

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE BASE CIMENTÍCIA REFORÇADAS COM FIBRAS SINTÉTICAS

Cristina M. V. Frazão
Joaquim A. O. de Barros
Delfina M. F. Gonçalves
Esmael Esmaeli

Relatório 14-DEC/E-24

O presente relatório foi realizado no âmbito do projeto “INOTEC – Material inovador de ultra elevada ductilidade para a reabilitação do património construído”, inserido no programa QREN - Projeto nº 23024, gerido pela Agência de Inovação e co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional do Norte

Data: Dezembro 2014

Páginas: 77

Palavras-chave: Fiber reinforced cement composite (FRCC), fibras PAN, fibras de vidro, fibras PVA, *ARMO-crete w*, propriedades reológicas, propriedades mecânicas e durabilidade.



Escola de Engenharia



Departamento de Engenharia Civil



Universidade do Minho



ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	8
2	MATERIAIS E COMPOSIÇÕES	9
2.1	Introdução	9
2.2	Materiais	9
2.2.1	Cimento	9
2.2.2	Cinzas volantes.....	10
2.2.3	Fíler Calcário.....	11
2.2.4	Agregados – Areia fina	12
2.2.5	Água	12
2.2.6	Superplastificante	13
2.2.7	VMA	13
2.2.8	Fibras.....	14
2.2.9	S&P ARMO-crete w	14
2.3	Composições	15
3	PROPRIEDADES REOLÓGICAS	19
3.1	Introdução	19
3.2	Consistência por espalhamento (“by flow table”).....	19
3.3	Teor de ar	20
3.4	Massa volúmica	22
3.5	Retenção de água	23
4	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	26
4.1	Módulo de elasticidade secante em compressão	26
4.2	Comportamento em compressão	29
4.2.1	Provetes cilíndricos	29
4.2.2	Provetes cúbicos.....	34
4.3	Comportamento em flexão.....	37
4.3.1	Argamassas ARMO-crete w e FRCC-PAN	37
4.3.2	Argamassas FRCC-GF e FRCC-PVA.....	39
5	ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	45
5.1	Absorção de água por capilaridade	45
5.2	Permeabilidade ao ar e à água.....	48
5.3	Variação dimensional (Retração por secagem)	58
5.4	Resistência aos sulfatos.....	61
5.5	Aderência ao suporte – Ensaio de pull-off	61
6	CONCLUSÕES	73
7	REFERÊNCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

2. Materiais e Composições

Figura 2.1 – Curvas granulométricas das areias finas	12
Figura 2.2 – Amassadura de FRCC-PAN	17
Figura 2.3 – Amassadura de FRCC-GF	17
Figura 2.4 – Amassadura de FRCC-PVA	17
Figura 2.4 – Amassadura de <i>ARMO-crete w</i>	17
Figura 2.5 – Preparação dos moldes	18

3. Propriedades reológicas

Figura 3.1 - Equipamento para a realização do ensaio de espalhamento	19
Figura 3.2 – Ensaio de espalhamento	20
Figura 3.3 - Aerómetro para argamassa	21
Figura 3.4 – Ensaio para determinação da retenção de água da argamassa	24

4. Características mecânicas

Figura 4.1 – Configuração do ensaio para determinação do módulo de elasticidade.....	27
Figura 4.2 – Representação dos ciclos de carga/descarga para determinação do módulo de elasticidade	28
Figura 4.3 – Variação do módulo de elasticidade das argamassas com a idade, obtida experimentalmente.....	29
Figura 4.4 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cilíndricos.....	30
Figura 4.5 - Relação tensão-extensão do FRCC-PAN	30
Figura 4.6 - Relação tensão-extensão do FRCC-PAN	30
Figura 4.7 - Relação tensão-extensão do FRCC-GF	31
Figura 4.8 - Relação tensão-extensão do FRCC-GF	31
Figura 4.9 - Relação tensão-extensão do FRCC-PVA	31
Figura 4.10 - Relação tensão-extensão do FRCC-PVA	31
Figura 4.11 - Relação tensão-extensão do <i>ARMO-crete</i>	31
Figura 4.12 - Relação tensão-extensão de <i>ARMO-crete</i>	31
Figura 4.13 – Relação média da tensão-extensão em compressão do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	32
Figura 4.14 – Variação da resistência à compressão das argamassas em estudo com a idade, obtida experimentalmente	33
Figura 4.15 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN.....	33
Figura 4.16 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF	33
Figura 4.17 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA.....	34
Figura 4.18 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de <i>ARMO-crete w</i>	34

Figura 4.19 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cúbicos	35
Figura 4.20 – Relação média da tensão-extensão em compressão do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	35
Figura 4.21 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN.....	36
Figura 4.22 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF	36
Figura 4.23 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA.....	36
Figura 4.24 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de <i>ARMO-crete w</i>	36
Figura 4.25 – Ensaio de resistência à flexão dos provetes prismáticos.....	37
Figura 4.26 - Relação força-flecha do FRCC-PAN e do <i>ARMO-crete w</i>	38
Figura 4.27 - Relação força-flecha do <i>ARMO-crete w</i>	38
Figura 4.28 - Relação força-flecha do FRCC-PAN	38
Figura 4.29 - Relação força-flecha do FRCC-PAN	38
Figura 4.30 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PAN	39
Figura 4.31 – Aplicação da carga e posicionamento dos transdutores.....	40
Figura 4.32 - Diagrama força vs. CMOD (CEB-FIP MODEL CODE)	40
Figura 4.33 - Relação força-flecha do FRCC-GF.....	41
Figura 4.34 - Relação força-flecha do FRCC-GF.....	41
Figura 4.35 - Relação força-flecha do FRCC-PVA	42
Figura 4.36 - Relação força-flecha do FRCC-GF.....	42
Figura 4.37 - Relação força-flecha do FRCC-GF e do FRCC-PVA (8 e 28 dias)	43
Figura 4.38 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-GF	44
Figura 4.39 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PVA	44

5. Ensaio de durabilidade

Figura 5.1- Comportamento capilar em função do tempo [24].....	46
Figura 5.2 – Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por capilaridade.....	47
Figura 5.3 – Absorção capilar dos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	47
Figura 5.4 - Permeâmetro de Leeds.....	51
Figura 5.5 - Provetes utilizados	51
Figura 5.6 – Ensaio para a determinação da porosidade aberta	51
Figura 5.7 - Medição do fluxo que atravessa o provete	52
Figura 5.8 - Penetração da solução em provete de FRCC-PAN	53
Figura 5.9 - Penetração da solução em provete de FRCC-GF	53
Figura 5.10 - Penetração da solução em provete de FRCC-PVA	53
Figura 5.11 - Penetração da solução em provete de.....	53



Figura 5.12 – Coeficiente de permeabilidade ao ar nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	56
Figura 5.13 – Coeficiente de permeabilidade à água nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete</i>	58
Figura 5.14 – Método de medição da retração das argamassas.....	60
Figura 5.15 – Resultados dos ensaios de retração dos provetes de FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	60
Figura 5.16 – Resultados dos ensaios de perda de massa dos provetes de FRCC-GF, FRCC-PVA e <i>ARMO-crete w</i>	61
Figura 5.17 – Ciclos de imersão (a) e secagem (b) de provetes de FRCC-GF e <i>ARMO-crete w</i>	62
Figura 5.18 – Relação média da tensão-extensão em compressão de provetes sujeitos à ação dos sulfatos	63
Figura 5.19 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN.....	64
Figura 5.20 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF	64
Figura 5.21 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA.....	64
Figura 5.22 - Relação média da força-flecha de provetes sujeitos à ação dos sulfatos	66
Figura 5.23 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PAN	67
Figura 5.24 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-GF	67
Figura 5.25 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PVA	67
Figura 5.25 - Modo de rotura em flexão dos provetes de <i>ARMO-crete</i>	68
Figura 5.27 – Realização dos ensaios de pull-off com equipamento de arrancamento	69
Figura 5.28 – Modos de rotura dos provetes tijolo/FRCC-PAN.....	70
Figura 5.29 – Modos de rotura dos provetes tijolo/FRCC-GF.....	70
Figura 5.30 – Modos de rotura dos provetes tijolo rebocado/FRCC-GF	71



ÍNDICE DE QUADROS

2. Materiais e Composições

Quadro 2.1 - Características químicas do cimento.....	9
Quadro 2.2 - Características mecânicas do cimento	9
Quadro 2.3 - Características físicas do cimento.....	9
Quadro 2.4 - Composição química do cimento.....	10
Quadro 2.5 - Composição potencial do cimento.....	10
Quadro 2.6 – Composição química das cinzas volantes	10
Quadro 2.7 - Características químicas das cinzas volantes	11
Quadro 2.8 - Composição potencial das cinzas volantes	11
Quadro 2.9 - Características físicas do filler calcário	11
Quadro 2.10 - Características químicas do filler calcário	12
Quadro 2.11 - Características do ViscoCrete 3002 da Sika	13
Quadro 2.12 - Características do CHRYSO Aquabeton	13
Quadro 2.13 - Propriedades das fibras.....	14
Quadro 2.14 - Propriedades da argamassa S&P ARMO-crete w.....	15
Quadro 2.15 – Composições do FRCC-PAN e do FRCC-GF por m ³	15
Quadro 2.16 – Proporções dos constituintes da composição baseada na percentagem em peso.....	16
Quadro 2.17 – Provetes moldados para os ensaios de caracterização mecânica	16
Quadro 2.18 – Provetes moldados para os ensaios de avaliação da durabilidade	17

3. Propriedades reológicas

Quadro 3.1 – Resultados dos ensaios de espalhamento	20
Quadro 3.2 - Valores médios de dois ensaios de determinação do teor de ar	22
Quadro 3.3 - Valores médios de dois ensaios de determinação da massa volúmica	23
Quadro 3.4 - Valores médios de dois ensaios de determinação da retenção de água.....	25

4. Características mecânicas

Quadro 4.1 – Valores médios de três ensaios de determinação do módulo de elasticidade	28
Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão	32
Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão	36
Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à flexão.....	38
Quadro 4.5 – Resistências residuais médias do FRCC-GF, de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE	42



Quadro 4.6 – Resistências residuais médias do FRCC-PVA, de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE43

5. Ensaios de durabilidade

Quadro 5.1 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo48

Quadro 5.2 – Resultados da porosidade aberta54

Quadro 5.3 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-PAN54

Quadro 5.4 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-GF55

Quadro 5.5 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-PVA55

Quadro 5.6 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no *ARMO-crete w*55

Quadro 5.7 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-PAN56

Quadro 5.8 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-GF57

Quadro 5.9 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-PVA57

Quadro 5.10 - Coeficiente de permeabilidade à água no *ARMO-crete w*57

Quadro 5.11 – Resultados dos ensaios de compressão63

Quadro 5.12 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-PAN65

Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-GF65

Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-PVA65

Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão do *ARMO-crete*66

Quadro 5.16 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico e camada de FRCC-PAN70

Quadro 5.17 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico e camada de FRCC-GF71

Quadro 5.12 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico rebocado e camada de FRCC-GF71



1 INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta a campanha experimental realizada no âmbito da caracterização das propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do material de matriz cimentícia reforçado com relativa elevada percentagem de fibras, designado por FRCC – “*Fiber Reinforced Cement Composite*”, desenvolvido para o projeto **INOTEC – Material Inovador de Ultra-Elevada Ductilidade para a Reabilitação do Património Construído**.

O material FRCC tem a particularidade de apresentar resistência última à tração superior à tensão de início da fendilhação da sua matriz, e rotura por tração para níveis de extensão muito elevados, superiores a 2%. Para além da elevada capacidade de absorção de energia, indicada pelo padrão de fendilhação difuso, o que para além da extraordinária capacidade de absorção de energia, protege eficazmente os materiais que envolve de efeitos nefastos de agentes de agressividade ambiental.

A campanha experimental realizada consistiu na execução de ensaios de avaliação das propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade de três argamassas desenvolvidas do FRCC, nomeadamente a argamassa denominada FRCC-PAN cujo reforço é constituído por fibras PAN (Poliacrilonitrila), a argamassa denominada FRCC-GF constituída por reforço em fibras de vidro e a argamassa denominada FRCC-PVA constituída por reforço com fibras PVA. De modo a comparar e analisar os resultados obtidos, foram também realizados os mesmos ensaios com uma argamassa de base cimentícia, denominada *ARMO-crete w*, comercializada pela empresa *S&P Clever Reinforcement*.

2 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

2.1 INTRODUÇÃO

Na presente secção apresenta-se a caracterização dos materiais base constituintes das argamassas desenvolvidas, assim como as respetivas composições adotadas.

2.2 MATERIAIS

2.2.1 CIMENTO

O cimento utilizado foi um cimento Portland tipo I classe 42.5 R (CEM I 42.5R) da SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., certificado de acordo com a Norma NP EN 197-1 [1]. Nos Quadros 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 apresentam-se, respetivamente, as principais características químicas, mecânicas e físicas, a composição química e a composição potencial do cimento de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 2.1 - Características químicas do cimento

Propriedades	Método de Ensaio	Valor (%)
Perda ao fogo	NP EN 196-2	3.20
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2	0.90
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	3.33
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	0.02
Cal livre	NP EN 451-1	1.28

Quadro 2.2 - Características mecânicas do cimento

Resistência à Compressão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
34.4	46.8	57.2
Resistência à Flexão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
6.1	7.8	8.9

Quadro 2.3 - Características físicas do cimento

Propriedades	Método de Ensaio	Valor
Massa volúmica (kg/m ³)	LNEC E-64	3150
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	NP EN 196-6	3873
Resíduo 45 µm (%)	NP EN 196-6	2.00
Princípio de Presa (min)	NP EN 196-3	Início: 116; Fim: 147
Expansibilidade (mm)	NP EN 196-3	0.70

Quadro 2.4 - Composição química do cimento

Composição	Símbolo	Valor (%)
Óxido de silício	SiO ₂	19.82
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	4.22
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	3.40
Óxido de cálcio	CaO	62.66
Óxido de magnésio	MgO	3.47

Quadro 2.5 - Composição potencial do cimento

Composição	Símbolo	Valor (%)
Silicato tricálcico	C ₃ S	64.39
Silicato bicálcico	C ₂ S	5.24
Aluminato tricálcico	C ₃ A	6.26
Aluminoferrato tetracálcico	C ₄ AF	9.42
Sulfato de cálcio	CS	5.66

2.2.2 CINZAS VOLANTES

As cinzas volantes são utilizadas como adições pozolânicas na produção de materiais cimentícios associadas a uma substituição da dosagem do cimento sem comprometer o necessário desempenho das estruturas e com benefícios do ponto de vista económico, ecológico e ambiental. As cinzas volantes utilizadas neste estudo são provenientes da Central termoelétrica do Pego. No Quadro 2.6 e 2.7 apresentam-se a composição química e as principais características químicas e no Quadro 2.8 as principais propriedades físicas das cinzas volantes.

Quadro 2.6 – Composição química das cinzas volantes

Composição	Símbolo	Valor (%)
Óxido de silício	SiO ₂	60.87
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	20.40
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	7.82
Óxido de cálcio	CaO	2.72
Óxido de magnésio	MgO	1.40

Quadro 2.7 - Características químicas das cinzas volantes

Propriedades	Método de Ensaio	Valor (%)
Perda ao fogo	NP EN 196-2	7.30
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2	-
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	0.22
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	0.00
Cal livre	NP EN 451-1	0.00

Quadro 2.8 - Composição potencial das cinzas volantes

Composição	Símbolo	Valor (%)
Silicato tricálcico	C ₃ S	66.33
Silicato bicálcico	C ₂ S	4.06
Aluminato tricálcico	C ₃ A	5.42
Aluminoferato tetra-cálcico	C ₄ AF	9.94
Sulfato de cálcio	CS	5.13

2.2.3 FÍLER CALCÁRIO

O Fíler calcário utilizado foi o Betoflow fornecido pela Omya Comital - Minerais e Especialidades, SA., que se trata de um carbonato de cálcio ultrafino, cujo tamanho e superfície dos grãos utiliza pouca água, permitindo um aumento do rendimento do superplastificante redutor de água.

Do ponto de vista químico é quase inerte e por essa razão é considerada uma adição do tipo I de acordo com a NP EN 206-1 [2]. Esta adição é correntemente utilizada, quando se pretende aumentar a viscosidade da pasta, em especial quando se pretende que o aumento da quantidade de finos, não se traduza diretamente num aumento da resistência. Nos Quadros 2.9 e 2.10 apresentam-se as principais características físicas e químicas do fíler calcário de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 2.9 - Características físicas do fíler calcário

Propriedades	Método de Ensaio	Valor
Massa volúmica (kg/m ³)	LNEC E-64	2700
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	NP EN 196-6	>280
Partículas < 63 μm (%)	EN 12620	>70
Partículas < 125 μm (%)	EN 12620	>85
Partículas < 2 mm (%)	EN 12620	100

Quadro 2.10 - Características químicas do fíler calcário

Composição	Símbolo	Valor (%)
Carbonato de magnésio + Carbonato de cálcio (%)	MgCO ₃ + CaCO ₃	≥95.0
Teor de cloretos (%)	Cl	≤0.1
Teor de enxofre (%)	S	≤0.4
Teor de argila (kg)	-	≤10
Teor de matéria orgânica	-	<0.5
Teor de sulfatos	SO ₃	<0.2

2.2.4 AGREGADOS – AREIA FINA

No caso das argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF, a areia fina utilizada possui uma dimensão máxima do agregado de 1.19 mm. A areia foi fornecida pela empresa Unibetão e apresenta-se na Figura 2.1, a curva granulométrica obtida por peneiração, utilizando a série de peneiros ASTM de malha quadrada (análise realizada pela CiviTest).

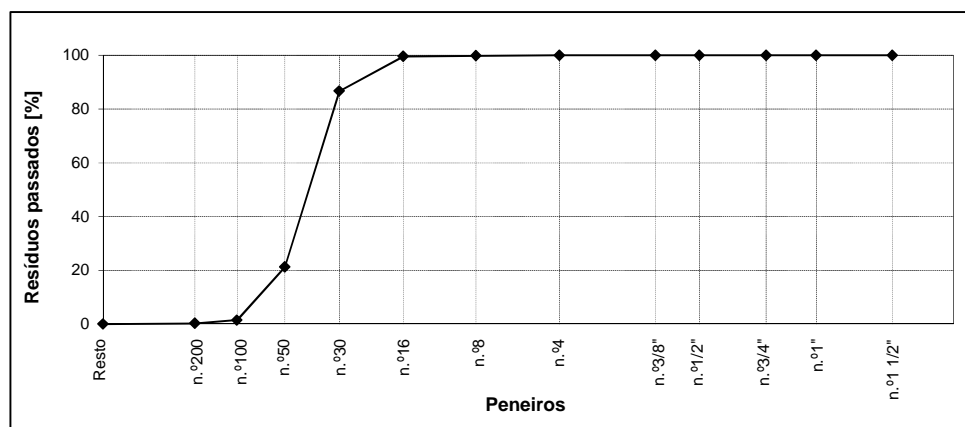


Figura 2.1 – Curva granulométrica da areia fina

No caso da argamassa FRCC-PVA foi utilizada uma areia fina com uma dimensão máxima de agregado de 0.50 mm.

2.2.5 ÁGUA

A água utilizada para a hidratação do cimento e início do processo de presa, foi a água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da rede pública do Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, no Campus de Azurém em Guimarães.

2.2.6 SUPERPLASTIFICANTE

A utilização de superplastificante na produção do FRCC é determinante para assegurar os requisitos simultâneos de desenvolvimento rápido das resistências iniciais, muito forte redução de água e consistência muito favorável a uma boa colocação.

No desenvolvimento das argamassas em estudo foi utilizado o adjuvante químico ViscoCrete 3002 HE da Sika. Este adjuvante permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, resultando argamassas com forte aumento de resistências mecânicas, compacidade elevada e permeabilidade muito baixa. No Quadro 2.11 apresentam-se as suas principais características, em conformidade com a norma EN 934-2.

Quadro 2.11 - Características do ViscoCrete 3002 da Sika

Características	ViscoCrete 3002
Aspeto	Líquido castanho claro
Massa Volúmica (kg/dm ³)	1.06 ± 0.02
pH	4.3 ± 1.0
Teor de sólidos (%)	26.5 ± 1.3
Teor em iões cloreto (%)	≤ 0.1
Dosagem recomendada (% do peso do cimento)	1.0 a 2.0

2.2.7 VMA

Os aditivos modificadores de viscosidade (VMA – *Viscosity Modifying Admixture*) têm como função melhorar a coesão das misturas no estado fresco de modo a obter uma mistura com elevada viscosidade, evitando a segregação e a perda de água por exsudação. No Quadro 2.12 apresentam-se as principais características do VMA utilizado nas composições das argamassas em estudo.

Quadro 2.12 - Características do CHRYSO Aquabeton

Características	CHRYSO Aquabeton
Aspeto	Pó quase branco
Viscosidade dinâmica a 20°C numa solução a 1%	150 ± 20 MPa.s
pH numa solução a 1%	8.0 ± 2.0
Dosagem recomendada (% do peso do cimento)	0.6 a 1.0

2.2.8 FIBRAS

Na composição da argamassa FRCC-PAN foram utilizadas 3 tipos de fibras de Poliácilonitrila (PAN). Na composição da argamassa FRCC-GF foram utilizadas fibras de vidro (FV) e fibras de Polipropileno (PP). Na composição da argamassa FRCC-PVA foram utilizadas fibras de PVA (PVA). No Quadro 2.13 apresentam-se as principais propriedades geométricas e mecânicas das fibras utilizadas.

Quadro 2.13 - Propriedades das fibras

Fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Tração (MPa)	Densidade (kg/m^3)	Alongamento (%)
PAN6 L62	6	16	12.04	690	1.19	15-20
PAN6 IP1963	6	26	8.47	482	1.19	14-18
PAN12 IP1977	12	58	5.86	226	1.19	13-17
PP	12				0.91	
FV	12	5-15	70-80	2000-4000	2.58	2.5-4.8
PVA	8	40	40	1560	1.3	6.5

2.2.9 S&P ARMO-CRETE W

A argamassa *ARMO-crete w*, comercializada pela empresa *S&P Clever Reinforcement*, é uma argamassa de base cimentícia de elevada resistência mecânica e durabilidade, desenvolvida para utilização em reforço estrutural. Esta argamassa é aplicada por projeção por via húmida no substrato em combinação com uma malha de fibras de carbono (*ARMO-mesh*), dando origem ao sistema *ARMO-system*. *S&P ARMO-crete w* é um produto de um componente constituído por ligantes inorgânicos, fibras, agregados seleccionados, adições, polímeros e por um componente especial reactivo com a *ARMO-mesh* permitindo uma notável aderência entre estes dois componentes. A argamassa *ARMO-crete w* é preparada por mistura mecânica com a adição de água (14% do peso) até se obter uma mistura homogénea. No Quadro 2.14 apresentam-se as principais características da argamassa *ARMO-crete w*.

Quadro 2.14 - Propriedades da argamassa S&P ARMO-crete w

Tipo	Argamassa projetável
Aspeto	Pó
Cor	Cinzentos
pH	12
Densidade	$\approx 2.05 \text{ kg/dm}^3$
Tamanho máximo dos grãos	2.5-3.0 mm
Teor de água	15-17% do peso
Temperatura de aplicação	5-30°C
Resistência aos sulfatos (SAI 262/1-D)	$\Delta l < 0.3\%$
Resistência ao gelo (SN 640 461)	Elevada
Impermeabilidade (SN EN 12390-8)	Penetração média $< 5 \text{ mm}$
Absorção de água (SN EN 1062-3)	$w \leq 0.2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0.5}$
Resistência à compressão (SN EN 12504-1)	$> 45 \text{ N/mm}^2$ (28 dias)
Aderência (SN EN 1542)	$\geq 2.0 \text{ N/mm}^2$ (28 dias)
Módulo de elasticidade (SAI 262/1-G)	$\leq 30000 \text{ N/mm}^2$
Retração (SAI 262/1-F)	$\epsilon_{CS(28)} \leq 0.50\%$
Resistência à flexão	6 N/mm^2 (28 dias em água)
Resistência aos ácidos (SN EN ISSO 175)	Elevada
Espessura de aplicação	5-50 mm

2.3 COMPOSIÇÕES

As composições das argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF foram desenvolvidas e optimizadas pela empresa CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda. No Quadro 2.15 apresentam-se as composições das argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF utilizadas, com dosagem de cada componente por m^3 .

Quadro 2.15 – Composições do FRCC-PAN e do FRCC-GF por m^3

	Cimento (kg)	Cinzas volantes (kg)	Fíler Calcário (kg)	Areia fina (kg)	Água (dm^3)	SP (dm^3)	VMA (kg)	Fibras (kg)	Água/L*
FRCC-PAN	534.85	534.85	102.11	213.94	415.32	32.09	3.42	1% PAN6+ 3% PAN12+ 1% PAN6_L62	0.39
FRCC-GF	546.49	668.75	-	437.16	317.78	21.00	3.42	4% FV+ 1% PP	0.26

*L: Ligante (cimento + cinzas volantes)

A matriz cimentícia da argamassa FRCC-PVA, desenvolvida por Esmaeli *et al.* [3], foi constituída por cimento Portland CEM I 42.5R, cinzas volantes, fíler calcário, areia fina, água e algumas adições

químicas. Foram misturados todos os constituintes da matriz até obter uma mistura homogénea, de acordo com as proporções indicadas no Quadro 2.16. Posteriormente foram adicionadas gradualmente à matriz homogénea, 2% em volume de fibras curtas de PVA.

Quadro 2.16 – Proporções dos constituintes da composição baseada na percentagem em peso

Cinzas volantes/Cimento	Água/L*	Areia/L*	Adições/L*	Fibras PVA**
120	24	50	2.2	2

**Percentagem do volume total do compósito

De modo a estabelecer comparação e análise de resultados, foi também produzida a argamassa comercial *ARMO-crete w*, adicionando 14% do peso de água, de acordo com as indicações do fornecedor *S&P Clever Reinforcement*.

Foram realizados igual número de provetes moldados com as argamassas consideradas, com dimensões de modo a respeitar as especificações das diferentes normas dos ensaios a realizar. Nos Quadros 2.17 e 2.18 apresentam-se a quantidade e as dimensões dos provetes produzidos de cada composição em estudo, de acordo com o ensaio a realizar.

Quadro 2.17 – Provetes moldados para os ensaios de caracterização mecânica
(FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*)

Caracterização mecânica	Provetes
Módulo de elasticidade (<i>prEN 12390-13, 2012</i>)	4 provetes cilíndricos (\varnothing 50 mm x 100 mm)
Resistência à Compressão (<i>NP EN 12390-3, 2011</i>) (<i>EN 1015-11, 1999</i>)	4 provetes cilíndricos (\varnothing 50 mm x 100 mm) e 4 provetes cúbicos (50 mm)
Resistência à flexão (<i>EN 1015-11, 1999</i>) (<i>RILEM TC 50-FMC, 1985</i>) (<i>CEB-FIP MODEL CODE, 2010</i>)	6 provetes prismáticos (40 x 40 x 160 mm ³)

Quadro 2.18 – Provetes moldados para os ensaios de avaliação da durabilidade
(FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*)

Avaliação da durabilidade	Provetes
Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18, 2002)	6 provetes prismáticos (40 x 40 x 160 mm ³)
Porosidade aberta (EN 1936, 2006)	6 carotes cilíndricos (φ 44 mm x 40 mm)
Permeabilidade ao ar e à água (Ensaio não normalizado)	6 carotes cilíndricos (φ 44 mm x 40 mm)
Variação dimensional (Retração) (ASTM C490, 2007)	3 provetes prismáticos (25 x 25 x 250 mm ³)
Resistência aos sulfatos (EN 12370, 2001) (ASTM C88, 2005)	8 provetes cúbicos (50 mm) e 8 provetes prismáticos (40 x 40 x 160 mm ³)
Aderência ao suporte – Ensaio de pull-off (EN 1015-12, 2000)	6 carotes cilíndricos (φ 44 mm)

As amassaduras das argamassas foram realizadas no **Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho (LMC)** e na **CiviTest - Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda.**, em local interior e protegido (Figuras 2.2, 2.3 e 2.4).



Figura 2.2 – Amassadura de FRCC-PAN



Figura 2.3 – Amassadura de FRCC-GF



Figura 2.4 – Amassadura de FRCC-PVA



Figura 2.5 – Amassadura de *ARMO-crete w*

Antes da execução das amassaduras foram preparados os moldes prismáticos e cilíndricos previstos, aplicando óleo descofrante em todas as superfícies interiores dos moldes (Figura 2.5) para facilitar a desmoldagem, o que ocorreu 3 dias depois, no caso do FRCC-PAN e do FRCC-GF e 2 dias depois, no caso do FRCC-PVA e do *ARMO-crete w*, período este dedicado à cura das argamassas. Após a realização das amassaduras, de modo a avaliar a trabalhabilidade das argamassas, realizaram-se ensaios de avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco, apresentados no ponto 3. Realizados estes ensaios, procedeu-se ao enchimento dos moldes com a mistura. A cura dos provetes foi realizada na câmara húmida do LMC, cuja temperatura é de $\approx 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a humidade relativa de 65 a 70%, de acordo com o indicado na norma EN 1015-11 [4].



Figura 2.6 – Preparação dos moldes

3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Imediatamente a seguir à conclusão das amassaduras foram realizados alguns ensaios de modo a avaliar a trabalhabilidade. Para tal foram efetuados os ensaios de espalhamento (“*Slump-flow test*”) e os ensaios de determinação do teor de ar, da massa volúmica e da retenção de água.

3.2 CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO (“BY FLOW TABLE”)

3.2.1 Descrição do ensaio

O ensaio de espalhamento tem por objetivo determinar a consistência da argamassa fresca sem qualquer tipo de obstrução, podendo fornecer também, por observação visual, alguma indicação em relação à capacidade de resistência à segregação e exsudação. O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3 [5].

Este ensaio consiste em centrar o molde tronco-cónico de 110 mm de base e 70 mm de altura no disco da mesa de espalhamento (Figura 3.1) e coloca-se a argamassa no molde em 2 camadas, sendo cada uma compactada por 10 pancadas com o pilão para assegurar o enchimento uniforme do molde. Retira-se a argamassa em excesso rasando com uma colher de pedreiro e após 15 segundos levanta-se o molde vertical e lentamente. De seguida, submete-se a mesa de espalhamento a 15 pancadas, através da rotação manual do manípulo com uma frequência constante de uma pancada por segundo. Por fim, mede-se o diâmetro final em duas direções perpendiculares, cuja média corresponde ao valor do espalhamento (d_{med}).

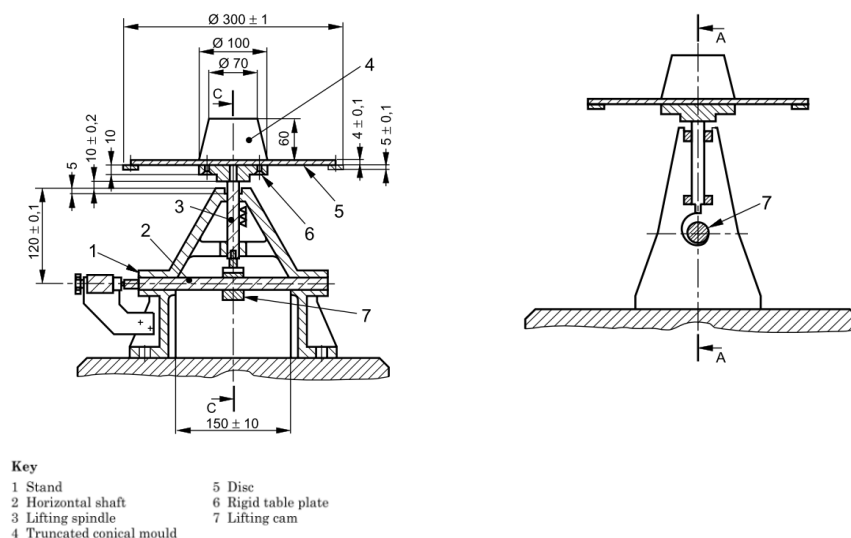


Figura 3.1 - Equipamento para a realização do ensaio de espalhamento



Figura 3.2 – Ensaio de espalhamento

Realizou-se um ensaio de espalhamento por cada amassadura, num total de dois ensaios por cada composição.

3.2.2 Análise de resultados

No Quadro 3.1 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento.

Quadro 3.1 – Resultados dos ensaios de espalhamento

Argamassa	d_{med} (mm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
FRCC-PAN	124	3	2.28
FRCC-GF	185	8	4.35
FRCC-PVA	185	7	3.82
ARMO-crete w	194	14	7.07

De acordo com Haach *et al.* [6], a consistência considerada ideal para uma argamassa de reboco é de 175 mm. Verifica-se pelos resultados obtidos que as fibras PAN provocam uma redução da trabalhabilidade da argamassa mais significativa, em comparação com as fibras de vidro e de PVA. Este facto poderá ser explicado por as fibras absorverem na sua superfície uma elevada quantidade de água, diminuindo a água livre na mistura e a distância entre as diferentes partículas na argamassa, prejudicando, assim, a sua fluidez.

3.3 TEOR DE AR

3.3.1 Descrição do ensaio

O teor de ar incorporado corresponde, em percentagem volumétrica, à quantidade de ar contida na argamassa em pasta. Segundo Silva *et al.* [7], o ar incorporado serve de lubrificante entre os grãos

sólidos da argamassa, melhorando a sua trabalhabilidade e capacidade de retenção de água. No entanto, em valores elevados pode prejudicar a consistência e reduzir a resistência de aderência. Quanto maior o teor de ar incorporado, maior o volume de vazios, o que implica uma maior porosidade e, por conseguinte, uma diminuição da resistência à compressão da argamassa.

A determinação do teor de ar da argamassa fresca foi realizada por intermédio do método da pressão, utilizando um aerómetro (Figura 3.3) e de acordo com a norma EN 1015-7 [8]. O procedimento para a realização do ensaio consiste em encher o recipiente com a argamassa, deixando a superfície completamente rasa. De seguida, fecha-se o aerómetro, fixando com os grampos o conjunto da tampa. Abre-se as válvulas e introduz-se água numa válvula, para preencher o restante volume do recipiente, até sair água na outra válvula. Fecham-se ambas as válvulas e introduz-se pressão na câmara superior com a bomba de ar, até que o ponteiro do manómetro alcance o traço do ponto zero do medidor de pressão. Esta pressão inicial bombeada para a câmara antes do teste, serve para compensar a perda de volume de ar durante a medição do teor de ar da argamassa, que faz parte do próprio funcionamento do aerómetro definido pelo fabricante. Para iniciar o teste e medir o teor de ar da argamassa, activa-se a válvula de descarga de ar e lê-se no mostrador a percentagem de ar contida no interior da argamassa.



Figura 3.3 - Aerómetro para argamassa

Com a determinação do volume de vazios pode-se avaliar o desempenho das argamassas em estudo, em termos de durabilidade e resistência mecânica, uma vez que quanto menor for o volume de vazios contido na amassadura, maior a compacidade da mistura em fase de produção e consequentemente, melhor a qualidade e o desempenho das argamassas em estado endurecido.

3.3.2 Análise de Resultados

Determinou-se o teor de ar em cada amassadura realizada, por cada composição em estudo. No Quadro 3.2, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação do teor de ar da argamassa fresca.

Quadro 3.2 - Valores médios de dois ensaios de determinação do teor de ar

Teor de ar (%)	
FRCC-PAN	9.00
FRCC-GF	6.50
FRCC-PVA	10.00
<i>ARMO-crete w</i>	3.70

Verificou-se que a adição de fibras PAN e PVA provoca um aumento significativo do teor de ar incorporado nas argamassas, podendo causar um aumento da porosidade e conseqüentemente uma diminuição da durabilidade. No entanto, como se verá mais adiante, no caso da argamassa FRCC-PVA, o elevado teor de ar da argamassa no estado fresco não provocou um aumento da porosidade.

3.4 MASSA VOLÚMICA

3.4.1 Descrição do ensaio

A determinação da massa volúmica da argamassa fresca foi realizada de acordo com as recomendações da norma EN 1015-6 [9]. O procedimento do ensaio consiste em utilizar um recipiente cujo volume é conhecido (recipiente do aerómetro - $V = 1$ litro), e procede-se à pesagem do recipiente vazio (m_1) e após enchimento com argamassa (m_2). A massa volúmica, D expressa em kg/m^3 é determinada através da equação (3.1).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

3.4.2 Análise de Resultados

Determinou-se a massa volúmica em cada amassadura no estado fresco, por cada composição em estudo. No Quadro 3.3 apresentam-se os resultados obtidos da determinação da massa volúmica da argamassa fresca.

Quadro 3.3 - Valores médios de dois ensaios de determinação da massa volúmica

	D (kg/m³)
FRCC-PAN	1664.66
FRCC-GF	1828.82
FRCC-PVA	1819.25
ARMO-crete w	2190.73

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a FRCC-PAN é a argamassa que apresenta menor massa volúmica no estado fresco, o que se justifica pelo elevado teor de ar na argamassa.

3.5 RETENÇÃO DE ÁGUA

3.5.1 Descrição do ensaio

A retenção de água é a capacidade da argamassa, no estado plástico, de reter água de amassadura, mantendo a sua consistência ou trabalhabilidade, quando sujeita a condições de perda de água por evaporação e por sucção ou absorção por parte do suporte [10]. Uma retenção de água apropriada é essencial para o endurecimento adequado da argamassa, promovendo as reações de hidratação do ligante e um conseqüente ganho de resistência mecânica e de aderência [11, 12].

A realização deste ensaio serve para determinar a quantidade de água que fica retida na argamassa para as reações de hidratação após a sua aplicação no suporte e em que parte é absorvida por este. O método adotado segue as indicações da norma europeia EN 1015-8 [13].

O procedimento de ensaio consiste em utilizar um molde rígido com cerca de 100 mm de diâmetro e 25 mm de profundidade e 8 folhas de papel de filtro que sobrepostas têm aproximadamente 2 mm de espessura. Pesa-se o molde (m_1) e o papel de filtro (m_2), ambos devem estar limpos e secos. De seguida, preenche-se o molde com argamassa nivelando o topo e pesa-se o molde preenchido (m_3). Cobre-se a superfície da argamassa com gaze, seguindo-se a colocação do papel de filtro. A gaze serve para que não fique argamassa fresca aderente à primeira folha de papel de filtro, de modo a que a “massa húmida” das folhas de papel de filtro não seja deturpada por incluir argamassa [14]. Inverte-se o conjunto sobre uma superfície não absorvente (vidro) e comprime-se, colocando por cima um peso de 2 kg (Figura 3.4). Passados 5 minutos, coloca-se o molde na posição inicial e retira-se o papel de filtro, que se pesa (m_4).



Figura 3.4 – Ensaio para determinação da retenção de água da argamassa

A percentagem da água retida, R é determinada pela equação (3.2).

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que,

m_a - Massa de água utilizada na argamassa colocada no molde, determinada pela equação (3.3);

m_h - Massa do conjunto das 8 folhas de papel de filtro húmidas;

m_f - Massa do conjunto das 8 folhas de papel de filtro secas.

$$m_a = \frac{a_g \times (m_c - m_v)}{\sum_{i=1}^n c_i + a_g} \quad (3.3)$$

Em que,

a_g - Massa de água utilizada na amassadura;

m_c - Massa do molde cheio com argamassa;

m_v - Massa do molde vazio;

c_i - Massa de cada um dos restantes constituintes da argamassa.

3.5.2 Análise de resultados

Determinou-se a retenção de água em cada amassadura no estado fresco, por cada composição em estudo. No Quadro 3.4 apresentam-se os resultados obtidos da determinação da retenção de água das argamassas frescas.

Quadro 3.4 - Valores médios de dois ensaios de determinação da retenção de água

	R (%)	Água absorvida pelo substrato (%)
FRCC-PAN	99.46	0.54
FRCC-GF	98.41	1.59
FRCC-PVA	99.82	0.18
ARMO-crete w	92.79	7.21

Conforme se verifica, obtiveram-se valores elevados de retenção de água em todas as argamassas em estudo, o que é favorável do ponto de vista da resistência à fendilhação, permitindo evitar a sucção rápida por parte do suporte e da evaporação. A elevada retenção de água é ainda essencial para se obter um endurecimento adequado, promovendo as reações de hidratação do cimento e um consequente ganho de resistência mecânica e de aderência.

4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

O processo de caracterização mecânica das argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w* incluiu vários ensaios, nomeadamente, o ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante, o ensaio de avaliação do comportamento em compressão e o ensaio de avaliação do comportamento à flexão.

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade secante e o comportamento à compressão foram realizados recorrendo a provetes moldados (*ARMO-crete w* e FRCC-PAN) e a provetes caroteados (FRCC-GF e FRCC-PVA) cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme verificado no Quadro 2.17. As faces destes provetes cilíndricos foram previamente retificadas com equipamento apropriado, de modo a melhorar o contacto destas com os pratos de carga.

O comportamento à compressão foi ainda avaliado em provetes cúbicos de 50 mm e os ensaios de comportamento à flexão foram realizados recorrendo a provetes prismáticos normalizados com 160 x 40 x 40 mm³ (Quadro 2.19).

4.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE EM COMPRESSÃO

4.1.1 Descrição do ensaio

O módulo de elasticidade em compressão dos provetes cilíndricos foi obtido com base na norma NP EN 12390-13 [15], cujo método consiste em submeter o provete cilíndrico em controlo de força a, pelo menos, 3 ciclos de carga/descarga.

A configuração do ensaio deve ter dois anéis posicionados no centro dos provetes, distanciados entre si 1/3 da altura do provete. No anel superior são colocados três transdutores de deslocamentos (LVDTs – *Linear Variation Displacement Transducer*), dispostos no anel simetricamente formando ângulos de 120° entre si), conforme apresentado na Figura 4.1. A deformação obtém-se a partir dos três LVDTs, registando-se os deslocamentos entre os referidos anéis. Esta disposição evita que a deformação do equipamento de ensaio seja adicionada aos valores lidos pelos LVDTs. A aplicação da carga no provete é efetuada com recurso a uma peça de aço espessa de modo que seja suficientemente rígida para uniformizar a carga vertical (Figura 4.1).

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada em 3 provetes de cada tipo de argamassa, às idades de 14 e 28 dias.

O valor máximo da carga aplicada foi determinado a partir de um ensaio preliminar de compressão uniaxial num dos provetes cilíndricos de cada tipo de argamassa e a cada idade em estudo, de forma a garantir que a tensão aplicada não fosse superior a 30% da tensão de rotura.



Figura 4.1 – Configuração do ensaio para determinação do módulo de elasticidade

No início do ensaio foi aplicada uma tensão inicial de 0.5 MPa (σ_b). Posteriormente aumentou-se a força aplicada de forma contínua, a uma velocidade de 0.2 kN/s até se alcançar 1/3 da força média de rotura ($\sigma_a = f_c/3$). Esta carga foi mantida durante 60 segundos. Seguiu-se um ramo de descarga, à mesma velocidade com que se efetuou o carregamento até se ter atingido a tensão inicial (σ_b) e manteve-se esta carga novamente durante 60 segundos. De seguida, deu-se início a novo ciclo, do mesmo modo, até perfazer 4 ciclos. A lei de carregamento seguida nos ensaios de módulo de elasticidade encontra-se indicada na Figura 4.2. No 3º ciclo, os últimos 10s enquanto a σ_a é mantida foram destinados para efetuar a leitura da extensão $\varepsilon_{a,3}$ e no 2º ciclo, os últimos 10s quando a σ_b é mantida são destinados para efetuar as leituras da extensão $\varepsilon_{b,2}$. O módulo de elasticidade secante estabilizado, $E_{C,S}$ é definido por:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (4.1)$$

em que,

σ_a - tensão máxima aplicada, em MPa;

σ_b - tensão inicial, em MPa;

$\varepsilon_{a,3}$ - extensão para a tensão σ_a medida no 3º ciclo de carga;

$\varepsilon_{b,2}$ - extensão para a tensão σ_b medida no 2º ciclo de carga.

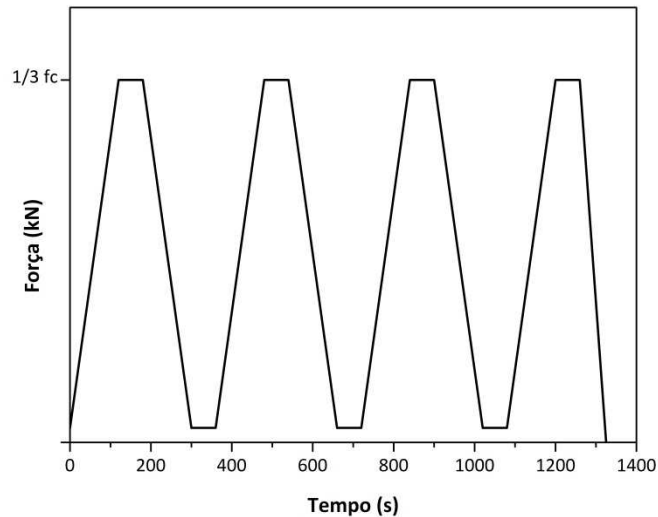


Figura 4.2 – Representação dos ciclos de carga/descarga para determinação do módulo de elasticidade

Após a determinação do módulo de elasticidade, os mesmos provetes foram utilizados para os ensaios de avaliação da resposta à compressão.

4.1.2 Análise de Resultados

No Quadro 4.1 são apresentados os valores médios obtidos do módulo de elasticidade nas argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *S&P ARMO-crete w* às diferentes idades, bem como os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação (CoV).

Quadro 4.1 – Valores médios de três ensaios de determinação do módulo de elasticidade

	FRCC - PAN		FRCC - GF		FRCC - PVA		<i>ARMO-crete w</i>	
Idade (dias)	14	28	14	28	14	28	14	28
E_{cm} (GPa)	7.03	9.67	8.74	14.11	18.36	18.82	32.43	38.24
Desvio Padrão	0.73	1.35	1.58	0.93	0.54	0.64	5.86	2.28
CoV (%)	10.36	13.96	18.02	6.61	2.97	3.40	18.08	5.97

No gráfico da Figura 4.3 apresenta-se a evolução do módulo de elasticidade médio dos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *S&P ARMO-crete w* com a idade, obtida experimentalmente.

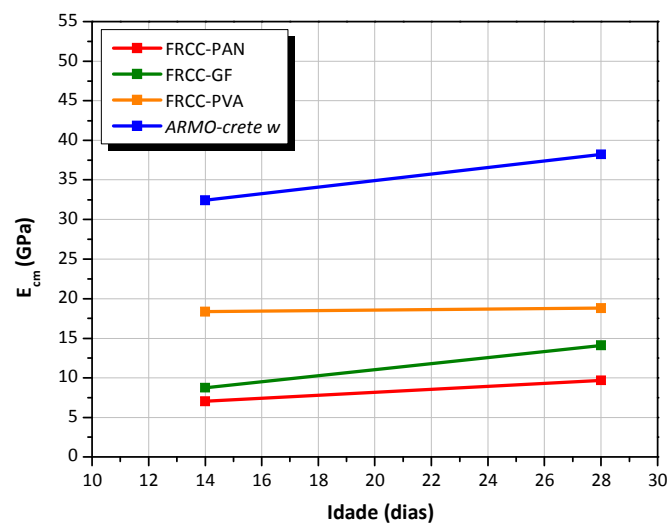


Figura 4.3 – Variação do módulo de elasticidade das argamassas com a idade, obtida experimentalmente

Conforme se observa, verifica-se que o *ARMO-crete w* apresenta valores de módulo de elasticidade muito superiores aos determinados nas restantes argamassas. Os baixos valores do módulo de elasticidade das argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF e FRCC-PVA poderão ser justificados pela reduzida dimensão máxima das partículas.

4.2 COMPORTAMENTO EM COMPRESSÃO

O comportamento em compressão das argamassas em estudo foi avaliado em provetes cilíndricos e cúbicos.

4.2.1 Provetes cilíndricos

4.2.1.1 Descrição do ensaio

O comportamento em compressão das argamassas em provetes cilíndricos foi avaliado através de ensaios de compressão realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, aplicando de um procedimento linear de carga sobre o provete em controlo de deslocamento do transdutor interno e a uma velocidade de 2 $\mu\text{m/s}$, conforme representado na Figura 4.4.

Com base nos valores registados pelo transdutor interno, determinou-se a relação tensão-extensão de compressão ($\sigma_c - \varepsilon_c$) para cada provete. De acordo com a norma NP EN 12390-3 [16], a tensão de compressão σ_c é a relação entre a força aplicada pelo atuador e a secção transversal do provete,

correspondente à área de contacto do atuador com o provete. A extensão ε_c é a relação entre o deslocamento do eixo do provete e a altura inicial do provete.



Figura 4.4 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cilíndricos

4.2.1.2 Análise de Resultados

Nas Figuras 4.5 e 4.6 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de FRCC-PAN, aos 14 e 28 dias de idade.

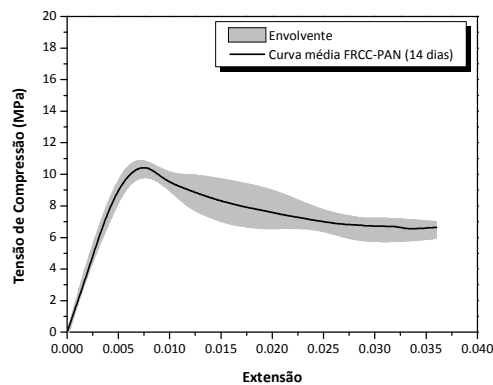


Figura 4.5 - Relação tensão-extensão do FRCC-PAN (14 dias)

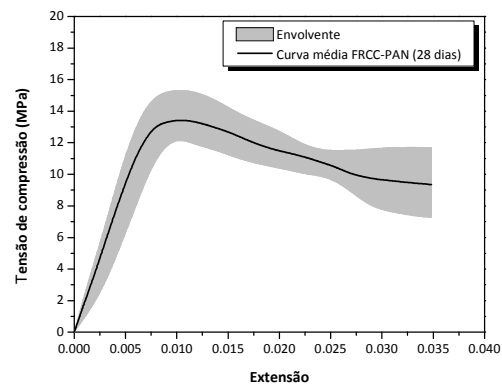


Figura 4.6 - Relação tensão-extensão do FRCC-PAN (28 dias)

Nas Figuras 4.7 e 4.8 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de FRCC-GF, aos 14 e 28 dias de idade.

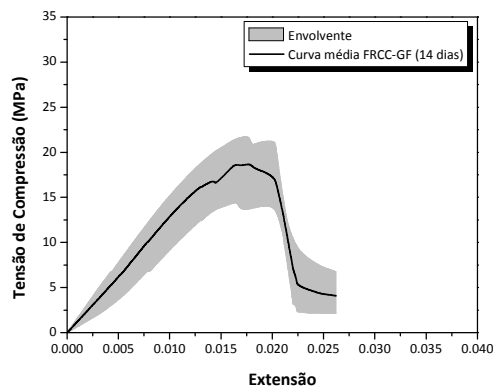


Figura 4.7 - Relação tensão-extensão do FRCC-GF (14 dias)

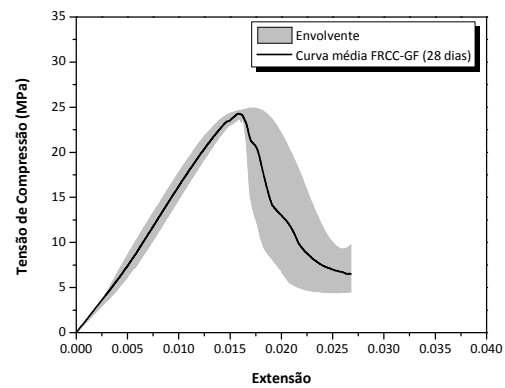


Figura 4.8 - Relação tensão-extensão do FRCC-GF (28 dias)

Nas Figuras 4.9 e 4.10 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de FRCC-PVA, aos 14 e 28 dias de idade.

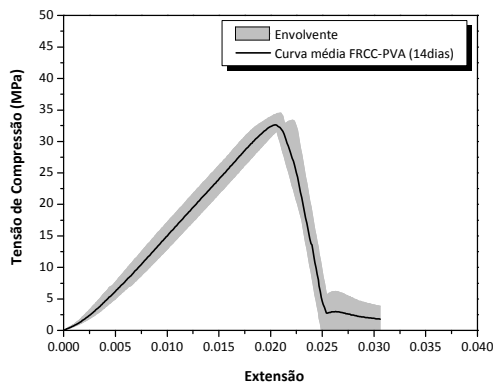


Figura 4.9 - Relação tensão-extensão do FRCC-PVA (14 dias)

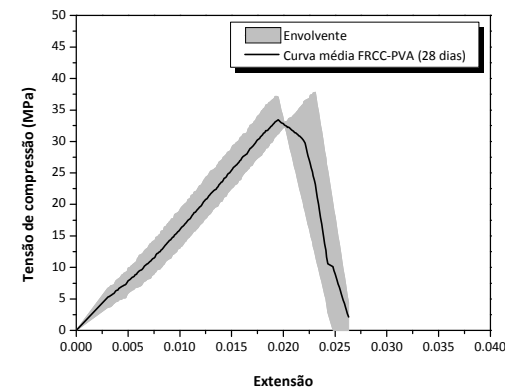


Figura 4.10 - Relação tensão-extensão do FRCC-PVA (28 dias)

Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de *ARMO-crete w*, aos 14 e 28 dias de idade.

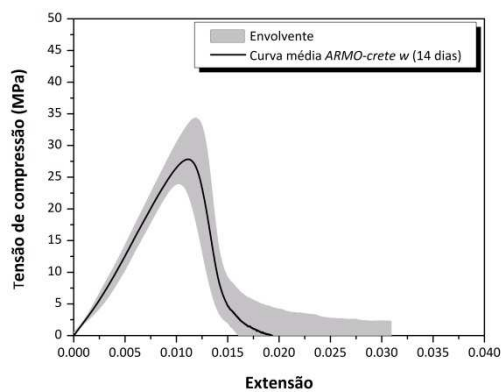


Figura 4.11 - Relação tensão-extensão do *ARMO-crete w* (14 dias)

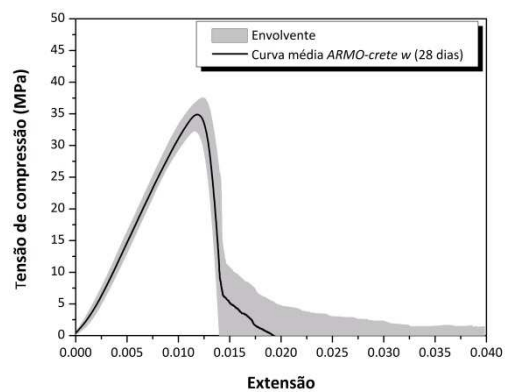


Figura 4.12 - Relação tensão-extensão de *ARMO-crete w* (28 dias)

Na Figura 4.13 apresentam-se as curvas médias tensão extensão de compressão de quatro provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, aos 14 e 28 dias de idade.

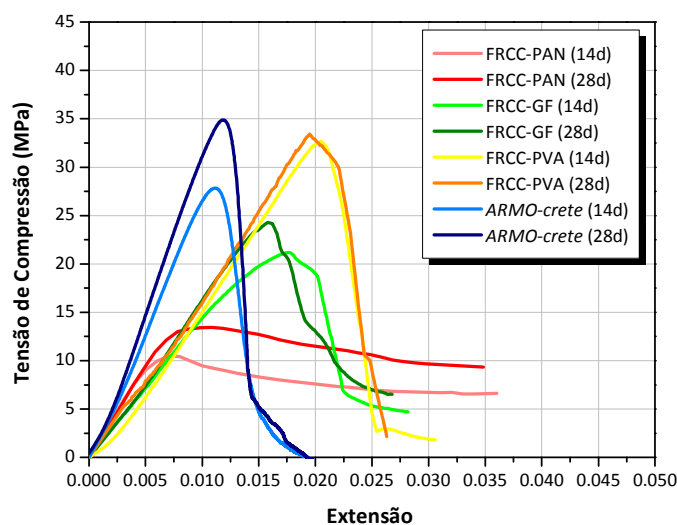


Figura 4.13 – Relação média da tensão-extensão em compressão de quatro respostas obtidas do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, aos 14 e 28 dias de idade

No Quadro 4.2 são apresentados os valores médios obtidos da resistência à compressão do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w* às diferentes idades, bem como os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão

	FRCC - PAN		FRCC - GF		FRCC - PVA		<i>ARMO-crete w</i>	
Idade (dias)	14	28	14	28	14	28	14	28
σ_{cm} (MPa)	10.61	14.17	18.42	24.68	33.10	36.63	29.99	36.46
Desvio Padrão	0.40	1.38	3.63	0.59	1.12	1.69	5.39	2.50
CoV (%)	3.81	9.77	19.70	2.41	3.37	4.63	17.98	6.85

No gráfico da Figura 4.14 apresenta-se a evolução da resistência à compressão média dos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w* com a idade, obtida experimentalmente.

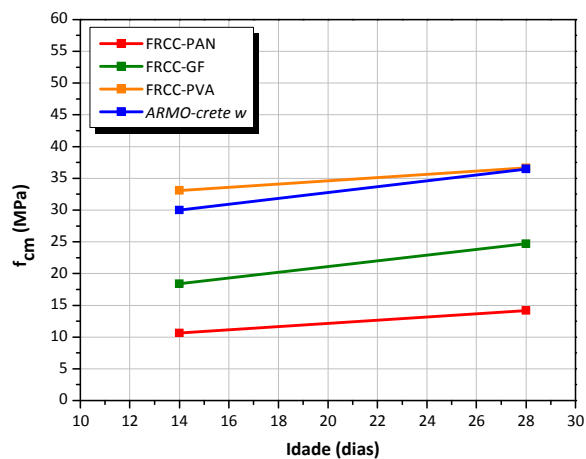


Figura 4.14 – Variação da resistência à compressão das argamassas em estudo com a idade, obtida experimentalmente

A análise das Figuras 4.13 e 4.14 e do Quadro 4.2 permite verificar que o *ARMO-crete w* e o FRCC-PVA apresentaram maior resistência de compressão, no entanto, o FRCC-PAN e o FRCC-GF apresentaram maior resistência pós pico, o que significa maior capacidade de absorção de energia por unidade de volume de material.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam os modos de rotura dos provetes cilíndricos depois da realização do ensaio de compressão.



Figura 4.15 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN



Figura 4.16 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF



Figura 4.17 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA



Figura 4.18 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de ARMO-crete w

No caso dos provetes de *ARMO-crete w*, após o pico de carga, as camadas laterais do provete destacaram-se e a capacidade de carga passou a ser garantida pela zona central do provete. Por outro lado, nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF e FRCC-PVA, após o pico de carga desenvolveram-se fendas transversais na zona central do provete, provocadas por um esforço de tração localizado. As fendas são como que “cozidas” pelas fibras, que impedem que a fenda se expanda, evitando assim a desagregação completa do material.

4.2.2 Provetes cúbicos

4.2.2.1 Descrição do ensaio

O comportamento em compressão das argamassas foi também avaliado em provetes cúbicos, através de ensaios de compressão realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, aplicando de um procedimento linear de carga sobre o provete em controlo de deslocamento do transdutor interno e a uma velocidade de 2 $\mu\text{m/s}$, conforme representado na Figura 4.19.

Com base nos valores registados pelo transdutor interno, determinou-se a relação tensão-extensão de compressão ($\sigma_c - \varepsilon_c$) para cada provete, do mesmo modo que foi realizado para os provetes cilíndricos.



Figura 4.19 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cúbicos

4.2.2.2 Análise de resultados

Na Figuras 4.17 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de cada argamassa, FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, aos 8 e 28 dias de idade.

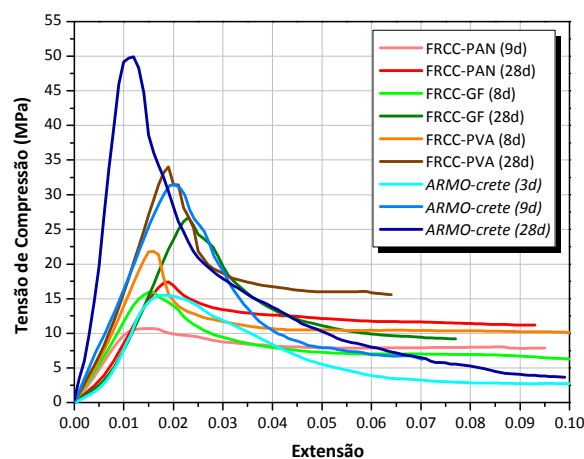


Figura 4.20 – Relação média da tensão-extensão em compressão de quatro respostas obtidas do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, aos 8 e 28 dias de idade

No Quadro 4.3 são apresentados os valores médios obtidos da resistência à compressão do FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w* às diferentes idades, bem como os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão

	FRCC - PAN		FRCC - GF		FRCC - PVA		ARMO-crete w		
Idade (dias)	9	28	8	28	8	28	3	9	28
σ_{cm} (GPa)	11.46	17.96	16.36	27.81	22.74	36.98	16.87	33.46	54.38
Desvio Padrão	0.75	0.95	1.01	1.13	1.05	0.93	1.44	4.82	2.68
CoV (%)	6.58	5.28	6.18	4.07	4.61	2.52	8.56	14.41	4.92

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a resistência à compressão aos 28 dias nos provetes cilíndricos é da ordem dos 79% da resistência nos provetes cúbicos, no caso do FRCC-PAN, dos 89% no caso do FRCC-GF, dos 99% no caso do FRCC-PVA e dos 67% no caso do ARMO-crete w. A diferença entre a resistência à compressão nos provetes cilíndricos e nos provetes cúbicos é originada pelo atrito entre as faces dos provetes e os pratos das prensas que impedem a deformação transversal da argamassa conduzindo a maiores valores de resistência no caso dos cubos [17].

As Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam os modos de rotura dos provetes cúbicos depois da realização dos ensaios de compressão.



Figura 4. 21 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN



Figura 4.22 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF



Figura 4.23 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA



Figura 4. 24 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de ARMO-crete w

4.3 COMPORTAMENTO EM FLEXÃO

4.3.1 Argamassas FRCC-PAN e ARMO-crete *w*

4.3.1.1 Descrição do ensaio

O comportamento em flexão das argamassas FRCC-PAN e ARMO-crete *w* foi avaliado de acordo com o recomendado na norma EN 1015-11 [4]. O procedimento de ensaio consistiu em posicionar os provetes de dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, centrados sobre dois apoios cilíndricos distanciados de 100 mm e submetê-los a força gradualmente crescente exercida a meio vão até à rotura por flexão (Figura 4.25). Os ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, em controlo de deslocamento à velocidade de 0.2 mm/min, com recurso a uma célula de carga de 10 kN de capacidade.



Figura 4.25 – Ensaio de resistência à flexão dos provetes prismáticos

Os ensaios de flexão foram realizados em 6 provetes prismáticos de cada tipo de argamassa, FRCC-PAN e ARMO-crete *w*, às idades de 8 e 28 dias.

A resistência à flexão f é determinada pela equação (4.2),

$$f = 1.5 \frac{FL}{bd^2} \quad (4.2)$$

em que,

F - Força máxima aplicada no provete;

L - Distância entre apoios;

b - Largura do provete;

d - Altura do provete.

4.3.1.2 Análise de resultados

Nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de *ARMO-crete w* e de FRCC-PAN aos 8 e 28 dias de idade.

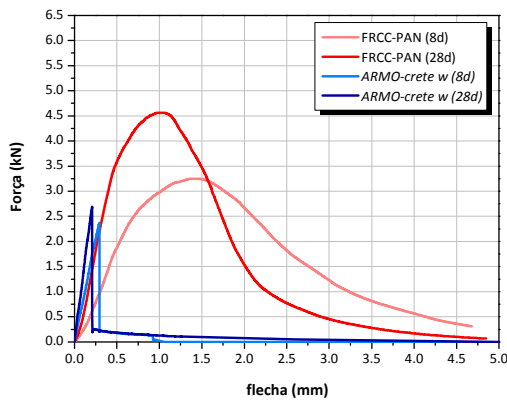


Figura 4.26 - Relação força-flecha do FRCC-PAN e do *ARMO-crete w*

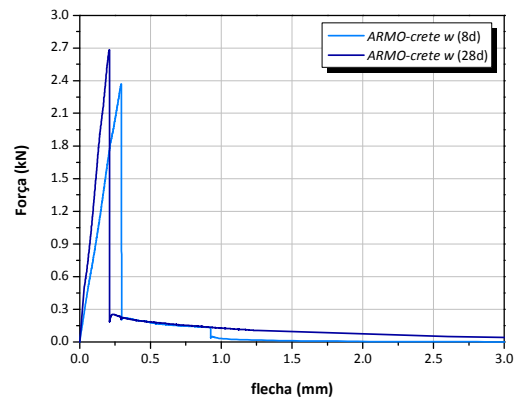


Figura 4.27 - Relação força-flecha do *ARMO-crete w* (8 e 28 dias)

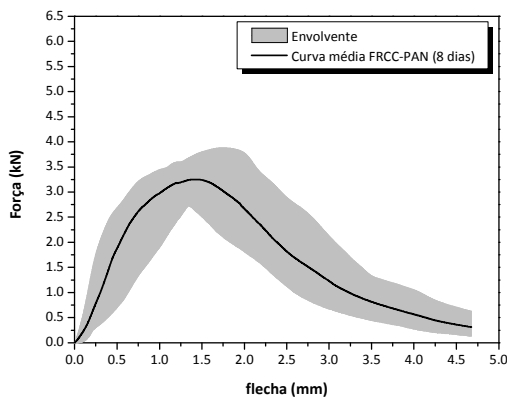


Figura 4.28 - Relação força-flecha do FRCC-PAN (8 dias)

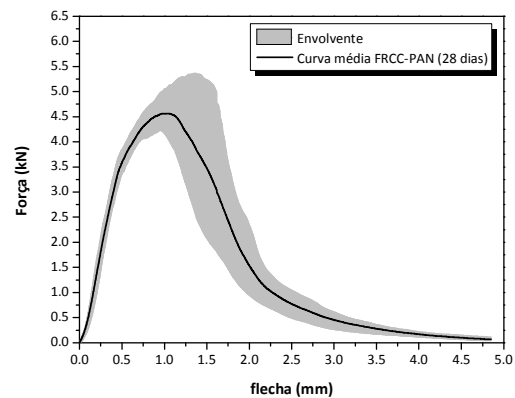


Figura 4.29 - Relação força-flecha do FRCC-PAN (28 dias)

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos da resistência à flexão determinada de acordo com a norma europeia EN 1015-11 [4].

Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à flexão

	FRCC-PAN		<i>ARMO-crete w</i>	
Idade (dias)	8	28	8	28
f_m (MPa)	8.23	11.27	5.56	6.25
Desvio Padrão	0.72	1.03	0.33	0.30
Coefficiente de variação (%)	8.80	9.15	5.86	4.81

Da análise dos gráficos presentes, nas Figuras 4.26 e 4.27 é possível verificar que após ser atingido o ponto de carga máxima suportado pelas vigas de *ARMO-crete w*, estas apresentaram uma diminuição abrupta da capacidade de carga, devido ao seu comportamento frágil. No caso das vigas de FRCC-PAN (Figuras 4.28 e 4.29) é claro o aumento de ductilidade proporcionado pelas fibras. Nestes provetes desenvolveu-se, em geral, diversas microfendas até atingir a rotura (Figura 4.30).



Figura 4.30 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PAN

4.3.2 Argamassas FRCC-GF e FRCC-PVA

4.3.2.1 Descrição do ensaio

No caso das argamassas FRCC-GF e FRCC-PVA o procedimento de ensaio utilizado para avaliar o comportamento em flexão foi semelhante ao adotado para as outras argamassas, com a diferença de se ter realizado um entalhe a meio-vão dos provetes, com uma espessura muito reduzida de 0.4 mm e profundidade de 8 mm (de modo a se obter uma única fissura quando submetido a carga crescente).

Os ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, em controlo de deslocamento através de um transdutor (LVDT) posicionado a meio vão, com uma velocidade de deformação de 0.2 mm/min. A carga aplicada foi medida com recurso a uma célula de carga de 10 kN de capacidade, e o deslocamento vertical a meio vão foi medido por intermédio de um LVDT (com ± 5 mm de campo), fixo a uma barra metálica horizontal apoiada em dois pontos fixos do provete. Em torno de um desses pontos de apoio a barra pode rodar, e num dos apoios pode ainda deslizar horizontalmente, garantindo-se as condições para não serem registados deslocamentos parasitas nos referidos transdutores (Figura 4.31a). Foi também medida a abertura de fissura na boca do entalhe (*CMOD – crack mouth opening displacement*) através de um outro transdutor posicionado perpendicularmente à boca do entalhe (Figura 4.31b). O sistema de ensaio apresenta-se representado nas Figuras 4.31a e 4.31b, onde está patente o esquema de aplicação de carga e a disposição dos transdutores.



Figura 4.31 – Aplicação da carga e posicionamento dos transdutores

De acordo com as recomendações do CEB-FIP MODEL CODE [18] foram determinados os parâmetros da resistência residual à tração por flexão $f_{R,i}$ através da equação (4.3), com base nos valores de $CMOD_j$ ($i=1$ a 4), indicados na Figura 4.32, e nos correspondentes valores de força F_i ($i=1$ a 4).

$$f_{R,i} = \frac{3F_i L}{2bh_{sp}^2} \quad (4.3)$$

em que,

L - Comprimento do vão do provete;

b - Largura do provete;

h_{sp} - Altura útil do provete (distância da extremidade superior do entalhe à superfície).

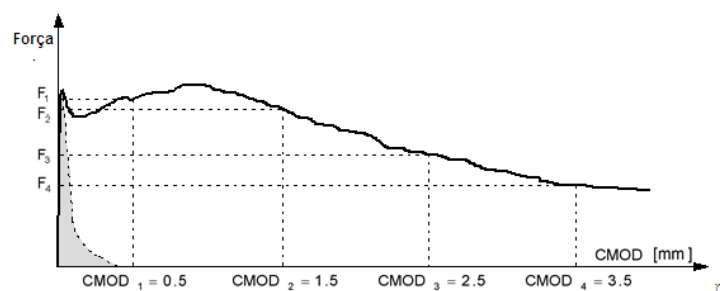


Figura 4.32 - Diagrama força vs. CMOD (CEB-FIP MODEL CODE)

A energia absorvida a uma deformação de 4 mm, G_f , foi determinada segundo a expressão proposta pela RILEM TC 50-FMC [19].

$$G_f = \frac{W_0 + [m_1 \times (1 - \alpha^2) + 2 \times m_2] \times g \times \delta_u}{SF} \quad (4.4)$$

em que,

W_0 - Trabalho produzido pela força F exercida pela atuador durante a deformação do provete (área sob a curva F - flecha até 4 mm);

m_1 - Massa do provete entre apoios;

m_2 - Massa do equipamento que acompanha a deformação do provete durante o ensaio e que não está acoplada ao atuador;

$\alpha = L/l - 1$ - Parâmetro que corrige o trabalho produzido pelo peso próprio do provete, considerando que L (comprimento do provete) é diferente de l ;

g - Aceleração da gravidade;

δ_u - Flecha considerada para determinar a energia absorvida, 4 mm;

$SF = b \times h_{sp}$ - Área da superfície de fratura projetada para o plano acima do entalhe.

4.3.2.2 Análise de resultados

Nas Figuras 4.33 e 4.34 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de FRCC-GF aos 8 e 28 dias de idade.

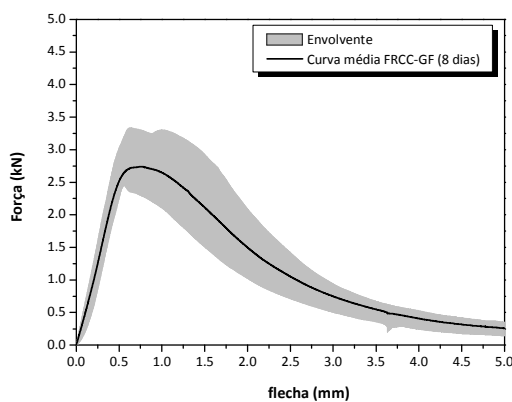


Figura 4.33 - Relação força-flecha do FRCC-GF (8 dias)

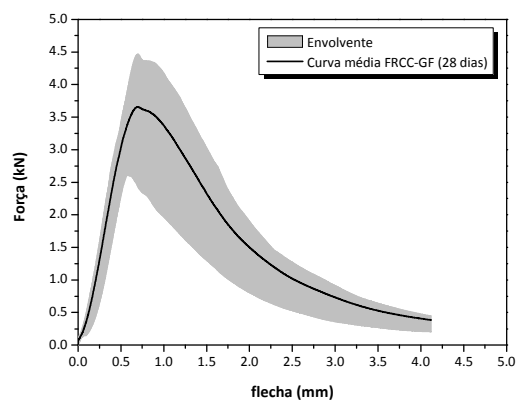


Figura 4.34 - Relação força-flecha do FRCC-GF (28 dias)

No Quadro 4.5 apresentam-se os resultados obtidos das resistências residuais na argamassa FRCC-GF, determinadas de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE.

Quadro 4.5 – Resistências residuais médias do FRCC-GF, de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC-GF (8d)	9.00	6.03	3.72	2.44	5.26	9.56
Desvio Padrão	1.42	1.14	0.71	0.45	0.91	1.21
Coefficiente de variação (%)	15.82	18.90	19.10	18.27	17.38	12.67
FRCC-GF (28d)	11.37	6.43	3.64	2.21	5.26	12.55
Desvio Padrão	2.47	1.65	0.92	0.58	1.20	2.26
Coefficiente de variação (%)	21.73	25.63	25.37	26.04	22.85	18.04

Nas Figuras 4.35 e 4.36 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de FRCC-PVA aos 8 e 28 dias de idade.

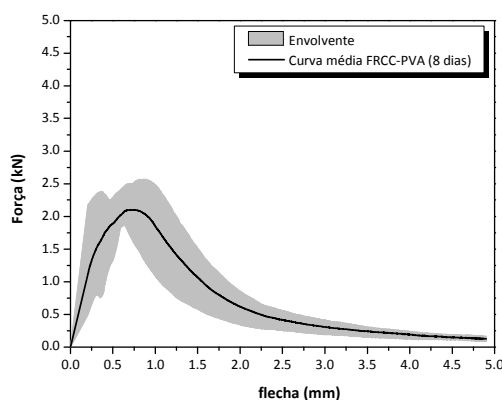


Figura 4.35 - Relação força-flecha do FRCC-PVA (8 dias)

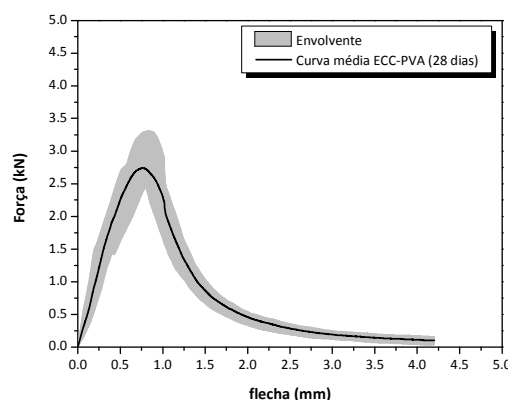


Figura 4.36 - Relação força-flecha do FRCC-GF (28 dias)

No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados obtidos das resistências residuais na argamassa FRCC-PVA, determinadas de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE.

Quadro 4.6 – Resistências residuais médias do FRCC-PVA, de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC-PVA (8d)	8.00	3.74	1.73	1.06	2.39	7.93
Desvio Padrão	1.01	0.96	0.46	0.27	0.37	0.97
Coefficiente de variação (%)	12.65	25.66	26.35	25.16	15.31	12.18
FRCC-PVA (28d)	11.07	4.10	1.84	0.96	2.95	8.97
Desvio Padrão	1.41	0.23	0.28	0.21	0.08	1.26
Coefficiente de variação (%)	12.77	5.65	15.22	22.19	2.77	14.07

Na Figura 4.37 apresentam-se as curvas força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de FRCC-GF e FRCC-PVA, aos 8 e 28 dias de idade.

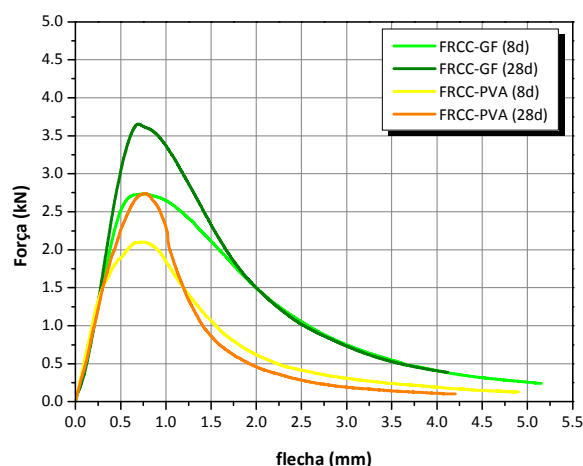


Figura 4.37 - Relação força-flecha do FRCC-GF e do FRCC-PVA (8 e 28 dias)

Pelos resultados obtidos é identificável a ductilidade conferida pela adição das fibras, no entanto, os valores de resistências residuais permaneceram praticamente invariáveis dos 8 para os 28 dias de idade.

Nas vigas de FRCC-GF e FRCC-PVA (Figuras 4.38 e 4.39) desenvolveu-se uma única microfenda até atingir a rotura, devido à execução do entalhe.



(a)



(b)

Figura 4.38 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-GF



(a)



(b)

Figura 4.39 – Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PVA

5 ENSAIOS DE DURABILIDADE

5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Capilaridade define-se como sendo o transporte de líquidos nos poros sólidos devido à tensão superficial existente nos vasos capilares [20].

Os poros na argamassa não saturada quando entram em contacto com um líquido, este é absorvido pelas forças capilares presentes em cada poro (sucção capilar), sendo esta força tanto maior quanto menor o diâmetro dos poros [21].

A capilaridade nas argamassas é influenciada pela viscosidade, densidade e tensão superficial do líquido e também pelas características da argamassa, nomeadamente pelos ligantes que as constituem que definem a estrutura dos poros, da natureza e distribuição das cargas aplicadas, do modo de aplicação e da espessura aplicada.

Uma vez que não é possível analisar os poros capilares individualmente, a capilaridade é analisada como um todo através de ensaios que medem a velocidade de absorção de água pela argamassa não saturada e imersa numa altura de água, em geral, de 5 ± 1 mm.

A absorção capilar pode ser determinada a partir da proporcionalidade verificada entre o volume de água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo (t), nas primeiras horas de ensaio, de acordo com a seguinte equação:

$$A_c = a_0 + S \cdot \sqrt{t} \quad (5.1)$$

em que,

A_c - Quantidade de água absorvida por unidade de área em contacto com a água, desde o início do ensaio (mg/mm^2);

a_0 - Água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (mg/mm^2);

S - Coeficiente de absorção capilar ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$).

Conforme verificado na Figura 5.1, a cinética de absorção capilar não é linear. Na Fase 1, verifica-se uma maior inclinação, devido ao preenchimento com água dos capilares de maior diâmetro, o que permite o cálculo do coeficiente de absorção capilar, S . A Fase 2 reflete o preenchimento dos capilares mais finos, pelo que processa-se mais lentamente. A Fase 3 caracteriza-se por uma estabilização da quantidade de água absorvida. Deste modo, justifica-se que a caracterização da

durabilidade das argamassas recorrendo ao coeficiente de absorção capilar, seja determinada nas primeiras horas de ensaio [22, 23].

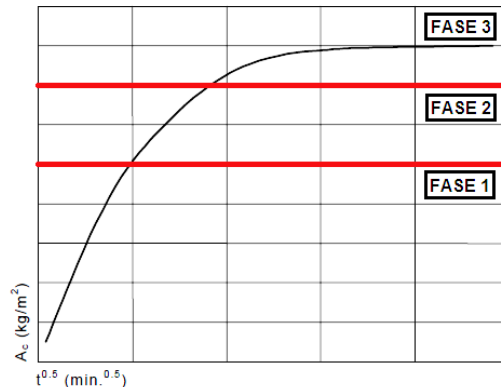


Figura 5.1- Comportamento capilar em função do tempo [24]

5.1.1 Descrição do ensaio

O presente ensaio foi realizado de forma a satisfazer o disposto na norma europeia EN 1015-18 [25], na parte aplicável.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados nos “meio-provetes” resultantes das argamassas em estudo, após os ensaios de flexão, aos 28 dias de idade.

O procedimento de ensaio consistiu em colocar os provetes numa estufa ventilada a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante, M_0 . Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi inferior a 0.2% da média das duas leituras (M_0). Após as operações de secagem e posterior arrefecimento até atingir a temperatura ambiente, as quatro faces de cada provete, adjacentes à face inferior através da qual ocorrerá a absorção de água, foram sujeitas a uma pintura de impermeabilização com tinta epoxídica ao longo de 30 mm da sua altura. Colocaram-se os provetes num recipiente e introduziu-se água até que o nível da mesma atingisse 5 ± 1 mm de altura, acima da face inferior do provete e tapou-se o recipiente (Figura 5.2). A quantificação da água absorvida foi feita através da realização de sucessivas pesagens dos provetes. Essas pesagens foram realizadas nas primeiras 4 horas, desde a colocação da água, com intervalos de 30 minutos e após este período inicial, efectuaram-se mais 1 a 2 pesagens por dia, até 55 dias de ensaio. Para efectuar as pesagens, retiraram-se os provetes do recipiente, deixou-se escorrer a água superficial com o auxílio de um pano húmido e realizou-se a pesagem de cada provete, M_i .

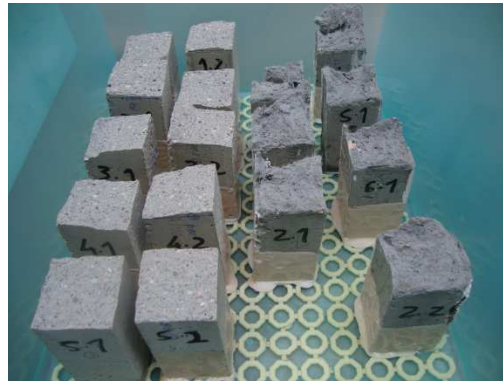


Figura 5.2 – Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por capilaridade

5.1.2 Análise de resultados

Os resultados obtidos nos ensaios realizados permitiram determinar, para cada instante de tempo, a respetiva absorção capilar A_c , expressa em kg/m^2 , calculada através da divisão do aumento da massa registado ($M_i - M_0$) pela área da superfície inferior do provete que esteve em contacto com a água. Este procedimento permitiu elaborar diagramas representativos da cinética de absorção capilar, expressando a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo (Figura 5.3).

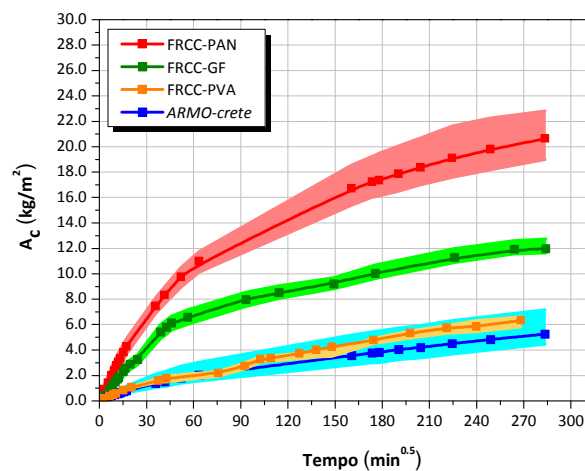


Figura 5.3 – Absorção capilar dos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e ARMO-crete w

A velocidade de absorção de água nos instantes iniciais é traduzida pelo coeficiente de absorção de água por capilaridade (C), expresso em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, correspondendo ao declive da recta que une os pontos representativos das medições das massas dos semi-prismas realizadas aos 10 (M_1) e 90 minutos (M_2). De acordo com a norma EN 1015-18 [25], o valor deste coeficiente é obtido pela seguinte equação:

$$C = 0.1(M_2 - M_1) \quad (5.2)$$

O coeficiente de absorção de água médio é obtido pela média dos valores individuais do coeficiente de absorção dos 6 semi-prismas. No Quadro 5.1 apresentam-se os coeficientes de absorção de água por capilaridade, para as argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*.

Quadro 5.1 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo

	FRCC-PAN	FRCC-GF	FRCC-PVA	<i>ARMO-crete w</i>
C (kg/(m².min^{0.5}))	1.44	1.09	0.30	0.26
Desvio Padrão	0.21	0.18	0.05	0.07
Coeficiente de variação (%)	14.64	16.46	17.19	27.03

Verifica-se que os coeficientes de absorção capilar obtidos nas argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF e *ARMO-crete w* reflectem a porosidade evidenciada pela determinação do teor de ar, isto é, quando maior o teor de ar na argamassa fresca, maior é a porosidade capilar da superfície das argamassas, facilitando a penetração de agentes deteriorantes das propriedades mecânicas e de durabilidade.

5.2 PERMEABILIDADE AO AR E À ÁGUA

A permeabilidade é o fluxo de gases ou líquidos através da argamassa e caracteriza-se pelo coeficiente de permeabilidade.

O transporte de gases, de água e de agentes agressivos dissolvidos na argamassa são aspetos importantes na avaliação da durabilidade das argamassas. A velocidade e o efeito do transporte são largamente influenciados pela estrutura porosa (quantidade, tamanho e distribuição dos poros), eventual fissuração existente e pelo meio ambiente ao qual a superfície da argamassa está exposta.

O fluxo de um fluido não compressível através de um provete, tal como a água, pode ser determinado de acordo com a lei de D'Arcy. No entanto, quando o fluido é compressível, como no caso dos gases, a lei de D'Arcy deve ser modificada para calcular o volume de gases a determinada pressão média no interior do provete de argamassa.

Para gases, o coeficiente de permeabilidade, K_G , é determinado de acordo com a equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.5.3)**, que considera a compressibilidade e a viscosidade do fluido.

$$K_G = \frac{2\nu \cdot \eta \cdot L \cdot P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (5.3)$$

em que,

K_G - Coeficiente de permeabilidade da argamassa aos gases (m^2);

ν - Fluxo do gás (m^3/s);

η - Viscosidade dinâmica do gás (Ns/m^2);

L - Espessura da secção transversal de argamassa atravessada pelo gás (m);

A - Secção transversal da argamassa atravessada pelo gás (m^2);

P_1 - Pressão absoluta de entrada do gás (N/m^2);

P_2 - Pressão absoluta de saída do gás – pressão atmosférica (N/m^2).

Sabendo que a viscosidade do oxigénio a 20°C é de $2.02 \times 10^{-16} \text{Ns}/\text{m}^2$, a permeabilidade intrínseca do oxigénio pode ser calculada de acordo com a equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.5.4).**

$$K_G = \frac{4.04\nu \cdot L \cdot 10^{-16}}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (5.4)$$

No caso da água, o coeficiente de permeabilidade depende do modo como é medido, visto que o caudal de água que atravessa o provete não é constante. No caso de a ação química da água dissolver o hidróxido de cálcio provoca um aumento da permeabilidade, e no caso de a água ser incrustante e não o dissolver faz diminuir o referido coeficiente.

A pressão também influencia o coeficiente de permeabilidade visto que há determinados poros com certas dimensões que só abrem para determinadas pressões. A hidratação do cimento e a expansão da sua pasta dentro da água tem por efeito diminuir a permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade à água pode ser calculado através da equação de Valenta [26], por intermédio da medição da profundidade de penetração da água quando for atingido o fluxo estacionário através do provete. De acordo com a equação de Valenta, o coeficiente de permeabilidade à água, K_w , é determinado pela equação (5.5).

$$K_w = \frac{d_p^2 \cdot \delta}{2 \cdot t \cdot h} \quad (5.5)$$

em que,

K_w - Coeficiente de permeabilidade da argamassa à água (m/s);

d_p - Profundidade de penetração da água (m);

δ - Porosidade aberta do provete de argamassa;

t - Tempo de penetração (s);

h - Pressão aplicada (mH₂O), 1 bar = 10.207 mH₂O;

A medição da profundidade de penetração de água no provete de argamassa é melhorada pela utilização de indicadores de cores que determinam a fronteira da penetração da água. A solução utilizada produz uma cor azul em contacto com a argamassa. O fator de conversão para este coeficiente, de m/s para m², é: $K_w (m^2) = 1.3 \times 10^{-7} K_w (m/s)$.

5.2.1 Descrição do ensaio

A permeabilidade ao ar e à água das argamassas em estudo, foi medida numa célula de permeabilidade de Leeds (Figura 5.4). Este permeâmetro permite submeter provetes a uma determinada pressão durante um determinado período, garantindo que o fluxo do fluido que atravessa o provete é estável e uniaxial.

O permeâmetro é constituído por uma célula para o provete, um manómetro de pressão com precisão, o fornecimento de gás estável e um medidor de fluxo na extremidade a jusante.

Para utilizar o permeâmetro de Leeds é necessário que os provetes sejam cilíndricos, com diâmetro próximo de 50 mm e 40 mm de altura. Deste modo, foram realizadas lajetas das argamassas em estudo, com dimensões de 300 × 300 × 80 mm³, nas quais foram caroteados e cortados 6 provetes cilíndricos em cada lajeta, com as dimensões indicadas para utilização no permeâmetro de Leeds (Figuras 5.4 e 5.5).

Neste equipamento, o provete de argamassa é colocado num anel de borracha no interior de uma manga de PVC. A pressão aplicada força o anel de borracha para o interior, contra o provete, tornando estanques as faces laterais deste. Neste caso, de modo a reforçar esta estanquidade foi aplicada pintura de impermeabilização com tinta epoxídica nas faces laterais dos provetes e deixada a curar à temperatura ambiente, durante 12 horas antes do início do ensaio. Esta fina camada permite obter uma interface de selagem perfeita com o anel de borracha.



Figura 5.4 - Permeâmetro de Leeds



Figura 5.5 - Provetes utilizados

Relativamente ao procedimento de ensaio adotado, antes de impermeabilizar as faces laterais dos provetes, determinou-se a porosidade aberta das amostras em vácuo, por absorção de água por imersão, de acordo com a norma EN 1936 [27], na parte aplicável. Os provetes foram colocados na câmara em vácuo durante pelo menos 3 horas, na qual foi introduzida água sob vácuo após este período, de tal modo que os provetes ficassem completamente imersos (Figura 5.6).



Figura 5.6 – Ensaio para a determinação da porosidade aberta

Após 3 horas de imersão em vácuo, procedeu-se à medição da massa dos provetes saturados M_2 e da massa hidrostática M_3 . Posteriormente, realizou-se a secagem dos mesmos em estufa a 110°C durante uma semana e procedeu-se à medição da massa seca M_1 . Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi

inferior a 0.2% da média das duas leituras. A porosidade aberta foi determinada de acordo com a equação (5.6).

$$\delta(\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_2 - M_3)} \times 100 \quad (5.6)$$

em que,

M_1 - Massa constante do provete seco na estufa;

M_2 - Massa hidrostática do provete saturado;

M_3 - Massa constante do provete saturado.

Procedeu-se de seguida à impermeabilização lateral dos provetes, conforme referido anteriormente, para garantir uma penetração uniaxial apenas através dos topos dos provetes. Após 12 horas de cura da tinta, os provetes foram colocados na célula de permeabilidade. Dentro da célula, o provete foi colocado sob pressão no interior de um anel de borracha que veda lateralmente a amostra, depois de se pressionar o topo da célula.

O ar foi aplicado a uma pressão de 3 bar, sendo o fluxo de gás medido na extremidade a jusante, recorrendo a uma pipeta com diâmetro adequado. Após atingido fluxo estável e laminar no provete (cerca de 30 minutos) foram efetuadas 3 leituras do fluxo constante, através da medição do tempo de percurso de uma bolha de sabão para uma distância conhecida, 10 cm (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Medição do fluxo que atravessa o provete

Medido o fluxo do ar no provete, v e aplicando a equação de D'Arcy modificada (Equação 5.3), determinou-se o coeficiente de permeabilidade ao ar, K_G . Nesta equação, consideraram-se os valores medidos previamente da espessura da secção transversal do provete, L , P_1 igual a 3 bar e P_2 igual à pressão atmosférica, 1 bar.

Após o ensaio de permeabilidade ao ar, os provetes foram conservados no interior da célula de permeabilidade para serem submetidos ao ensaio de permeabilidade à água. Para este ensaio, foi introduzida uma solução de álcool e água na câmara em contacto com a parte superior do provete, e a pressão foi aplicada de modo a forçar a solução a penetrar através da amostra. A pressão foi mantida constante durante 3 horas e, posteriormente, o provete é retirado da célula e partido em dois por compressão diametral, sendo medida a profundidade de penetração da solução em 5 leituras (Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11).



Figura 5.8 - Penetração da solução em provete de FRCC-PAN



Figura 5.9 - Penetração da solução em provete de FRCC-GF



Figura 5.10 - Penetração da solução em provete de FRCC-PVA

Figura 5.11 - Penetração da solução em provete de
ARMO-crete w

Medida a profundidade de penetração da solução nos provetes e aplicando a equação de Valenta **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**5.5), determinou-se o coeficiente de permeabilidade à água, K_w .

5.2.2 Análise de Resultados

No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados da porosidade aberta, δ , obtida nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*.

Quadro 5.2 – Resultados da porosidade aberta

	Provete	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	δ (%)	δ_{in} (%)	S_d (%)	CoV (%)
FRCC-PAN	P1	84.41	43.60	103.20	31.53	31.86	1.26	3.96%
	P2	82.14	43.20	101.20	32.86			
	P3	81.96	42.70	102.20	34.03			
	P4	85.86	44.60	105.80	32.58			
	P5	86.51	44.70	106.00	31.80			
	P6	88.48	45.50	108.10	31.35			
FRCC-GF	P1	99.70	52.30	117.90	27.74	28.36	0.40	1.41%
	P2	98.10	51.50	116.30	28.09			
	P3	95.90	51.00	113.80	28.50			
	P4	97.40	52.40	115.50	28.68			
	P5	95.00	50.80	112.90	28.82			
	P6	97.80	52.00	115.90	28.33			
FRCC-PVA	P1	106.70	47.10	113.70	10.51	10.22	0.26	2.56%
	P2	95.40	42.50	101.50	10.34			
	P3	105.40	46.90	112.00	10.14			
	P4	103.00	45.30	109.60	10.26			
	P5	108.50	48.30	115.00	9.75			
	P6	102.00	45.50	108.50	10.32			
ARMO-crete w	P1	125.39	69.20	130.20	7.89	8.42	0.35	4.14%
	P2	125.78	68.70	130.80	8.09			
	P3	120.88	66.10	126.00	8.56			
	P4	124.52	67.80	129.80	8.52			
	P5	121.04	66.30	126.30	8.77			
	P6	126.74	69.30	132.20	8.68			

Nos Quadros 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 e na Figura 5.12 apresentam-se as características dos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w* utilizados nos ensaios e os principais resultados dos parâmetros para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar, K_G , nomeadamente, o tempo médio de percurso de uma bolha de sabão para uma distância de 10 cm (T_{10}) e o fluxo de ar (V).

Quadro 5.3 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-PAN

FRCC-PAN								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	$V e^{-08}$ (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} e^{-16}$ (m ²)	$S_d e^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	44.53	40.40	44.13	17.796	2.331	1.582	0.407	25.71
P2	44.05	38.51	62.47	12.572	1.604			
P3	44.02	39.47	80.52	9.754	1.277			
P4	43.95	40.95	63.68	12.334	1.681			
P5	44.10	39.47	82.82	9.483	1.264			
P6	44.08	40.95	80.06	9.810	1.334			

Quadro 5.4 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-GF

FRCC-GF								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	νe^{-08} (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} e^{-16}$ (m ²)	$S_d e^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	44.34	41.83	57.84	13.579	1.858	1.638	0.289	17.67
P2	44.21	41.95	51.56	15.233	2.102			
P3	44.20	40.60	78.92	9.952	1.330			
P4	44.24	41.07	74.47	10.546	1.423			
P5	44.24	40.11	67.17	11.693	1.541			
P6	44.16	41.34	68.09	11.534	1.572			

Quadro 5.5 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC-PVA

FRCC-PVA								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	νe^{-08} (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} e^{-16}$ (m ²)	$S_d e^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	44.17	43.32	12.75	3.849	0.550	0.483	0.146	30.22
P2	44.07	38.15	11.40	4.305	0.544			
P3	44.21	42.67	19.46	2.522	0.354			
P4	44.04	42.09	11.85	4.141	0.578			
P5	44.18	43.32	27.93	1.758	0.251			
P6	44.00	40.89	10.75	4.565	0.620			

Quadro 5.6 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no ARMO-crete w

ARMO-crete w								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	νe^{-08} (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} e^{-16}$ (m ²)	$S_d e^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	44.24	41.04	25.66	1.913	0.258	0.331	0.080	24.28
P2	44.11	41.06	23.02	2.132	0.289			
P3	44.10	39.69	15.44	3.180	0.417			
P4	44.09	40.78	18.15	2.704	0.365			
P5	44.08	39.63	15.32	3.205	0.420			
P6	44.33	42.02	28.38	1.729	0.238			

O valor de T_{10} devido ao facto de ser bastante reduzido no caso do FRCC-PVA e do ARMO-crete w, foi avaliado numa pipeta de 2.5 mm de diâmetro. No caso do FRCC-PAN e do FRCC-GF utilizou-se uma pipeta de diâmetro de 10 mm para medir o valor de T_{10} .

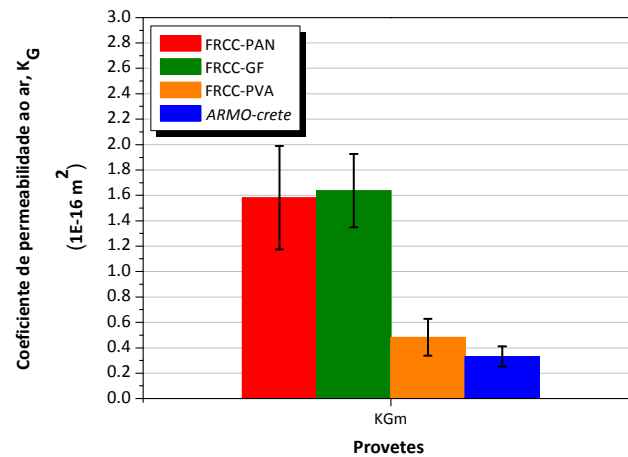


Figura 5.12 – Coeficiente de permeabilidade ao ar nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e ARMO-crete *w*

Na medição da permeabilidade à água dos provetes das argamassas em estudo, os valores adotados para a pressão foi de 3 bar a pressão constante durante 3 horas.

Nos Quadros 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 e na Figura 5.13 apresentam-se os resultados obtidos da profundidade média de penetração de água em cada provete de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e ARMO-crete *w*, d_{pm} , e o coeficiente de permeabilidade à água, K_w .

Quadro 5.7 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-PAN

FRCC-PAN								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_G e^{-18}$ (m ²)	$K_{Wm} e^{-18}$ (m ²)	$S_d e^{-18}$ (m ²)	CoV (%)
P1	14.82	14.35	1.09	7.57	13.61	13.13	1.75	13.31
P2	13.24				11.32			
P3	13.67				12.50			
P4	13.44				11.56			
P5	16.02				16.05			
P6	14.94				13.74			

Quadro 5.8 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-GF

FRCC-GF								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_G e^{-18}$ (m ²)	$K_{Wm} e^{-18}$ (m ²)	$S_d e^{-18}$ (m ²)	CoV (%)
P1	11.15	12.38	2.31	18.66	6.78	8.81	3.41	38.71
P2	14.28				11.26			
P3	9.81				5.40			
P4	12.23				8.43			
P5	15.94				14.40			
P6	10.87				6.58			

Quadro 5.9 - Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC-PVA

FRCC-PVA								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_G e^{-18}$ (m ²)	$K_{Wm} e^{-18}$ (m ²)	$S_d e^{-18}$ (m ²)	CoV (%)
P1	6.18	6.28	1.35	21.57	0.79	0.70	0.09	12.29
P2	5.50				0.62			
P3	5.95				0.70			
P4	7.58				1.16			
P5	4.39				0.37			
P6	8.07				1.32			

Quadro 5.10 - Coeficiente de permeabilidade à água no ARMO-crete w

ARMO-crete w								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_w e^{-18}$ (m ²)	$K_{Wm} e^{-18}$ (m ²)	$S_d e^{-18}$ (m ²)	CoV (%)
P1	4.32	6.28	1.34	21.33	0.29	0.68	0.30	43.34
P2	6.27				0.63			
P3	8.32				1.17			
P4	5.59				0.52			
P5	6.23				0.67			
P6	6.97				0.83			

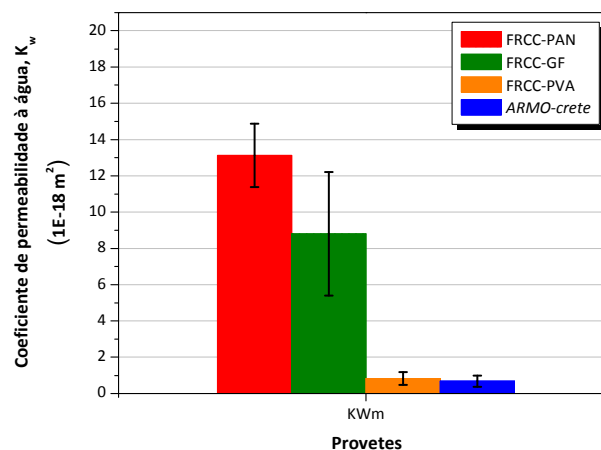


Figura 5.13 – Coeficiente de permeabilidade à água nos provetes de FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete*

Analisando os resultados obtidos da porosidade aberta e da permeabilidade ao ar e à água, verificou-se um aumento muito significativo destes valores nas argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF comparativamente com as argamassas FRCC-PVA e *ARMO-crete*.

5.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL (RETRAÇÃO POR SECAGEM)

A retração consiste na diminuição de volume originada por perda de água. Quando acontecem com excessiva rapidez, estas variações volumétricas quase sempre ocasionam fissuras.

A retração de uma argamassa cimentícia pode dividir-se, essencialmente, em dois grandes grupos: a plástica e a hidráulica (ou por secagem).

A retração plástica inicia-se logo após a aplicação da argamassa sobre o suporte, pela movimentação de pasta de cimento e água de amassadura da argamassa para os poros da base e, também, pela perda da sua humidade para o ambiente, em função das condições climáticas locais [28]. Por outro lado, a retração hidráulica inicia-se só após as primeiras horas de presa da argamassa e ocorre devido à redução dimensional causada pela evaporação da água dos poros da mistura cimentícia. O grau de tensão desenvolvida durante a retração por secagem da argamassa depende da combinação dos seguintes factores: magnitude da retração, grau de restrição, módulo de elasticidade e relaxação da argamassa [12, 28].

A intensidade da retração por secagem é influenciada pela interação entre a água que evapora e a estrutura da pasta de cimento [29]. As argamassas com teores de cimento elevados tendem a apresentar retração mais elevada, requerendo maiores cuidados na execução e controlo rigoroso das

condições de cura durante e após a aplicação. Também outros materiais finos e/ou com elevada absorção de água tendem a aumentar a retração da argamassa quando nela incorporados [30].

5.3.1 Descrição do ensaio

A avaliação da retração por secagem das argamassas em estudo foi realizada de acordo com a norma norte-americana ASTM C490-07 [31]. Foram moldados 3 provetes de cada argamassa, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, com dimensões de 25 x 25 x 250 mm³ utilizando um molde específico para este ensaio, que permite a moldagem dos provetes com a introdução de um perno de aço inoxidável em cada extremidade dos provetes. Os pernos permanecem parcialmente no interior do molde, de modo que estes fiquem parcialmente embebidos ao provete com o endurecimento da argamassa. A cura dos provetes foi realizada na câmara húmida com controlo de temperatura e humidade anteriormente indicadas. Após 2 dias de cura, os provetes de *ARMO-crete w* e FRCC-PVA foram desmoldados enquanto os provetes de FRCC-GF foram desmoldados 3 dias após a cura, visto que esta argamassa possuía um endurecimento mais lento. A avaliação da retração é realizada através da medição da variação linear do comprimento do provete ao longo do tempo, encaixando o provete verticalmente, através dos pernos que possui embebidos, num suporte metálico dotado de um comparador mecânico onde se realiza a leitura (Figura 5.14). As medições em cada provete foram realizadas uma vez por dia na 1ª semana de ensaio, e posteriormente uma vez por semana até perfazer 28 dias. Em cada medição no provete é realizada 2 leituras numa face, efectuando a rotação do provete após a 1ª leitura para realizar a 2ª leitura. Antes da colocação de cada provete no suporte metálico, foi colocada uma barra-padrão em aço inoxidável, sempre na mesma posição, e foi feita a leitura no comparador mecânico. O uso desta barra-padrão serve para anular possíveis desafinações do suporte e até do aparelho de medida (entrando diretamente para o cálculo da retração). Para além disso, a utilização da barra-padrão vai anular o efeito associado à variação de comprimento devido a eventuais variações térmicas nos provetes, já que os coeficientes de dilatação térmica da barra-padrão e dos provetes de argamassa são semelhantes.



Figura 5.14 – Método de medição da retração das argamassas

Complementarmente determinou-se simultaneamente a perda de massa dos provetes, efectuando a pesagem dos provetes imediatamente antes da realização das leituras.

Os provetes e o equipamento utilizados permanecem numa sala climatizada durante o período dos ensaios, com temperatura mantida em $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e a humidade relativa variando entre 32% a 48%.

5.3.2 Análise de resultados

Os valores da retração por secagem, obtidos nos provetes das argamassas em estudo, apresentam-se na Figura 5.15. Na Figura 5.16 apresentam-se os resultados da perda de massa em percentagem ao longo do tempo.

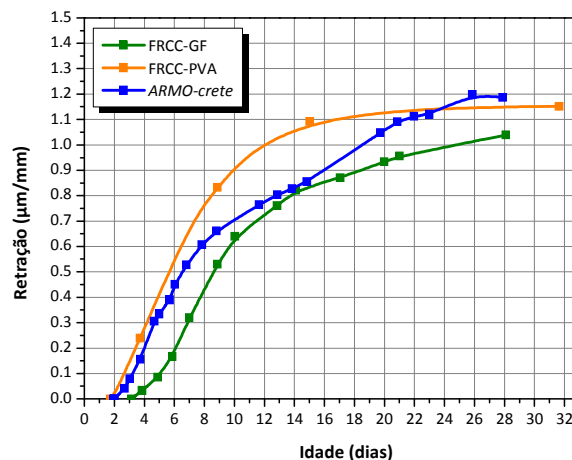


Figura 5.15 – Resultados dos ensaios de retração dos provetes de FRCC-GF, FRCC-PVA e ARMO-crete w

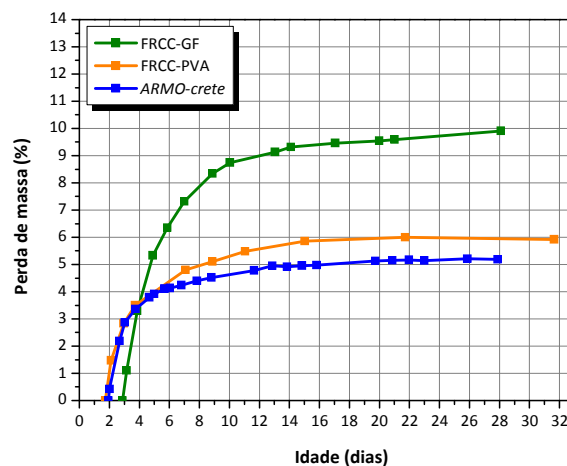


Figura 5.16 – Resultados dos ensaios de perda de massa dos provetes de FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete* w

Analisando a Figura 5.15 pode-se verificar que a maior parte da retração por secagem ocorreu nas primeiras idades, o que era expectável, já que a retração por secagem está intimamente ligada à perda de humidade para o exterior e é nas primeiras idades que se verificou uma maior perda de água, conforme constatado na Figura 5.16, relativo à perda de massa dos provetes ensaiados.

O facto de se ter verificado uma maior perda de massa nos provetes de FRCC-GF, que não se reflectiu num aumento da retração poderá ser devido à presença de água livre nos macro-poros, pois não causa variação de volume quando é retirada, enquanto a água contida nos capilares pequenos (5 – 50nm) pode ocasionar retração do sistema. A retirada da água livre não traz danos ao material, mas a remoção da água retida por tensão capilar pode gerar retração.

5.4 RESISTÊNCIA AOS SULFATOS

A caracterização da resistência ao ataque dos sulfatos nas argamassas em estudo foi realizada através da adaptação da norma portuguesa NP EN 12370 [32] aplicável a pedras naturais e da norma norte-americana ASTM C88-05 [33], aplicável a agregados.

O principal objetivo do ensaio é fazer uma apreciação quantitativa da resistência mecânica das argamassas, quando submetidas a ciclos de imersão e secagem numa solução saturada de sulfato de sódio.

5.4.1 Descrição do ensaio

Nos ensaios foram utilizados provetes cúbicos com 50 mm de aresta para avaliação do comportamento em compressão e provetes prismáticos de 40x40x160 mm³ para avaliação do comportamento à flexão. Foram utilizados 4 provetes cúbicos e 4 provetes prismáticos de cada

argamassa, com idade superior a 28 dias. Antes de serem sujeitos aos ciclos de imersão e secagem, os provetes foram colocados numa estufa ventilada à temperatura de $100\pm 5^\circ\text{C}$ durante uma semana até atingirem massa constante, M_0 . Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi inferior a 0.2% da média das duas leituras (M_0). A solução saturada de sulfato de sódio (Na_2SO_4) foi realizada 48 horas antes da imersão dos provetes. O procedimento de preparação da solução consistiu em introduzir a água no recipiente e aquecê-la a 30°C . Com a água aquecida adicionou-se o sulfato de sódio na proporção de 350 g/litro e agitou-se vigorosamente até esta ficar saturada. Manteve-se a temperatura da solução, com o auxílio de um termóstato, para evitar a cristalização do sulfato de sódio que ocorre à temperatura ambiente e mediu-se a densidade da solução. Obteve-se uma densidade média de 1.27 g/cm^3 nas soluções realizadas neste ensaio. Procedeu-se à imersão dos provetes, cobertos pela solução saturada em 1.5 cm e tapou-se o recipiente para evitar a evaporação da solução e a entrada de impurezas. A imersão dos provetes foi realizada durante 24 horas (embora a norma preveja 16 a 18 horas) de modo a acelerar a degradação das argamassas. Decorrido este tempo, os provetes foram retirados do recipiente e colocados na estufa a $100\pm 5^\circ\text{C}$ durante uma semana para garantir que atingiam massa constante. Uma vez atingida a massa constante, os provetes foram colocados de novo na solução saturada de sulfato de sódio, submetendo-os a mais um ciclo. No total foram realizados 7 ciclos de imersão/secagem (Figura 5.17). No último ciclo, antes de colocar os provetes a secar na estufa, os mesmos foram lavados com água corrente para eliminar os sais na superfície dos provetes. A análise do ataque das argamassas pelos sulfatos provocada pela reação do sulfato com os componentes do cimento, foi realizada através da realização de ensaios de compressão e flexão após os ciclos de imersão/secagem. Os resultados obtidos foram analisados por comparação com os resultados homólogos, obtidos em provetes isentos da ação dos sulfatos, isto é, sem terem sido sujeitos a ciclos de imersão/secagem (provetes REF – Referência).



(a)



(b)

Figura 5.17 – Ciclos de imersão (a) e secagem (b) de provetes de FRCC-GF e *ARMO-crete w*

5.4.2 Análise de Resultados

No Quadro 5.11 e na Figura 5.18 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de compressão de provetes cúbicos das argamassas em estudo, após 7 ciclos de imersão/secagem na solução saturada de sulfato de sódio (ciclos) e sem ciclos (REF - Referência).

Quadro 5.11 – Resultados dos ensaios de compressão

	FRCC - PAN		FRCC - GF		FRCC - PVA		ARMO-crete w	
	ciclos	REF	ciclos	REF	ciclos	REF	ciclos	REF
σ_{cm} (MPa)	49.82	34.28	50.69	37.63	59.34	42.74	74.34	62.40
Desvio Padrão	1.10	3.37	2.71	1.73	4.21	1.97	3.16	12.30
CoV (%)	2.20	9.83	5.34	4.59	7.09	4.61	4.25	19.72

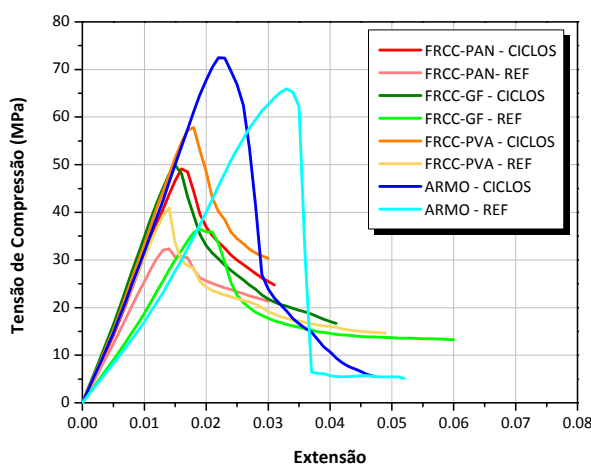


Figura 5.18 – Relação média da tensão-extensão em compressão de provetes sujeitos à ação dos sulfatos

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de compressão, verificou-se um aumento de 45% da resistência à compressão dos provetes de FRCC-PAN, de 35% dos provetes de FRCC-GF, de 39% dos provetes de FRCC-PVA e de 19% dos provetes de *ARMO-crete*, após submetê-los a ambiente agressivo de ataque por sulfatos.

As Figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam os modos de rotura dos provetes cúbicos depois da realização do ensaio de compressão. Nestas Figuras observa-se que a ação dos sulfatos provocou o aparecimento de manchas brancas na superfície dos provetes, no entanto, como se verificou, não afectaram negativamente o comportamento mecânico das argamassas.



(a) Referência



(b) Após ciclos

Figura 5.19 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PAN



(a) Referência



(b) Após ciclos

Figura 5.20 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-GF



(a) Referência



(b) Após ciclos

Figura 5.21 – Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de FRCC-PVA

Nos Quadros 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 e na Figura 5.22 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de flexão de vigas das argamassas em estudo, após 7 ciclos de imersão/secagem na solução saturada de sulfato de sódio (ciclos) e sem ciclos (REF - Referência).

Quadro 5.12 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-PAN

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC-PAN (Ciclos)	8.26	0.58	0.00	0.00	1.95	17.51
Desvio Padrão	3.55	0.32	0.00	0.00	0.47	2.16
Coefficiente de variação (%)	42.95	54.90	0.00	0.00	24.22	12.35
FRCC-PAN (REF)	11.34	2.98	1.08	0.55	3.54	13.59
Desvio Padrão	2.69	1.35	0.48	0.29	1.11	1.84
Coefficiente de variação (%)	23.71	45.22	44.16	53.28	31.24	13.50

Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-GF

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC-GF (Ciclos)	14.56	6.40	3.53	2.21	6.27	19.76
Desvio Padrão	2.27	0.66	0.34	0.11	0.84	3.21
Coefficiente de variação (%)	15.56	10.29	9.73	4.94	13.37	16.23
FRCC-GF (REF)	11.66	6.47	3.58	2.22	5.07	11.89
Desvio Padrão	2.17	0.95	0.60	0.51	0.59	0.60
Coefficiente de variação (%)	18.59	14.72	16.88	22.92	11.59	5.04

Quadro 5.14 – Resultados dos ensaios de flexão do FRCC-PVA

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC-PVA (Ciclos)	3.97	0.59	0.26	0.00	1.60	14.17
Desvio Padrão	1.73	0.27	0.06	0.00	0.39	1.87
Coefficiente de variação (%)	43.65	46.10	22.62	0.00	24.15	13.18
FRCC-PVA (REF)	7.94	2.35	1.05	0.78	2.49	8.70
Desvio Padrão	1.42	0.86	0.60	0.41	0.67	0.91
Coefficiente de variação (%)	17.95	36.62	57.24	52.09	27.04	10.51

Quadro 5.15 – Resultados dos ensaios de flexão do *ARMO-crete*

	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$f_{R,4m}$ (MPa)	G_{fm} (N/mm)	f_m (MPa)
CMOD	0.5	1.5	2.5	3.5		
<i>ARMO-crete</i> (Ciclos)	0.47	0.23	0.13	0.09	0.65	9.00
Desvio Padrão	0.24	0.08	0.03	0.04	0.26	0.95
Coefficiente de variação (%)	52.17	37.09	22.98	46.83	40.07	10.59
<i>ARMO-crete</i> (REF)	0.45	0.22	0.13	0.09	0.30	4.29
Desvio Padrão	0.13	0.09	0.05	0.06	0.08	0.53
Coefficiente de variação (%)	29.74	38.62	35.42	67.06	24.86	12.31

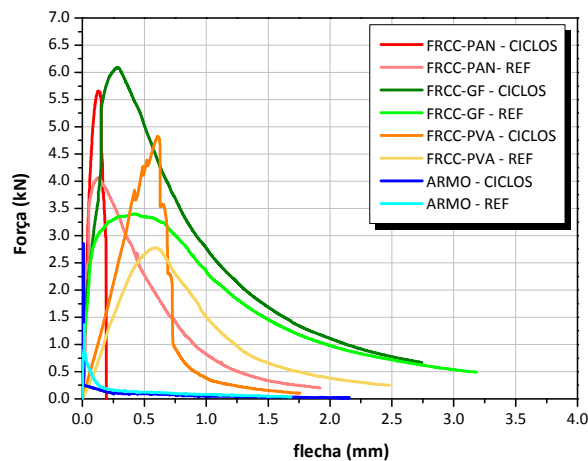


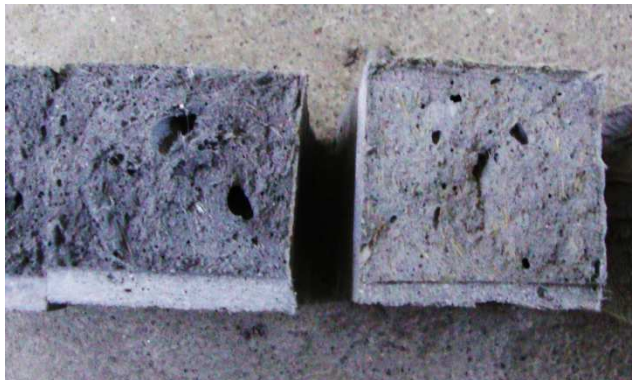
Figura 5.22 - Relação média da força-flecha de provetes sujeitos à ação dos sulfatos

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de flexão, verificou-se um aumento de 29% da resistência máxima à tração por flexão dos provetes de FRCC-PAN, de 66% dos provetes de FRCC-GF, de 63% dos provetes de FRCC-PVA e de 110% dos provetes de *ARMO-crete*, após submetê-los a ambiente agressivo de ataque por sulfatos.

Da análise dos resultados obtidos, é possível verificar que nas vigas sujeitas à ação dos sulfatos, após ser atingido o ponto de carga máxima, estas apresentaram todas uma diminuição da ductilidade, quando comparando com as vigas referência.

Foi também avaliado o efeito da ação dos sulfatos na massa dos provetes ensaiados. Verificou-se que após 7 ciclos de imersão/secagem na solução saturada de Na_2SO_4 , a massa dos provetes de FRCC-PAN aumentou 3.93%, nos provetes de FRCC-GF aumentou 4.72%, nos provetes de FRCC-PVA diminuiu 0.33% e nos provetes de *ARMO-crete* aumentou 1.08%.

As Figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26 apresentam os modos de rotura das vigas depois da realização do ensaio de flexão.



(a) Esq. – Referência; Dir. - Ciclos



(b) Ciclos

Figura 5.23 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PAN



(a) Esq. – Referência; Dir. - Ciclos



(b) Ciclos

Figura 5.24 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-GF



Figura 5.25 - Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC-PVA

Esq. – Referência; Dir. - Ciclos

Figura 5.26 - Modo de rotura em flexão dos provetes de *ARMO-crete*

Esq. – Referência; Dir. - Ciclos

O facto de se ter verificado uma diminuição da ductilidade nas vigas que foram sujeitas à ação dos sulfatos, essencialmente de FRCC-PAN e FRCC-PVA, poderá se dever à deterioração destas fibras pelos iões sulfatos, conforme é visível nas Figuras 5.23b e 5.25, diminuindo a capacidade de absorção de energia.

De acordo com Da Chen *et al.* [34] e Meziani Meriem *et al.* [35] quando o betão é sujeito ao ataque por sulfatos, os iões sulfato reagem com os produtos da hidratação do cimento (hidróxido de cálcio e aluminato de cálcio hidratado) dando origem a produtos expansivos, primeiro a etringite e posteriormente o gesso (após 90 dias de imersão em solução de sulfatos). Neste caso, o aumento observado da resistência à compressão e da resistência máxima à tração por flexão, nas argamassas em estudo, poderá se dever ao facto dos cristais de etringite e as partículas de gesso formadas (visto que o ensaio se realizou após 90 dias de idade), terem preenchido os vazios das argamassas, reforçando a matriz cimentícia como uma pequena fibra [34].

5.5 ADERÊNCIA AO SUPORTE – ENSAIOS DE PULL-OFF

5.5.1 Descrição do ensaio

O método adotado segue o disposto na norma europeia EN 1015-12 [36] e consiste em avaliar a resistência de aderência a partir da máxima tensão aplicada por tração directa perpendicular à superfície de argamassa.

Esta carga é aplicada através de umas pastilhas metálicas circulares coladas na superfície da argamassa. Foi analisada a aderência da argamassa FRCC-PAN ao suporte de tijolo cerâmico e a aderência da argamassa FRCC-GF ao suporte de tijolo direto e ao suporte de tijolo com um reboco simples aplicado. As argamassas em estudo foram aplicadas numa camada com 25 mm de espessura.

O procedimento de ensaio consiste em executar rasgos circulares com uma carotadora após efetuada a cura de 28 dias das argamassas ao devido suporte. De seguida, procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas com uma cola epoxídica, sendo necessário esperar cerca de 24 horas antes do ensaio de arrancamento para se realizar a cura da cola.

O arrancamento foi efetuado por aplicação de uma força de tração perpendicular à pastilha através de um parafuso previamente enroscado à pastilha colada no revestimento. Este parafuso encaixa no equipamento de arrancamento automático utilizado, sendo necessário apenas definir a velocidade a aplicar, de acordo com a indicação da norma, realizar a pré-carga de 0.15 kN manualmente e proceder ao arrancamento automático (Figura 5.27). O aparelho de arrancamento regista a força máxima de tração (força de aderência) e tensão correspondente, no caso de ser indicado o diâmetro. Nos ensaios de pull-off da argamassa FRCC-PAN adotou-se uma velocidade de 45 N/s prevendo-se que a força de aderência a obter seria entre 0.5 e 1.0 MPa. A duração média dos ensaios com a argamassa FRCC-PAN foi de 13.48 segundos. No caso dos ensaios de pull-off com a argamassa FRCC-GF optou-se por adotar uma velocidade de 39 N/s, obtendo-se uma duração média do ensaio de 44.78 segundos (FRCC-GF/tijolo) e de 51.88 segundos (FRCC-GF/tijolo rebocado), que está de acordo com a duração recomendada na norma, de 20 a 60 segundos.



Figura 5.27 – Realização dos ensaios de pull-off com equipamento de arrancamento

5.5.2 Análise de Resultados

Antes da análise dos resultados, é feita uma análise visual, uma vez que a rotura se pode obter das seguintes formas:

- **Fratura de adesão** – Na interface entre a argamassa e o suporte. O valor do ensaio é igual à força de aderência;
- **Fratura de coesão** – Através de fratura interna da argamassa ou do suporte. A força adesiva é maior que o valor obtido no ensaio;
- Cedência na zona colada entre a pastilha e a argamassa – Ensaio inválido.

Nas Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam-se os modos de rotura ocorridos para cada carote.

Os resultados dos ensaios efetuados apresentam-se nos Quadros 5.16, 5.17 e 5.18, nomeadamente os valores relativos à geometria dos provetes, força última F_u e a tensão de aderência, f_u .



a) Pastilhas depois do ensaio de Pull-off



b) Vista geral do suporte depois dos ensaios efetuados

Figura 5.28 – Modos de rotura dos provetes tijolo/FRCC-PAN

Quadro 5.16 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico e camada de FRCC-PAN

Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	F_u (kN)	f_u (MPa)	Tipo de fratura
1	49.06	1890.36	0.26	0.14	coesão/adesão?
2	49.27	1901.94	0.89	0.47	coesão/adesão?
3	49.20	1901.17	0.97	0.51	coesão/adesão?
4	49.09	1892.67	0.97	0.51	coesão/adesão?
5	49.17	1898.85	0.53	0.28	coesão/adesão?
f_{um} (MPa)			0.72	0.38	
Desvio Padrão			0.32	0.17	
Coeficiente de variação (%)			43.76	43.71	



Figura 5.29 – Modos de rotura dos provetes tijolo/FRCC-GF

Quadro 5.17 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico e camada de FRCC-GF

Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	F_u (kN)	f_u (MPa)	Tipo de fratura
1	44.30	1541.34	1.33	0.86	adesão
2	44.30	1541.34	0.85	0.55	adesão
3	44.25	1537.86	0.90	0.59	adesão
4	44.30	1541.34	0.80	0.52	adesão
5	44.30	1541.34	1.33	0.86	adesão
6	44.30	1541.34	1.11	0.72	adesão
f_{um} (MPa)			1.05	0.68	
Desvio Padrão			0.24	0.15	
Coeficiente de variação (%)			22.68	22.65	



Figura 5.30 – Modos de rotura dos provetes tijolo rebocado/FRCC-GF

Quadro 5.18 – Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico rebocado e camada de FRCC-GF

Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	F_u (kN)	f_u (MPa)	Tipo de fratura
1	44.21	1535.08	1.63	1.06	coesão
2	44.24	1537.16	1.47	0.96	coesão
3	44.19	1533.69	0.50	0.33	coesão
4	44.28	1539.94	2.24	1.45	coesão
5	44.50	1555.28	2.00	1.29	coesão
6	44.45	1551.79	1.18	0.76	coesão
f_{um} (MPa)			1.50	0.97	
Desvio Padrão			0.62	0.40	
Coeficiente de variação (%)			41.20	41.11	

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que a argamassa FRCC-PAN apresenta menor tensão de aderência ao suporte de tijolo cerâmico comparando com a tensão de aderência da argamassa FRCC-GF ao suporte de tijolo cerâmico e ao reboco convencional, que foi utilizado no tijolo cerâmico para simular um caso de alvenaria rebocada existente.



Quanto aos modos de rotura, no caso da argamassa FRCC-PAN ficou a dúvida se a fratura foi realmente de adesão, na interface entre a argamassa e o suporte, uma vez que após o arrancamento não se observou totalmente a superfície do tijolo ou se a fratura foi de coesão, através de fratura interna da argamassa. Nesta última possibilidade, a força de adesão argamassa/suporte é maior do que o valor obtido no ensaio.

No caso da argamassa FRCC-GF foi evidente a fratura por coesão, através da fratura interna do reboco convencional, o que significa que a força de adesão argamassa/reboco convencional é superior aos valores obtidos no ensaio.

6 CONCLUSÕES

O presente relatório apresenta os trabalhos experimentais desenvolvidos até ao momento, no âmbito da caracterização do comportamento mecânico e da caracterização da durabilidade e aderência de argamassas de base cimentícia reforçadas com fibras sintéticas, inseridas nas tarefas 1 e 2 da 6ª atividade do projeto InoTec.

O programa experimental desenvolvido envolveu a avaliação da trabalhabilidade, do comportamento mecânico e da durabilidade de quatro argamassas, FRCC-PAN e FRCC-GF, desenvolvidas pela CiviTest, FRCC-PVA, desenvolvida por *Esmaeeli et al.* [3] e a argamassa *ARMO-crete w*, comercializada pela empresa *S&P Clever Reinforcement*.

Em relação à trabalhabilidade foram realizados ensaios de espalhamento (“*Slump-flow test*”) e ensaios de determinação do teor de ar, da massa volúmica e da retenção de água. Verificou-se que a argamassa que apresentou maior trabalhabilidade no estado fresco foi a *ARMO-crete w*, por ter apresentado maior consistência por espalhamento, menor teor de ar e elevada retenção de água. Das argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF e FRCC-PVA, a que possui trabalhabilidade mais próxima do *ARMO-crete w* é a FRCC-GF, que também apresentou uma elevada consistência e retenção de água embora um teor de ar mais elevado.

No que concerne ao comportamento mecânico realizaram-se ensaios de determinação do módulo de elasticidade e ensaios de avaliação do comportamento em compressão e à flexão. A argamassa *ARMO-crete w* e FRCC-PVA apresentaram valores de módulo de elasticidade e resistência de compressão mais elevados do que os obtidos no FRCC-PAN e FRCC-GF. No entanto, as argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF apresentaram maior resistência pós pico, o que significa maior capacidade de absorção de energia, de deformação axial por compressão, por unidade de volume de material. Foi no entanto nos ensaios de flexão que mais se revelou o efeito benéfico das fibras PAN, das fibras de vidro e das fibras PVA, que para além de ter causado um aumento significativo da resistência à tração por flexão, provocou um aumento da ductilidade, comprovada pelos parâmetros de resistência residual. A argamassa *ARMO-crete w* apesar de conter fibras de carbono na sua composição apresentou uma diminuição abrupta da capacidade de carga, devido ao seu comportamento frágil.

A caracterização da durabilidade das argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF, FRCC-PVA e *ARMO-crete w*, foi realizada através da execução dos ensaios de absorção de água por capilaridade, de permeabilidade ao ar e à água, de retração por secagem, de resistência aos sulfatos e ensaios de pull-off (aderência ao suporte).

Relativamente à absorção de água por capilaridade e à porosidade aberta, verificou-se no caso das argamassas FRCC-PAN, FRCC-GF e *ARMO-crete w* que quanto maior os valores de teor de ar na



argamassa fresca, maior é a porosidade aberta e a porosidade capilar. Deste modo, verificaram-se uma elevada absorção capilar e uma elevada porosidade aberta nas argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF comparativamente com a argamassa *ARMO-crete w*. Este facto também foi verificado na avaliação da permeabilidade ao ar e à água, uma vez que as argamassas FRCC-PAN e FRCC-GF apresentaram elevados valores destes parâmetros comparativamente com a argamassa *ARMO-crete w*. Na avaliação da retração por secagem verificou-se que as argamassas *ARMO-crete w*, FRCC-GF apresentam um comportamento semelhante, apesar da argamassa FRCC-GF apresentar uma perda de massa duas vezes superior à obtida na *ARMO-crete w*. Quanto à resistência por sulfatos, é possível concluir que a ação dos sulfatos provocou um aumento da resistência à compressão e da resistência à tração por flexão e uma diminuição da ductilidade das argamassas em estudo. Verificou-se um aumento médio de 35% da resistência à compressão e um aumento médio de 67% da resistência à tração por flexão destes provetes, quando foram sujeitos previamente a 7 ciclos de imersão/secagem numa solução saturada de sulfato de sódio. Através dos ensaios de pull-off, verificou-se que a tensão de aderência da argamassa FRCC-PAN ao suporte de tijolo cerâmico é inferior à tensão de aderência da argamassa *ARMO-crete w* ao mesmo suporte. A argamassa FRCC-GF apresenta maior tensão de aderência ao reboco convencional aplicada em tijolo cerâmico (simulação de alvenaria de tijolo existente), do que diretamente aplicada ao tijolo cerâmico.

7 REFERÊNCIAS

- [1] NP EN 197-1 (2001), "*Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*", IPQ;
- [2] NP ENV 206-1 (2007), "*Betão: Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*", IPQ, pp. 21;
- [3] E. Esmaeeli, J. Barros e D. Gonçalves (2010), "*Preliminary Assessment on the development of cost-competitive PVA-fiber reinforcement mortar*", Report 10-DEC/E-09, Publicações ISISE, Dep. Eng.^a Civil, Universidade do Minho, pp. 30;
- [4] EN 1015-11 (1999), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*", norma europeia aprovada por CEN, pp. 8;
- [5] EN 1015-3 (1999), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of dry bulk density of hardened mortar*", norma europeia aprovada por CEN;
- [6] V. Haach, G. Vasconcelos, P.B. Lourenço e G. Mohamad (2010), "*Influence of the mortar on the compressive behavior of concrete masonry prisms*", Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN 1646-7078, APAET Mecânica Experimental, V. 18, pp. 79-84;
- [7] R. Silva, M. Barros, R. Pileggi, V. John (2005), "*Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow*", VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, I International Symposium on Mortars Technology, Florianópolis, pp. 106-120;
- [8] EN 1015-7 (1998), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar*", norma europeia aprovada por CEN;
- [9] EN 1015-6 (1998), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*", norma europeia aprovada por CEN;
- [10] M. Cincotto, M. Silva, H. Carasek (1995), "*Argamassa de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio*", Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil;
- [11] M. Resende (2001), "*Patologia dos revestimentos de argamassa*", Tecnologia de Produção de Revestimentos", Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil;
- [12] M. Veiga (1998), "*Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*", Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, LNEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto;
- [13] EN 1015-8 (1998), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*", norma europeia aprovada por CEN;
- [14] M. Rodrigues (2004), "*Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas – Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*", dissertação apresentada para a obtenção do grau académico de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de reabilitação do património edificado, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa;
- [15] NP EN 12390-13 (2012), "*Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression*", Technical Committee CEN/TC 104, pp. 10;

- [16] NP EN 12390-3 (2011), "*Ensaaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*", IPQ, Lisboa, pp. 21;
- [17] NP EN 12390-1 (2003), "*Ensaaios do betão endurecido, Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*", IPQ, Lisboa, pp. 14;
- [18] CEB FIP Model Code (2010), V.1, pp. 350;
- [19] RILEM TC 50-FMC (1985), "*Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend tests on notched beams*", *Materials and Structures*, V.18(106), pp. 285-290;
- [20] Carter, Wilson e Hoff (1999), "*British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation*", *Materials and Structures*, V.32, Issue 8, pp. 571-578;
- [21] R. Ferreira (2000), "*Avaliação de Ensaaios de Durabilidade do Betão*", Dissertação de Mestrado, Materiais e Reabilitação da Construção, Universidade do Minho, Guimarães, pp. 246;
- [22] M. Coutinho (1998), "*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*", Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto, pp. 392;
- [23] A. Costeira (2011), "*Durabilidade de betão reforçado com fibras de aço*", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, pp. 111;
- [24] A. Camões (2002), "*Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*", Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, pp. 456;
- [25] EN 1015-18 (2002), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*", norma europeia aprovada por CEN, pp. 8;
- [26] K. Stanish, R. Hooton e M. Thomas (1997), "*Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*", Ontario, Canada;
- [27] EN 1936 (2006), "*Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity*", BSI;
- [28] L. Miranda (2000), "*Estudo de factores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado*", Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;
- [29] B. Garcia (2001), "*Retrait au jeune âge du béton. Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées;
- [30] M. Veiga (2004), "*Comportamento à fendilhação de rebocos: avaliação e melhoria*", *Caderno de Edifícios*", LNEC, Lisboa, pp.7-27;
- [31] ASTM C490-07 "*Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*", ASTM International;
- [32] NP EN 12370 (2001), "*Métodos de ensaio para pedra natural: Determinação da resistência à cristalização de sais*", IPQ, Lisboa, pp. 9;
- [33] ASTM C88-05 "*Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*", ASTM International;



-
- [34] D. Chen, C. Du, X. Feng, e F. Ouyang (2013), "*An Elastoplastic Damage Constitutive Model for Cementitious Materials under Wet-Dry Cyclic Sulfate Attack*", Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Article ID 562410, pp.7;
- [35] M. Meriem e C. Nasser (2013), "*Mechanical behavior of self compacting concrete equivalent mortar attacked by sodium sulfate solution*", Civil and Environmental Research, V.5, pp.91-95;
- [36] EN 1015-12 (2000), "*Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*", norma europeia aprovada por CEN;