingenium*, 2006. p. 80-84.
34. Lourenço, P.B., Concepção e Projecto para Alvenaria, in *Seminário sobre Paredes de Alvenaria*, P.B. Lourenço & H.Sousa (eds), 2002. p. 77-110.

35. NP EN. 196-1, in Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas., 2006.
36. EN 1015-3 in Methods of test for mortar for masonry — Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1999.
37. EN 1015-11, in Methods of test for mortar for masonry Ð Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
38. Martinelli, Enzo, C.C., Motavalli, Masoud, Modeling in-plane and out-of-plane displacement fields in pull-off tests on FRP strips, in Engineering Structures, Elsevier Editor, 2011. p. 3715-3725.
39. Baena, Marta, L.T., Turon, Albert, Barris, Cristina, Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, in Composites Part B: Engineering, Elsevier Editor, 2009. p. 784-797.
40. Kashyapa, J., C.R.W., Griffitha, M.C., Inghamb, J.M., Masiac, M.J., Debonding resistance of FRP-to-clay brick masonry joints, in Engineering Structures, Elsevier Editor, 2012. p. 186-198.
41. NP EN ISO 2062, in Têxteis - Fios sob a forma de enrolamento. Determinação da força de rotura e alongamento de rotura., 1997.
42. ASTM D5034, in Historical Standard: ASTM D5034-95 Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test), 1995.
43. BS EN 1052-2, in Methods of test of masonry - Part 2: Determination of flexural strength, 1999.
44. NP EN 772-1, in Métodos de ensaios de blocos para alvenaria. Parte 1 - Determinação da resistência à compressão, 2002.

ANEXOS

A1 – Informação técnica acerca dos materiais utilizados

Argamassa de Reboco de Uso Geral (GP) para aplicação exterior	
	Designação: RHP Plus Exterior
	Norma de referência: EN 998-1
	Utilização prevista: Argamassa industrial de ligantes inorgânicos para revestimentos exteriores de paredes e tectos.
Características	
Aderência ao tijolo e bloco / modo de fractura	0.2 N/mm ² / A e B
Absorção de água por capilaridade	Classe W1
Permeabilidade ao vapor de água	μ 15
Reacção ao fogo	Classe A1
Condutividade térmica (valor tabelado)	($\lambda_{10, dry}$) 0.47 W/m.K (P = 50%)
Durabilidade	Até existir ensaio normalizado, a avaliação é baseada em disposições validadas no local de utilização da argamassa

Anexo A1 (a) – Especificações técnicas da argamassa utilizada na série 1 dos ensaios de aderência

Massa volúmica (pó)	1500 ± 200 kg/m ³
Consistência (espalhamento)	170 ± 5 mm
Tempo aberto	60 min
Massa volúmica (pasta)	1750 ± 200 kg/m ³
R. Compressão (28 dias)	≥ 6 N/mm ²
Adesão sobre betão (28 dias)	≥ 0,15 N/mm ² – FP:B
Capilaridade (28 dias)	≤ 0,40 kg/m ² min ^{0.5}
Permeabilidade ao vapor de água	μ ≤ 15
Condutividade Térmica ($\lambda_{10, dry}$)	0,5 W/mK (V.M. Tabelado; P=50%)
Rendimento	15 ± 1 kg/m ² cm de espessura

Anexo A1 (b) – Especificações técnicas da argamassa utilizada nos ensaios de aderência na série 2 e no reboco das paredes de alvenaria

Teor em Cloro: < 0,1% (EN 1015-17:2000)
 Consistência: 15.0 ± 0.5 cm (EN 1015-3:1999)
 Resistência à compressão aos 28 dias: >10 MPa (EN 1015-11:1999)
 Tempo Aberto: > 60 min (EN 1015-9:1999)
 Densidade Fresca: 1950 ± 200 Kg/m³ (EN 1015-6:1998)
 Baridade: 1500 ± 200 Kg/m³ (EN 459-2:2001)

Anexo A1 (c) – Especificações técnicas da argamassa de assentamento utilizada nas paredes de alvenaria

Dados técnicos

Base	Resina de epoxi.
Massa volúmica (A+B)	Aprox. 1,6 kg/litro.
Proporção da mistura	(A+B) = 3/1 (em peso).
Aderência (resistência da colagem à tracção)	Sobre betão seco ou húmido: > 3,5 N/mm ² (rotura coesiva no betão). Sobre aço esmerilado: aprox. 15 N/mm ² .
Resistências mecânicas	Compressão: 60 a 70 MPa. Tracção por flexão: 30 a 40 MPa. As resistências mecânicas praticamente atingem o seu máximo logo às 24 horas, a 20°C.
Vida da mistura na lata (pot-life), a 20°C	40 a 45 minutos. O <i>pot-life</i> diminui quando a temperatura e/ou a quantidade de produto preparado aumentam. A temperatura óptima para aplicação situa-se entre +10°C e +30°C.

Anexo A1 (d) – Especificações técnicas da cola epóxi utilizada nos ensaios à tração de malhas

DATI TECNICI (valori tipici)	
DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO	
Tipo di fibra:	fibre di vetro A.R.
Grammatura (g/m ²):	225
Dimensione delle maglie (mm):	25 x 25
Classificazione di pericolo secondo Direttiva 99/45/CE:	nessuna
Voce doganale:	7019 90 99
DATI APPLICATIVI	
Resistenza a trazione (kN/m):	45
Allungamento a rottura (%):	< 3

Anexo A1 (e) – Informação técnica da malha Mapei Mapegrid G220

Technical data	ARMO-mesh L500
Elastic modulus (theoretical) [kN/mm ²]	240
Reduction factor on elastic modulus due to application	1.5
Elastic modulus (reduced) for design [kN/mm ²]	160
Ultimate tensile strength C-fibre (theor.) [N/mm ²]	4'300
Weight of C-fibre in main direction [g/m ²]	200
Density C-fibre [g/cm ³]	1.7
Elongation at rupture (therotical) [%]	1.75
Theoretical thickness of C-fibre for design (fibre weigh t + density) [mm]	0.117
Theoretical cross section C-fibre for design [mm ² /m]	117
Ultimate tensile force at 1.75 % (theoretical) [kN/ m]	500
Tensile force for desing (S&P recommendation)	
Flexural (~ 800 N/mm²) (Limit strain at ultimate state 0.5 %) [kN/m]	93.6
Axial (~ 640 N/mm²) (Limit strain at ultimate state 0.4 %) [kN/m]	74.8

Anexo A1 (f) – Informação técnica da malha S&P ARMO L500

A2- Informação sobre os resultados médios obtidos no estudo de aderência.

Anexo A2 (a) – Resultados dos ensaios de aderência da Série 1

Série_1		Rugosidade com 8 fios		Rugosidade com 16 fios		$\Delta_{16fios/8fios}^{Série\ 1}$ (%)
		F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	
Tipologia de varão						
0evmax	Média	0,60	4,47	0,60	4,47	
	C.O.V (%)	9,45	42,80	9,45	42,80	
0evmin	Média	0,60	5,00	0,60	5,00	
	C.O.V (%)	27,24	45,78	27,24	45,78	
1evmax	Média	2,09	5,32	0,96	7,18	217,05
	C.O.V (%)	6,46	38,23	10,07	5,50	
	$\Delta_{1evmax/0evmin}$ (%)	350,07		161,28		
1evint	Média	1,46	5,50	1,14	6,33	128,12
	C.O.V (%)	13,48	32,01	16,57	12,84	
	$\Delta_{1evint/0evmin}$ (%)	245,00		191,23		
1evmin	Média	1,72	12,28	1,17	7,46	146,80
	C.O.V (%)	11,36	26,98	21,08	35,00	
	$\Delta_{1evmin/0evmin}$ (%)	288,71		196,67		
2evmax	Média	1,80	3,06	0,93	7,00	193,60
	C.O.V (%)	22,66	57,51	15,23	10,22	
	$\Delta_{2evmax/0evmin}$ (%)	301,45		155,71		
2evint	Média	1,30	3,32	1,07	4,44	121,55
	C.O.V (%)	20,51	29,90	22,75	29,32	
	$\Delta_{2evint/0evmin}$ (%)	218,61		179,86		
2evmin	Média	1,62	12,44	1,10	3,73	147,45
	C.O.V (%)	8,44	30,58	12,48	24,77	
	$\Delta_{2evmin/0evmin}$ (%)	271,63		184,21		
Média F_{max} (kN)		1,40		0,95		147,80
Média $\Delta_{rug/0evmin}$ (%)		279,25		178,16		

Anexo A2 (b) – Resultados dos ensaios de aderência da Série 2

Série_2		Rugosidade com 8 fios		Rugosidade com 16 fios		$\Delta_{16\text{fios}/8\text{fios}}^{\text{Série 2}}$ (%)
Tipologia de varão		F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	
0evmax	Média					
	C.O.V (%)					
0evmin	Média	0,62	2,63	0,62	2,63	
	C.O.V (%)	18,14	37,76	18,14	37,76	
1evmax	Média	2,49	3,91	1,45	0,79	172,25
	C.O.V (%)	14,25	0,58	30,70	73,14	
	$\Delta_{1evmax/0evmin}$ (%)	401,44		233,06		
1evint	Média	1,55	4,58	1,83	2,14	84,96
	C.O.V (%)	36,68	20,33	18,27	92,46	
	$\Delta_{1evint/0evmin}$ (%)	250,69		295,08		
1evmin	Média	2,09	1,78	1,88	2,31	111,41
	C.O.V (%)	13,87	80,69	13,44	185,18	
	$\Delta_{1evmin/0evmin}$ (%)	336,96		302,46		
2evmax	Média	1,92	2,45	1,33	3,49	143,78
	C.O.V (%)	7,80	44,60	27,45	91,46	
	$\Delta_{2evmax/0evmin}$ (%)	309,41		215,20		
2evint	Média	1,36	3,20	1,46	7,92	93,54
	C.O.V (%)	25,20	24,44	35,82	44,45	
	$\Delta_{2evint/0evmin}$ (%)	219,98		235,17		
2evmin	Média	1,63	1,06	1,68	3,92	96,84
	C.O.V (%)	9,32	32,60	16,67	40,26	
	$\Delta_{2evmin/0evmin}$ (%)	262,98		271,57		
Média F_{max} (kN)			1,67		1,46	113,85
Média $\Delta_{rug/0evmin}$ (%)		111	296,91		258,76	