



**Lara Mendes Neves**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação da durabilidade de fios metálicos embebidos em argamassa de cal aérea e pozolana sujeita a envelhecimento artificial**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Co-orientador: Margarida Rolim Lima, Professora Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Carlos Manuel Chastre Rodrigues, Professor Doutor, FCT-UNL

Arguente: António Manuel Pinho Ramos, Professor Doutor, FCT-UNL

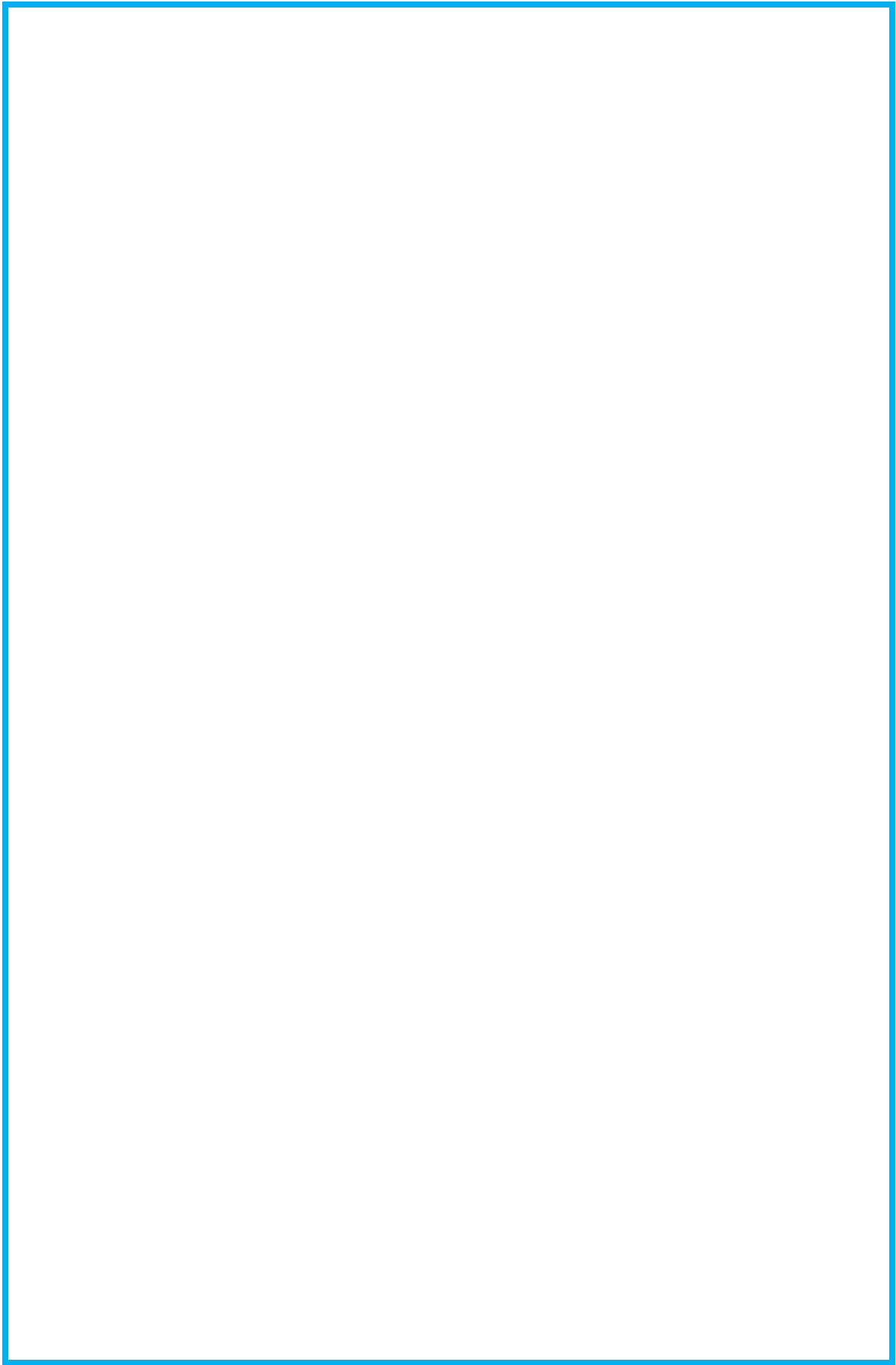
Vogal: Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Vogal: Margarida Rolim Lima, Professora Doutor, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013





**Lara Mendes Neves**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação da durabilidade de fios metálicos embebidos em argamassa de cal aérea e pozolana sujeita a envelhecimento artificial**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Co-orientador: Margarida Rolim Lima, Professora Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Carlos Manuel Chastre Rodrigues, Professor Doutor, FCT-UNL

Arguente: António Manuel Pinho Ramos, Professor Doutor, FCT-UNL

Vogal: Fernando Farinha Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Vogal: Margarida Rolim Lima, Professora Doutora, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013



‘Copyright’ Lara Mendes Neves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais*





## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de expressar o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação:

Em particular gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Pinho, orientador científico desta dissertação e à Professora Doutora Margarida Rolim, co-orientadora, pelos conselhos, pelo apoio e pela total disponibilidade em ajudar a ultrapassar as dificuldades que foram surgindo, bem como pelo interesse manifestado pelo presente trabalho.

Ao engenheiro Vítor Silva, por toda a sua ajuda no desenvolvimento da campanha experimental, e pela sua boa disposição ao longo da mesma. À bolsista Andreia por toda a atenção na campanha experimental realizada no DCM.

Ao Engenheiro Fernando Cartaxo da empresa Fradical pelo fornecimento do aditivo pozolânico (metacaulino).

À professora Paulina Faria pela disponibilização de material bibliográfico.

Ao terminar esta dissertação encerra-se um longo percurso da minha formação académica que não teria sido possível sem a ajuda dos meus pais, Fernanda e Turíbio, a quem dedico esta dissertação, que estiveram sempre presentes e me acompanharam ao longo do tempo com uma enorme paciência e palavras motivadoras.

Aos meus amigos Catarina Cota, Cátia Abreu, Gonçalo Lino, João Nabais, Diogo Resende, Márcio Alves, Tiago Maurício, em especial Tiago Madeira, João Valério e Duarte Vargas que me ajudaram ao longo dos ensaios experimentais sempre com a sua boa disposição e amizade.

Às minhas amigas mais recentes Joana Fonseca e Catarina Agapito.

À minha amiga Inês Nery que apesar de ausente me acompanhou nesta última etapa.

Ao meu grande amigo Miguel Anjos pela sua amizade ao longo deste tempo.

Ao João pelo seu apoio e palavras de incentivo.



## RESUMO

Com a presente dissertação, desenvolvida no departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa (DEC-FCT/UNL), pretende-se estudar a durabilidade de fios metálicos embebidos em argamassa de cal aérea e pozolana (metacaulino) sujeitos a envelhecimento artificial.

Este trabalho é o seguimento de uma tese de doutoramento intitulada “ Paredes de alvenaria ordinária, estudo experimental com modelos simples e reforçados”, enquadrado no processo de reabilitação de edifícios.

Uma das motivações deste tema foi a avaliação da durabilidade dos fios metálicos, de forma a verificar a sua viabilidade como solução de reforço armado para reabilitação de edifícios.

Numa primeira fase, realizou-se uma pesquisa bibliográfica de artigos e trabalhos de investigação, que abrangeu temas relacionados com: construções em alvenaria de pedra tradicional, anomalias em construções de alvenaria de pedra tradicional, reabilitação estrutural, soluções para reabilitação de edifícios antigos, reboco armado, fios metálicos (produção, processo oxidação e camada protetora do aço), argamassas de cal aérea e metacaulino.

No trabalho experimental desenvolvido, os fios metálicos livres e embebidos em argamassa de traço 1:3, foram sujeitos a envelhecimento artificial (cloretos e nevoeiro salino) e posteriormente sujeitos a ensaios mecânicos, físicos e químicos, tanto no Departamento de Engenharia Civil (DEC) como no Departamento de Ciências dos Materiais (DCM) da FCT.

Estes ensaios experimentais tiveram como objetivo classificar a durabilidade dos fios metálicos livres e embebidos em argamassa.

**Termos chave:** Reabilitação de edifícios antigos, paredes de alvenaria de pedra tradicional, reboco armado, fios metálicos, durabilidade



## ABSTRACT

With the present dissertation, developed in the Department of Civil Engineering , Faculty of Science and Technology, University of Lisbon ( DEC-FCT / UNL ) , we intend to study the durability of metal iron wires embedded in lime based mortar with pozzolan ( metakaolin ) subject to artificial aging.

This work is the follow up of a doctoral thesis entitled "Ordinary masonry walls, experimental study using simple and strengthened models", framed in the process of building rehabilitation.

One of the motivations of this theme was to evaluate the endurance of the iron wire, in order to verify its feasibility as a solution armed reinforcement for rehabilitation of buildings.

Initially, it was made a literature and research work covering issues related to traditional stone masonry buildings, anomalies in the construction of traditional stone masonry, structural rehabilitation, solutions for rehabilitation of old stone buildings, reinforced plaster, iron wires (production, process and oxidation protective layer of steel) , lime based mortars and metakaolin.

In this experimental work the free metallic wires and the embedded ones in mortar 1:3, were subjected to artificial aging (chlorides and salt spray), and then subjected to mechanical, physical and chemical testing, in the Civil Engineering Department (DEC) and in the Department of Materials Science (DCM) of FCT.

These experimental trials aimed to classify the durability of the free iron wires free and embedded ones in mortar.

**Keywords:** ancient building rehabilitation, rubble stone masonry walls, reinforced plaster, iron wires, durability



## **LISTA DE SIGLAS**

**ARG-FMC** - Argamassa em contacto com o fio metálico envelhecido em cloretos

**ARG-FMNS** - Argamassa em contacto com o fio metálico envelhecido em câmara de nevoeiro salino

**ASTM** – American Society for Testing and Materials

**CC** - Coeficiente de capilaridade

**CEN** - Comité Européen de Normalisation

**CL** - Cloretos

**CNS** - Câmara de nevoeiro salino

**Dd** - Desvio Padrão

**DEC-FCT/UNL** - Departamento de Engenharia Civil

**E<sub>d</sub>** - Módulo de elasticidade dinâmico

**EF** - Endurecido a frio

**EN** - European Norm

**FCT-UNL** - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

**Fe** - Ficha de ensaio

**FMC-A** - Fio metálico envelhecido em cloretos embebido na argamassa

**FMC-L** - Fio metálico envelhecido em cloretos livre de argamassa

**FMNS-A** - Fio metálico envelhecido em câmara de nevoeiro embebido na argamassa

**FMNS-L** - Fio metálico envelhecido em câmara de nevoeiro livre de argamassa

**FMR** - Fio metálico de referência (sem envelhecimento)

**IPQ** - Instituto Português de Qualidade

**LQ** - Laminado a quente

**m.v.a** - Massa volúmica aparente

**Méd** - Média

**NS** - Nevoeiro salino

**PA** - Provete Armado

**P<sub>ab</sub>** - Porosidade aberta

**PS** - Provetes Simples

**R<sub>c</sub>** - Resistência à flexão

**R<sub>t</sub>** - Resistência à compressão

**W<sub>t</sub>** - Teor em água



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Considerações gerais .....	1
1.2.	Objetivo e metodologia .....	1
1.3.	Organização do texto.....	2
<b>2.</b>	<b>ENQUADRAMENTO DO TEMA .....</b>	<b>3</b>
2.1.	Considerações iniciais.....	3
2.2.	Construções de alvenaria de pedra tradicional.....	3
2.3.	Principais anomalias em construções de alvenaria de pedra tradicional .....	4
2.3.1.	Aspetos de durabilidade e efeitos dos sais solúveis em alvenarias de edifícios antigos ..	5
2.4.	Reabilitação estrutural de edifícios .....	5
2.5.	Técnicas de reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra tradicional.....	7
2.5.1.	Técnicas de reforço de paredes de alvenaria antiga.....	7
2.6.	Fios metálicos.....	9
2.6.1.	Tipo de aço utilizado.....	9
2.6.2.	Produção de aço e ferro.....	9
2.6.3.	Corrosão do ferro.....	10
2.6.4.	Proteção e controlo da corrosão em metais.....	11
2.6.5.	Características do aço.....	11
2.7.	Matérias-primas da argamassa de cal aérea.....	13
2.7.1.	Cal aérea.....	13
2.7.2.	Agregados (areias).....	14
2.7.3.	Componentes pozolânicos .....	15
	Metacaulino.....	15
2.8.	Argamassas.....	16
2.8.1.	Considerações iniciais .....	16
2.8.2.	Argamassas de cal aérea e metacaulino.....	16
2.9.	Breve avaliação do comportamento dos principais materiais utilizados .....	17
2.9.1.	Fios metálicos .....	17

2.9.2. Argamassa .....	18
Módulo de elasticidade dinâmico .....	18
Resistências mecânicas .....	18
Resistência aos sais solúveis (cloretos) .....	19
Absorção de água por capilaridade .....	19
2.9.3. Resultados de outros autores .....	19
Fios metálicos.....	19
Argamassa.....	20
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Considerações iniciais.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. Breve caracterização dos materiais utilizados .....</b>	<b>27</b>
3.2.1. Fios metálicos .....	28
3.2.2. Agregados.....	29
3.2.3. Ligante .....	29
3.2.4. Pozolana.....	29
<b>3.3. Corte dos fios metálicos.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4. Ensaios de caracterização física dos constituintes da argamassa .....</b>	<b>31</b>
3.4.1. Análise granulométricas das areias .....	31
3.4.2. Baridade das areias .....	33
<b>3.5. Preparação das argamassas .....</b>	<b>35</b>
3.5.1. Amassaduras.....	35
3.5.2. Ensaio de espalhamento .....	36
<b>3.6. Execução dos provetes.....</b>	<b>38</b>
<b>3.7. Caraterização dos fios metálicos .....</b>	<b>39</b>
3.7.1. Organização dos ensaios .....	39
3.7.2. Resistência à tração.....	40
3.7.3. Difração de raio x (DRX).....	48
3.7.4. Fluorescência.....	50
<b>3.8. Caracterização das argamassas.....</b>	<b>50</b>
3.8.1. Organização dos ensaios .....	50
3.8.2. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico .....	51
3.8.3. Resistência à tração por flexão e à compressão .....	53
3.8.4. Resistência aos sais solúveis (cloretos) .....	56

3.8.5.	Absorção de água por capilaridade .....	59
3.8.6.	Secagem .....	61
3.8.7.	Porosidade aberta .....	64
3.8.8.	Difração de raio x (DRX) .....	66
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.</b>	<b>Fios metálicos.....</b>	<b>71</b>
4.1.1.	Tração nos fios.....	71
4.1.2.	Secção resistente e secção de referência dos fios metálicos .....	73
4.1.3.	DRX aos fios metálicos .....	77
<b>4.2.</b>	<b>Argamassa .....</b>	<b>80</b>
4.2.1.	Parâmetros mecânicos .....	80
4.2.2.	Absorção de água por capilaridade .....	82
4.2.3.	Secagem .....	84
4.2.4.	Porosidade aberta .....	85
4.2.5.	Resistência aos cloretos.....	85
4.2.6.	DRX .....	87
<b>4.3.</b>	<b>Comparação com outros autores.....</b>	<b>89</b>
4.3.1.	Fios metálicos .....	89
4.3.2.	Argamassa .....	89
	Comportamento face à ação da água.....	90
4.3.3.	Resistência aos cloretos.....	91
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>93</b>
<b>5.2.</b>	<b>Desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>
	<b>Fichas usadas para identificação de componentes no ensaio de DRX.....</b>	<b>99</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Construções em alvenaria de pedra .....	4
Figura 2.2 - Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações.....	6
Figura 2.3 - Número de edifícios muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício. ....	6
Figura 2.4 - Técnicas de reforço de alvenaria de pedra.....	8
Figura 2.5- Esquema do fabrico de aço .....	10
Figura 2.6 - Gráfico tensão deformação para aço LQ no ensaio de tração.....	12
Figura 2.7 - Gráfico tensão deformação para aço EF no ensaio de tração .....	13
Figura 3.1- Elementos constituintes do trabalho experimental.....	28
Figura 3.2 - Materiais utilizados na preparação da argamassa .....	29
Figura 3.3 – Corte dos fios metálicos utilizados na preparação dos provetes .....	31
Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados .....	33
Figura 3.5 - Determinação da baridade .....	34
Figura 3.6 - Preparação das argamassas .....	36
Figura 3.7 - Sequência do ensaio de consistência por espalhamento .....	37
Figura 3.8 - Sequência da execução dos provetes .....	38
Figura 3.9 - Provetes colocados em cura húmida .....	39
Figura 3.10 - Câmara de nevoeiro salino.....	41
Figura 3.11 - Câmara climática.....	41
Figura 3.12 - Ensaio de tração aos fios metálicos .....	42
Figura 3.13 - Gráfico tensão-deformação média aos 0 dias .....	42
Figura 3.14 – Remoção dos fios metálicos da argamassa .....	42
Figura 3.15 – Gráfico tensão deformação média aos 30 dias .....	43
Figura 3.16 - Gráfico tensão deformação média aos 60 dias .....	43
Figura 3.17 - Gráfico tensão deformação média 90 dias.....	44
Figura 3.18 - Gráfico tensão deformação média aos 120 dias .....	44
Figura 3.19 - Fios metálicos oxidados posteriormente a serem sujeitos a envelhecimento artificial .....	45
Figura 3.20 - Força máxima de rotura aos fios metálicos de referência.....	46
Figura 3.21 – Secção média resistente e respetiva força máxima ao longo do envelhecimento....	47
Figura 3.22 - Secção dos fios metálicos ao longo do processo de envelhecimento .....	48
Figura 3.23 - Feixes de raio X .....	48
Figura 3.24 - Máquina de DRX (DCM-FCT/UNL).....	49

Figura 3.25 - Ensaio módulo de elasticidade dinâmico .....	52
Figura 3.26 - Ensaio de determinação de resistência mecânica na ZWICK Z050 .....	55
Figura 3.27 - Câmara climática usada para o ensaio aos cloretos. ....	57
Figura 3.28 - Média da variação da perda dos provetes armados e não armados.....	58
Figura 3.29 - Média de cloretos retidos nos PA e PS .....	58
Figura 3.30 - Evolução dos provetes por ataque aos cloretos .....	59
Figura 3.31 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	59
Figura 3.32 - Provetes na bancada lisa e impermeável.....	62
Figura 3.33 – Ensaio de determinação de porosidade aberta .....	65
Figura 3.34 - Material utilizado na elaboração de pastilha no DCM.....	67
Figura 3.35 - Pastilha analisada por DRX .....	68
Figura 3.36 - DRX areia amarela .....	69
Figura 3.37 - DRX areia de rio.....	69
Figura 3.38 - DRX cal aérea .....	70
Figura 3.39 - DRX metacaulino .....	70
Figura 4.1 – Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 30dias.	71
Figura 4.2 -Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 60dias ..	72
Figura 4.3- Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 90dias ..	72
Figura 4.4- Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 120dias	73
Figura 4.5 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 30 dias de envelhecimento .....	74
Figura 4.6 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 60 dias de envelhecimento .....	74
Figura 4.7 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 90 dias de envelhecimento .....	75
Figura 4.8 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 120 dias de envelhecimento .....	75
Figura 4.9 - Fios metálicos sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino.....	76
Figura 4.10- Fios metálicos sujeitos a envelhecimento por cloretos .....	76
Figura 4.11 - DRX dos fios metálicos FMNS-L ao longo do processo de envelhecimento artificial por nevoeiro salino.....	77
Figura 4.12 - DRX aos fios metálicos livres envelhecidos por nevoeiro salino aos 30, 60, 90 e 120dias .....	79
Figura 4.13 - DRX FMC-A aos 90 dias de envelhecimento por cloretos .....	80
Figura 4.14- Módulo de elasticidade dinâmico.....	81
Figura 4.15 - Resistência à tração dos provetes simples.....	82
Figura 4.16 - Resistência à compressão dos provetes simples .....	82

Figura 4.17 - Absorção capilar .....	83
Figura 4.18 - Valores de VA e CC.....	83
Figura 4.19 – Teor em água.....	84
Figura 4.20- Taxa de secagem e Índice de secagem .....	84
Figura 4.21 – Porosidade aberta.....	85
Figura 4.22- Massa volúmica aparente.....	85
Figura 4.23 - Percentagem de cloretos retidos.....	86
Figura 4.24 - Variação de massa dos provetes até aos 35 ciclos.....	86
Figura 4.25 - Variação de massa dos provetes até aos 20 ciclos.....	87
Figura 4.26 - DRX ARG-FMC ao longo do processo de envelhecimento artificial .....	88
Figura 4.27 -DRX ARG-FMNS ao longo do processo de envelhecimento artificial.....	88
Figura 4.28 – Ensaio de tração de um varão metálico utilizado no confinamento transversal no trabalho de investigação desenvolvido por Fernando Pinho .....	89





## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Características do aço .....	11
Quadro 2.2 - Características do aço em Portugal.....	12
Quadro 2.3 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Tiago Branco.....	21
Quadro 2.4 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Rodrigo Massena .....	22
Quadro 2.5 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por André Bandeira.....	23
Quadro 2.6 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Nuno Felgueiras.....	24
Quadro 2.7 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Paulina Faria.....	24
Quadro 3.1 Siglas dos elementos ensaiados .....	27
Quadro 3.2 - Características físicas do metacaulino .....	30
Quadro 3.3 - Características químicas do metacaulino .....	30
Quadro 3.4 - Características das areias (areia amarela e areia de rio).....	33
Quadro 3.5 - Baridade dos materiais constituintes da argamassa .....	35
Quadro 3.6 - Quantidade dos materiais utilizados para a preparação da argamassa .....	35
Quadro 3.7 – Tipos de fio metálico e dias de ensaio respetivos .....	40
Quadro 3.8 – Força máxima, perda de secção e secção resistentes dos fios metálicos sujeitos a arrefecimento.....	46
Quadro 3.9 – Fios metálicos com respetivas secções ao longo do processo de envelhecimento...	47
Quadro 3.10 - Ensaio de fluorescência dos fios metálicos utilizados .....	50
Quadro 3.11 - Ensaios realizados e fichas de ensaio correspondentes .....	51
Quadro 3.12 – Módulo de elasticidade dinâmico.....	53
Quadro 3.13 – Resistência à tração por flexão dos três provetes ensaiados .....	55
Quadro 3.14 – Resistência à compressão .....	56
Quadro 3.15 – Percentagem média de cloretos retidos .....	57
Quadro 3.16 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico.....	61
Quadro 3.17 – Teor de água dos provetes simples.....	63
Quadro 3.18 - Porosidade aberta ( PA) e massa volúmica aparente (m.v.a) .....	66
Quadro 4.1 - Módulo de elasticidade dinâmico [Mpa] obtido por cada provete simples (PS) .....	81
Quadro 4.2 - Siglas da argamassa em contacto com o fio metálico .....	87
Quadro 4.3 - Resultados de outros autores para o comportamento mecânico da argamassa.....	90

Quadro 4.4 - Resultados de outros autores para o comportamento face à ação da água da argamassa .....	91
Quadro 4.5 - Resultados de outros autores para a resistência da argamassa face aos cloretos .....	91

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Considerações gerais**

Este tema de dissertação tem como base um trabalho de investigação realizado no Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC-FCT/UNL), onde foram estudados modelos experimentais de alvenaria ordinária e analisadas várias soluções de reforço.

O estudo da durabilidade dos fios metálicos embebidos em argamassa surge da importância do desenvolvimento de novas técnicas de reabilitação, exigido no âmbito da reabilitação de edifícios.

Quando se dá início a um processo de reabilitação de um edifício há que ter em conta vários fatores, tais como: tipo de edifício, aplicação de uma argamassa compatível com a original, tipo de suporte utilizado e as características ambientais.

Existem várias soluções que podem ser adotadas na reabilitação de edifícios, cada uma com características específicas.

No presente trabalho, é estudada a durabilidade de fios metálicos, para que posteriormente seja feita a verificação da sua viabilidade como solução de reboco armado, para futura aplicação na reabilitação de edifícios.

Para a parte experimental desta dissertação desenvolveram-se vários ensaios, no Departamento de Engenharia Civil (DEC) e no Departamento de Ciências Materiais (DCM) da FCT-UNL. Estes ensaios experimentais tiveram como objetivo avaliar a durabilidade dos fios metálicos livres e dos fios metálicos embebidos em argamassa.

Ao longo desta dissertação são abordadas as principais anomalias existentes nos edifícios antigos e as várias técnicas de reabilitação para paredes de alvenaria antiga. É feito um pequeno enquadramento histórico da reabilitação de forma a evidenciar a importância da reabilitação de edifícios antigos. São apresentados os vários ensaios realizados ou seguidos (caraterização física, química e mecânica) dos fios metálicos e da argamassa. Por fim é apresentada uma discussão e análise de resultados, com vista a avaliar a durabilidade dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento artificial.

Esta dissertação foi desenvolvida em paralelo com outras três dissertações, onde as variantes são os fios metálicos (substituídos por fitas de aço inox) e a argamassa (substituída por argamassa bastarda) onde os mesmos são embebidos.

## **1.2. Objetivo e metodologia**

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a durabilidade de fios metálicos livres e embebidos em argamassa de cal aérea e metacaulino. Este tipo de argamassa, é caracterizada por ter características muito semelhantes às argamassas utilizadas originalmente em edifícios antigos.

Para a avaliação dos fios metálicos e do meio onde estes estão inseridos foram realizados vários ensaios (físicos, mecânicos e químicos), com o propósito de avaliar a sua durabilidade dentro e fora de argamassa de cal aérea e metacaulino.

Espera-se com este estudo contribuir para o melhoramento de uma solução de reabilitação de edifícios antigos, como o reboco armado.

### **1.3. Organização do texto**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo são feitas as considerações gerais, são também definidos os objetivos e exposta a estrutura do texto apresentada nesta dissertação.

No segundo capítulo é feito um enquadramento do tema, contextualizando a reabilitação de edifícios e técnicas utilizadas. São apresentados alguns procedimentos de ensaio e os respetivos valores de caracterização da argamassa obtidos por diferentes autores

No terceiro capítulo é feita uma caracterização dos fios metálicos utilizados e do meio onde os mesmos se encontram embebidos (argamassa de cal aérea e metacaulino). São descritos os vários procedimentos experimentais realizados, sendo posteriormente apresentados os resultados.

No quarto capítulo é feita a análise discussão de resultados apresentados no capítulo anterior.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas a partir da análise dos resultados obtidos, como também algumas propostas para estudos e desenvolvimento. Por fim encontram-se as referências bibliográficas consultadas, tal como os anexos à dissertação.

## **2. ENQUADRAMENTO DO TEMA**

### **2.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo é feito um enquadramento do tema no qual se encontra inserida esta dissertação. São referidas várias anomalias apresentadas pelos edifícios antigos, como também os vários processos de reabilitação utilizados. É apresentada uma síntese do processo de fabricação do aço do ferro e métodos de proteção e controlo da corrosão em metais.

No final do capítulo são descritos alguns ensaios de caracterização do fio e do meio onde o mesmo se encontra inserido, são também apresentados valores de outros autores para esses mesmos ensaios.

### **2.2. Construções de alvenaria de pedra tradicional**

A alvenaria de pedra foi outrora muito utilizada na construção, podendo ser ainda encontrada em vários edifícios em Portugal.

No nosso país existe ainda uma quantidade significativa de edifícios em alvenaria de pedra. Algumas destas construções, tais como castelos, palácios e templos religiosos encontram-se ainda hoje num estado razoável de construção.

A alvenaria de pedra não se encontra apenas relacionada a construções históricas mas também à construção de edifícios tradicionais (centros urbanos), sendo que até ao séc. XX a construção predominante era de pedra, constituída por pedras de dimensão média ligadas entre si por argamassa. (PINHO, 2º edição, 2008)

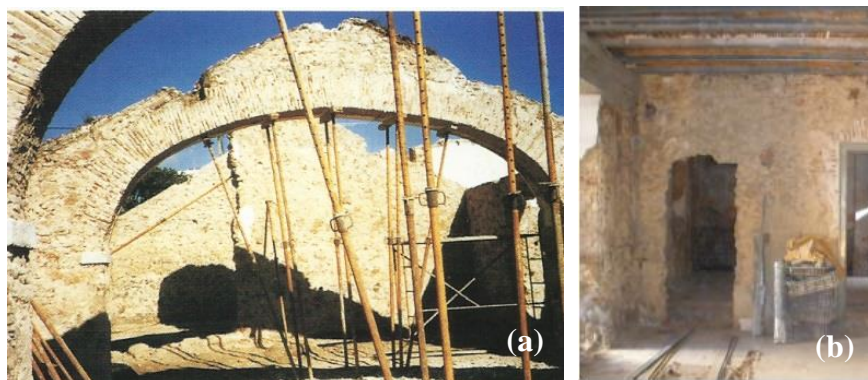
Para uma melhor compreensão, pode-se dizer que uma parede em alvenaria de pedra consiste na união de um conjunto de pedras, blocos e tijolos ligados entre si por argamassa com vários tipos de ligantes. Estas paredes de alvenaria de pedra que se encontram em edifícios antigos são muito diferentes das estruturas de betão armado utilizadas atualmente. Uma das maiores diferenças consiste no facto de as paredes de alvenaria antiga serem mais espessas e porosas, não contendo cortes de capilaridade, admitindo assim a entrada de água para o interior do edifício. Esta entrada era de permanência rápida, pois a água secava com facilidade. (VEIGA & TAVARES, 2002)

As paredes dos edifícios recentes, ao contrário das de alvenaria de pedra são construídas para garantir por exemplo, proteção contra a humidade através de cortes de capilaridade. As paredes de alvenaria antiga, mais precisamente as paredes exteriores tinham funções estruturais e de proteção das condições climatéricas

As construções de alvenaria de pedra podem dividir-se em: construções de alvenaria mista (onde são utilizados dois ou mais materiais), construções de alvenaria ordinária (construída por

pedras na sua maioria calcárias, de forma e dimensões irregulares ligadas entre si por argamassa), construções de alvenaria de pedra seca ou mal argamassada (o assentamento das pedras é feito com pouca argamassa), construções de enxilharia ou silharia, (constituída por pedras que foram desbastadas grosseiramente) e por fim construções de cantaria (constituídas por pedras paralelepípedica de grandes dimensões aparelhadas).

A alvenaria estrutural apresenta como característica principal uma razoável resistência à compressão, tendo todavia uma fraca resistência ao corte e à tração. (BARRETO, 2010)



(a) - (PINHO, 2º edição, 2008); (b) - construção de alvenaria ordinária (BARRETO, 2010)

Figura 2.1 - Construções em alvenaria de pedra

### 2.3. Principais anomalias em construções de alvenaria de pedra tradicional

As principais anomalias em edifícios antigos devem-se fundamentalmente a causas naturais, sendo uma destas o envelhecimento dos materiais. Todos os edifícios construídos a partir dos anos 40 do século XX já eram considerados como edifícios de construção moderna.

As principais anomalias existentes nas paredes de edifícios antigos são: fendilhação, desagregação e esmagamento. (PINHO, 2º edição, 2008)

As anomalias em revestimentos não são muito diferentes das anomalias existentes nos próprios suportes, relativamente ao reboco, a fendilhação do mesmo pode dever-se à fendilhação da parede, onde o reboco está aplicado, sendo muitas vezes causado pela retração da argamassa constituinte. A humidade é também uma das causas das anomalias, pois provoca a desagregação do material. Este tipo de desagregação está presente em rebocos com baixa resistência mecânica, normalmente em rebocos de cal com “acabamentos à base de pinturas pouco permeáveis ao vapor”. (APPLETON, 2003)

Relativamente aos rebocos exteriores, são estes que se encontram mais expostos a mudanças de temperatura e à ação dos agentes climáticos, sobretudo à ação do vento (transportando areias e pó), provocando assim um desgaste do reboco. Nos rebocos externos

existe também compressão excessiva devido ao desenvolvimento de tensões muito elevadas, o que faz com que haja menor resistência dos rebocos de cal. (APPLETON, 2003).

### **2.3.1. Aspetos de durabilidade e efeitos dos sais solúveis em alvenarias de edifícios antigos**

A ação dos sais solúveis é uma das causas mais frequentes na degradação dos edifícios antigos, causando problemas tanto ao nível estético como a nível estrutural. Os sais poderão ter origem externa, ou poderão ser provenientes dos materiais em questão. Se considerarmos apenas os sais em si, não têm qualquer poder nocivo, contudo, se existir o conjunto sais e água, então sim existirão efeitos nocivos.

Ao formar-se a solução de sais e água, inicia-se uma migração da mesma no interior dos materiais porosos. A degradação ocorre quando há a cristalização de sais no interior dos materiais (ocorre durante o processo de secagem), originando-se formação de tensões internas. (FARIA, 2004)

A temperatura é um fator muito importante, pois tem grande influência no tempo a que o material leva a degradar-se, como também a intensidade a que o mesmo se degrada. A taxa de secagem é influenciada pela temperatura, influenciando também a taxa de cristalização dos sais. Tal como já foi referido anteriormente, é necessária uma solução de água e sais para que haja degradação, mas a partir do momento em que a solução esteja em contato com o material e existam alterações de humidade relativa do ar, inicia-se o processo de cristalização, que provoca danos muito graves no material. Se a mudança da temperatura e da humidade forem mudanças lentas, provocarão menos danos do que se forem mudanças rápidas, pois ocorrerão mais ciclos de cristalização e dissolução, provocando assim uma maior fadiga do material e consequentemente provocando uma redução da sua resistência levando a uma perda total de coesão. (FARIA, 2004)

Por fim podemos salientar que os sais solúveis influenciam as soluções utilizadas na reabilitação de edifícios, tais como a injeção de calda ou a aplicação de uma nova argamassa, pois dá-se a libertação de sais que migram para a superfície quando entram em contato com a água. (BARRETO, 2010; PUIM, 2010)

## **2.4. Reabilitação estrutural de edifícios**

As construções em alvenaria de pedra têm como principal característica a fragilidade perante a ações dinâmicas, entre as quais se encontra a ação sísmica. Sendo Portugal um país com uma atividade sísmica relativamente alta, existe a necessidade de se tomar algumas medidas de prevenção, de modo a suavizar os danos, caso aconteça uma destas situações.

Segundo um estudo do Instituto Nacional de Estatística, embora o estado de conservação do parque habitacional não esteja em muito mau estado, verifica-se que existe ainda um grande

número de edifícios com necessidade de reparação, existindo dentro destes um número elevado de edifícios bastante degradados.

Em 2011 foram contabilizados cerca de 56774 alojamentos familiares clássicos habitados, que estão inseridos na categoria de edifícios muito degradados, estando estes localizados na zona de Grande Lisboa, Grande Porto, Tâmega, Douro e Algarve.

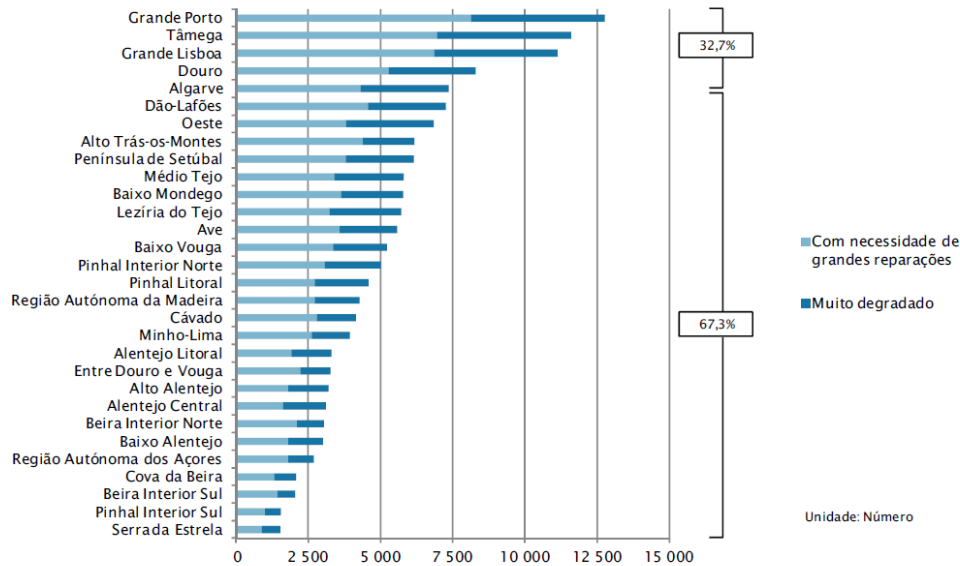


Figura 2.2 - Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações (INE, 2013)

Relativamente à época de construção, apesar 14,4% do parque habitacional representar os edifícios construídos até ao ano de 1945, foi nesta época de construção que se inseriu os edifícios com necessidade de grandes reparações ou muito degradados, cerca de 58,1%. Esta percentagem reduziu acentuadamente nos edifícios construídos ente 1946 e 1990, tornando-se muito reduzida no edifícios posteriores a 1990. (INE, 2013)

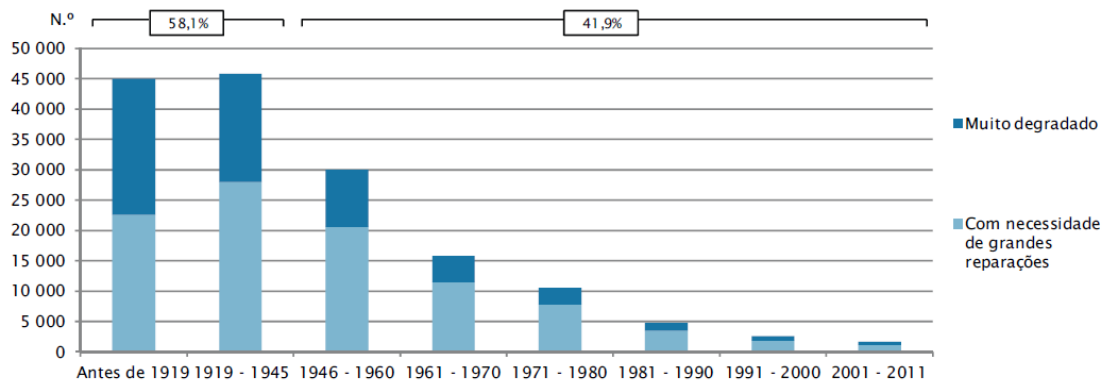


Figura 2.3 - Número de edifícios muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício. (INE, 2013)



## **2.5. Técnicas de reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra tradicional**

A conservação de edifícios antigos é algo crucial nos tempos correntes, prolongando o tempo de vida útil de um edifício, sendo para isso, necessário que o mesmo seja sujeito a operações de manutenção regulares. Nestas operações estão incluídas pequenas reparações, como, pinturas e limpeza. (APPLETON, 2003; MAURÍCIO, 2012)

Existem dois tipos de reabilitação: a reabilitação que implica ações de reparação e consolidação.

Normalmente quando são aplicadas ações de reforço num edifício, estas servem para alterar algumas das características já existentes no edifício, melhorando o comportamento do mesmo face às ações sísmicas e a sua capacidade resistente (paredes e fundações). Antes de ser aplicada qualquer ação de reforço é necessário ter em conta se o edifício é antigo ou recente, se for antigo há que ter em conta a solução construtiva utilizada anteriormente, para que a atual seja compatível (a nível físico, mecânico e químico) com os materiais utilizados anteriormente.

Existem várias técnicas de reforço estrutural para edifícios antigos tais como: desmonte e reconstrução, refechamento de juntas, reboco armado, confinamento transversal de paredes e cintagem global do edifício.

Quando se aplica uma técnica de reforço estrutural é necessário verificar que todo o processo e o material utilizado são compatíveis aos originais. (APPLETON, 2003)

### **2.5.1. Técnicas de reforço de paredes de alvenaria antiga**

Existem várias técnicas de reforço de paredes de edifícios antigos, estas técnicas distinguem-se por utilizar materiais bastante compatíveis aos materiais originais, como também técnicas em muito semelhantes

As técnicas existentes podem ser classificadas de duas maneiras, a primeira está relacionada com o nível de reforço e a segunda apenas ao nível do elemento estrutural.

As várias técnicas existentes são: o refechamento de juntas [Figura 2.4 (a)], o desmonte e reconstrução, o reboco armado [Figura 2.4 (b)], o confinamento transversal de paredes, a injeção de caldas [Figura 2.4 (c)], o encamisamento, o pré esforço vertical, entre outras. (APPLETON, 2003; MAURÍCIO, 2012)

No presente tema de dissertação, a técnica de reboco armado terá especial destaque. O facto de este tipo de reboco ser armado está relacionado com a sua constituição, trata-se de uma técnica de reabilitação onde é aplicada uma armadura que poderá ser em fibra de vidro ou polimérica, com proteção anti-alcalina ou uma chapa de metal distendido em malha eletrossoldada com proteção anti-corrosiva ou aço inox. (F.S.PINHO, 2007; MARTINS, 2012)

As redes de fibra de vidro ou poliméricas são fixadas á parede através conectores metálicos ou fixadores ou então através de pequenas pregagens, garantindo assim que o um melhor confinamento aplicado na alvenaria. (F.S.PINHO, 2007; MAURÍCIO, 2012)

O reboco armado tanto poderá ser utilizado em edifícios novos como antigos, quando aplicado em edifícios antigos tem como objetivo reforçar não só a parede como também o reboco.

Esta técnica de reabilitação é executada com redes distendidas sobre a alvenaria, criando assim uma distribuição de tensões uniforme. É uma das técnicas mais utilizadas presentemente na reabilitação de edifícios, é uma técnica de reforço de paredes de alvenaria tradicional, utilizada quando há necessidade de melhorar as propriedades mecânicas, ou seja, quando o edifício apresenta sinais de degradação superficial ou então fendilhação. Também é aplicado quando os edifícios necessitam de proteção anti-sismica.

Contudo este tipo de reboco também apresenta as suas desvantagens, desvantagens essas relacionadas com o princípio da reversibilidade, pois a remoção da parede provocará danos superficiais no paramento, outra das desvantagens prende-se com o nível estético. (MAURÍCIO, 2012)

Este tipo de reboco foi também estudado na tese de doutoramento do professor Fernando Pinho (F.S.PINHO, 2007), onde uma das soluções consistia em “muretes reforçados com reboco de argamassa bastarda, armado com rede de fibra de vidro e confinamento transversal, com apoio na base”, o estudo desta solução consistia em aplicar um sistema de confinamento transversal contínuo que irá aumentar a resistência mecânica ao elemento que irá ser reforçado, este tipo de reboco procurou resolver um problema existente na reabilitação de edifícios antigos onde as paredes resistentes são só as paredes exteriores.

Para a realização desta solução foi necessário passar quatro fios de aço zincado (confinamento transversal) em cada um dos furos feitos previamente com diâmetros e espaçamentos iguais, houve também necessidade que os fios de aço zincado tivessem todo o mesmo comprimento de amarração, para que assim fosse garantido o confinamento transversal da alvenaria. (F.S.PINHO, 2007)



(a) - Refechamento de juntas (ALMEIDA *et al* 2011), (b) - Reboco armado (MAURÍCIO, 2012), (c) - injeção de calda em modelo de alvenaria de pedra irregular (APPLETON, 2003)

Figura 2.4 - Técnicas de reforço de alvenaria de pedra

## **2.6. Fios metálicos**

### **2.6.1. Tipo de aço utilizado**

Este tema de dissertação, baseia-se no estudo da durabilidade de fios metálicos livres e embebidos em argamassa de cal aérea, com adição de um componente pozolânico (metacaulino).

Optou-se pela utilização de um fio metálico muito utilizado na construção civil, este tipo de fio é de aço galvanizado pertencente à classe ferrítica, é um aço relativamente barato (pois tem uma percentagem bastante reduzida de níquel) sendo também conhecido pela sua resistência face a corrosão.

### **2.6.2. Produção de aço e ferro**

A grande maioria do ferro é extraído a partir dos minérios de ferro em altos-fornos, nestes altos-fornos existe um coque que funciona como um agente redutor dos óxidos de ferro, principalmente no  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , originando assim a gusa que contém na sua constituição 4% de carbono e outras impurezas.

A gusa do forno é depois transferida em estado líquido para um forno de produção de aço.

Os aços de carbono são ligas de ferro e de carbono que contém na sua constituição um teor de carbono de 1,2% (teor máximo), porém a maioria dos aços contém menos do que 0,5% de carbono na sua constituição, estes são produzidos por oxidação de carbono e de outras impurezas existentes na gusa, o que acontece até que os níveis requeridos de carbono sejam obtidos.

A oxidação por oxigénio é o processo mais utilizado na conversão de gusa em aço, ou seja, a produção de aço é feita num convertedor de oxidação por oxigénio.

Antes de se dar a reação de oxidação, são inseridos certas quantidades de fundentes à base de calcário (carbonato de cálcio), seguidamente o aço fundido sai do convertedor sendo posteriormente vazado continuamente ou então colocado em moldes estacionários. Depois de vazado, os lingotes são colocados num forno de poço, laminados a quente em brames, blumes ou biletas. A partir dos brames que são laminados a quente e a frio obtêm-se chapas de aço finas e grossas, a partir dos biletas, também estes laminados a quente e a frio obtêm-se barras e fios, por fim temos os blumes que são laminados a quente a frio dando origem a perfis em I e carris.

No nosso caso estamos a estudar um aço ferrítico, ou seja é um aço que apresenta um alto valor de ferrite ( $\alpha$ ) sendo o valor de  $\alpha$  que define a quantidade de ferrite encontrada no aço. (F.SMITH, 1998)

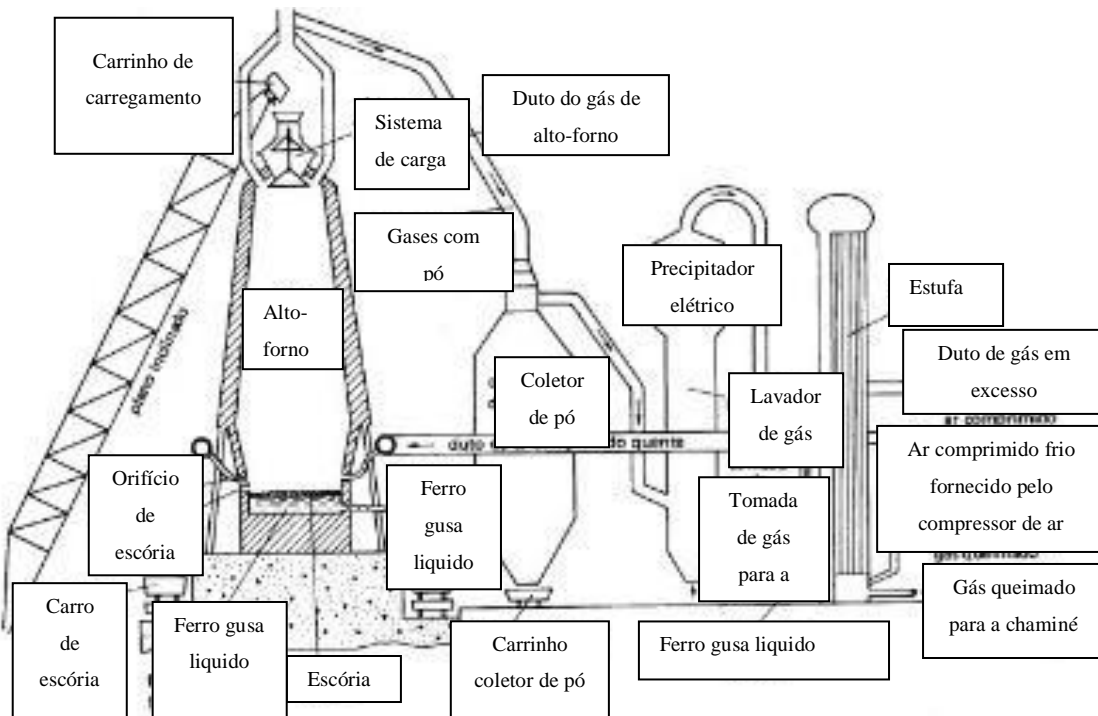


Figura 2.5- Esquema do fabrico de aço

### 2.6.3. Corrosão do ferro

Entende-se por corrosão segundo F. Smith como “deterioração de um material, resultante do ataque químico provocado pelo meio em que o material se encontra” (F.SMITH, 1998).

A velocidade de corrosão depende de vários fatores como: temperatura, concentração dos reagentes e dos produtos, esforços mecânicos e erosão. Muitas vezes a corrosão deve-se a ataques químicos aos metais que se dão devido a ações eletroquímicas, visto os materiais possuem elétrons livres.

Grande parte da corrosão que ocorre nos materiais está presente na natureza como estado combinado de óxidos, carbonatos, sulfuretos ou silicatos, quando estão neste estado as energias dos metais são maiores, havendo assim uma maior facilidade dos metais em reagir quimicamente e formarem compostos.

Um exemplo destes casos são os óxidos de ferro que com a ajuda de energia térmica podem ser reduzidos a ferro metálico (estes óxidos encontram-se com bastante facilidade na natureza), este tem tendência para regressar espontaneamente a óxido de ferro através da corrosão, formando-se assim a ferrugem.

Existem vários tipos de corrosão que poderão ser classificados a partir da aparência que o metal apresenta. Os tipos de corrosão existentes são: corrosão uniforme ou por ataque generalizado, corrosão galvânica ou de par bimetálico, corrosão por picadas, corrosão em fendas, corrosão inter-granular, corrosão sob tensão, corrosão com erosão, corrosão por desgaste, deterioração por cavitação, lixiviação seletiva. (F.SMITH, 1998)

No caso deste trabalho experimental a corrosão existente nos fios metálico poderá ser de dois tipos, corrosão uniforme que é caracterizada quando existe uma reação eletroquímica ou química que acontece ao longo da superfície do metal exposto ao ambiente corrosivo, ou então corrosão galvânica pois os fios metálicos são de aço galvanizado revestido a zinco (metal), que forma uma camada protetora protegendo o aço da corrosão.

#### 2.6.4. Proteção e controlo da corrosão em metais

Hoje em dia é muito raro comprar um metal sem que este esteja revestido com uma película protetora, a esta película protetora dá-se o nome de filme de óxido. O grau de proteção que este filme dá ao metal depende dos seguintes fatores: boa aderência entre o filme e o metal, boa plasticidade do filme a altas temperaturas, fraca condutividade e baixa tensão de vapor do filme. O filme de óxido deverá ter um ponto alto de fusão e por fim o seu coeficiente de expansão térmica deverá ser muito parecido ao do metal em questão. (F.SMITH, 1998)

Existem vários métodos que têm como objetivo controlar ou até mesmo evitar a corrosão dos metais, se depender do ponto de vista industrial os métodos aplicados baseiam-se apenas em obter a solução mais económica.

Na escolha do material convém consultar especialista em corrosão das firmas onde se compra o material, para que assim, se possa escolher o material mais adequado ao que se pretende, contudo existem algumas regras para que se escolha o material mais resistente à corrosão. (F.SMITH, 1998)

#### 2.6.5. Características do aço

Normalmente o aço usado para armaduras ordinárias é constituídos por fios de aço de secção circular ou malhas retangulares eletrosoldadas por varões. O aço tem as características representadas no Quadro 2.1, este aço apresenta um comportamento dúctil e em muito semelhante em compressão e em tração. (LÚCIO, 2009)

Quadro 2.1- Características do aço

Características do aço	
Peso específico	77 KN/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	$f_t \approx 420\text{MPa a } 600\text{MPa}$
Tensão de cedência em tração	$f_y \approx 400\text{MPa a } 600\text{MPa}$
Módulo de elasticidade	$E_s = 200 \text{ GPa}$

Os aços mais correntes no nosso país são aqueles que apresentam uma tensão de cedência ( $f_{yk}$ ) entre 400MPa e 500MPa e cujas características estão representadas no Quadro 2.2, onde LQ significa laminado a quente e EF endurecido a frio. É também possível observar na Figura 2.6 o gráfico de tensões/deformações, quando o aço é laminado a quente. Na Figura 2.7 encontra-se o gráfico de tensões/deformações quando o aço é endurecido a frio. A diferença entre os dois gráficos é que o aço endurecido a frio não apresenta patamar de cedência ao contrário do aço laminado a quente. (LÚCIO, 2009)

Quadro 2.2 - Características do aço em Portugal

Designação	Processo de fabrico do aço	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
A400NR	LQ	400	460
A500NR	LQ	500	550
A500ER	EF	500	550

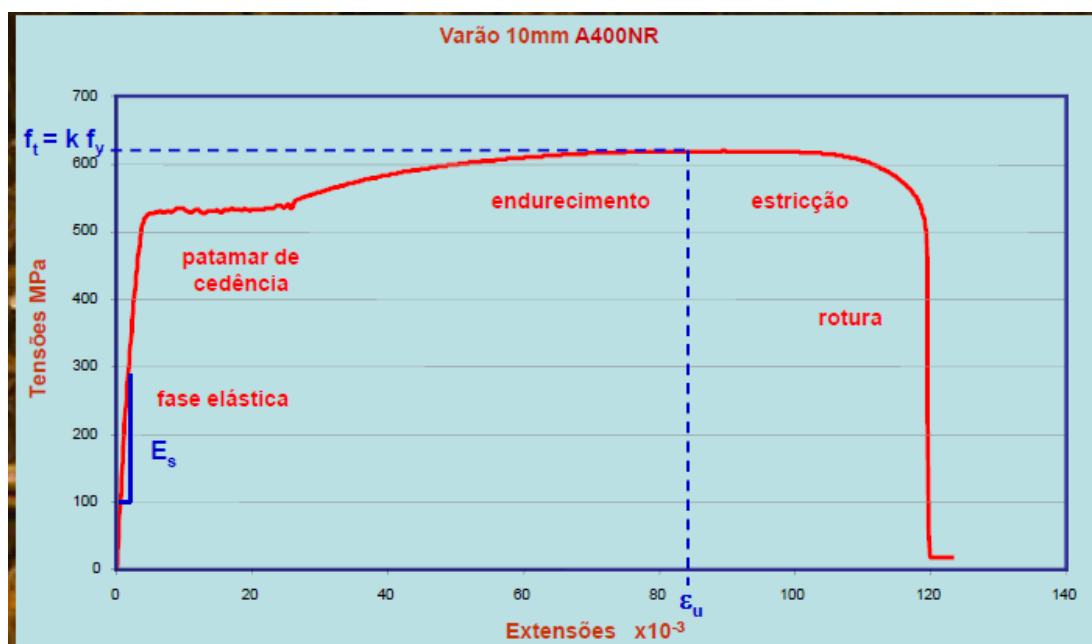


Figura 2.6 - Gráfico tensão deformação para aço LQ no ensaio de tração (LÚCIO, 2009)

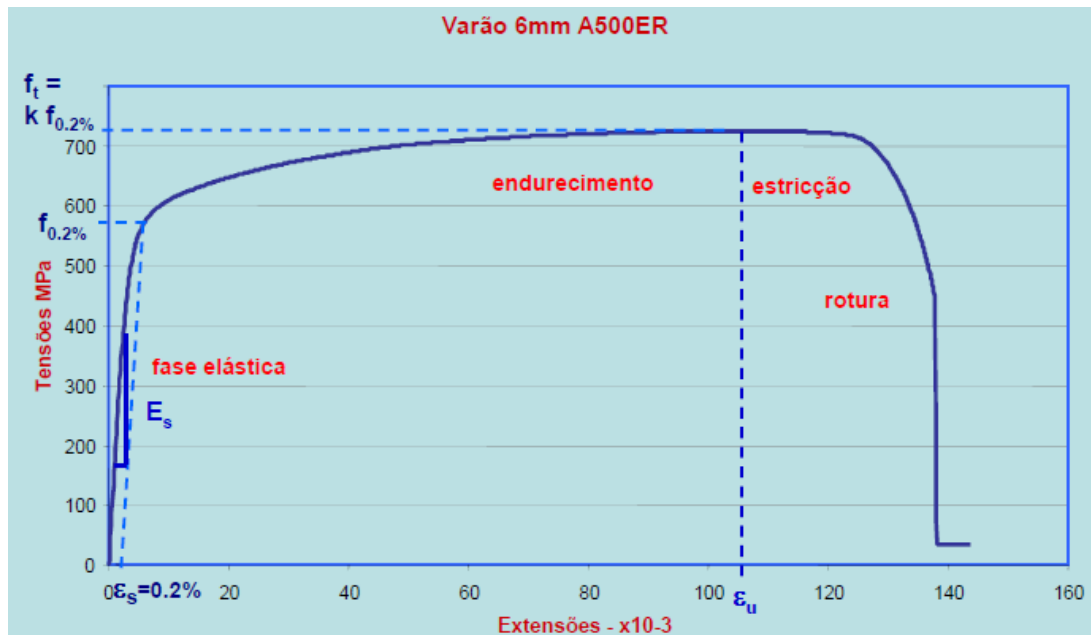


Figura 2.7 - Gráfico tensão deformação para aço EF no ensaio de tração (LÚCIO, 2009)

## 2.7. Matérias-primas da argamassa de cal aérea

### 2.7.1. Cal aérea

A cal aérea é obtida através da cozedura do óxido de cálcio que por sua vez dá origem ao óxido de cálcio. É um ligante resultante da decomposição dum rocha com cerca de 95% de carbonato de cálcio.

Na cal aérea o teor de impurezas é dividido consoante estas sejam gordas ou magras, as primeiras derivam de calcários quase puros com teores de carbonato maiores ou iguais a 99%, já as cal magras derivam de calcários com teores de argila e outras impurezas compreendidos entre 1% e 5%. As cal aéreas podem também ser divididas quanto ao teor de óxido de magnésio, sendo divididas em cal propriamente ditas e cal magnesianas (percentagens de magnésio superiores a 20%). (COUTINHO, 1997)

A cal viva é obtida através da cozedura de calcários designando-se por cal viva ou óxido de cálcio que por reação com a água, fornece a cal apagada.

A reação durante o fabrico é dada pela seguinte expressão:



Esta reação é verificada quando se atinge cerca de 894°C, temperatura à qual a pressão do dióxido de carbono que sai do calcário é superior à pressão atmosférica.

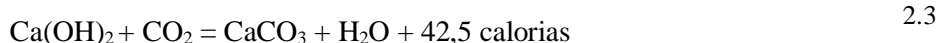
A cal viva antes de ser aplicada tem de ser extinta por imersão ou aspersão com água, produzindo-se assim uma reação exotérmica com expansão expressa através da seguinte expressão: (COUTINHO, 1997)



Esta reação leva à fragmentação do óxido de cálcio.

Quando o volume do total ocupado pela cal viva e pela água de hidratação diminui, dá-se a extinção da cal, mas observa-se um aumento no volume aparente, volume este que passa para cerca do dobro, libertando uma forte onda de calor, que pode conduzir a temperaturas superiores a 100°C. Quanto maior a temperatura de preparação mais difícil será a extinção da cal, feita por imersão, obtendo-se uma pasta. Após a aplicação da cal dá-se uma reação de carbonatação, combinando-se com o dióxido de carbono da atmosfera. (COUTINHO, 1997)

A reação é expressa pela seguinte expressão:



### 2.7.2. Agregados (areias)

Existem dois grupos de agregados, aqueles que são classificados como grossos e os outros que são as areias, citando Paulina Faria estas são “materiais granulados finos que são aglomerados por um ou mais ligantes, constituindo o esqueleto das argamassas”. (FARIA, 2004)

Os agregados mais comuns são as areias, sendo que as areias mais utilizadas nas argamassas são provenientes do leito dos rios. (RATO, 2006)

As areias poderão ser distinguidas essencialmente em 2 grupos: areias calcárias e areias silicosas, estas são as mais comuns, as calcárias têm origem nos desperdícios das pedreiras e britagem

Os agregados podem ser encontrados em grandes quantidades nas argamassas, pois fazem parte dos seus constituintes, influenciando a estrutura porosa do material quando endurece.

Dependendo do tipo de areia, a argamassa poderá conter variadas percentagens de argila, são os finos da argila que vão conferir uma maior trabalhabilidade e resistência à argamassa, tendo a desvantagem de poderem reduzir a ligação do agregado e do ligante, sendo necessário uma maior quantidade de água e aumentando assim a retração. (GRILO, 2013)

As areias são constituídas por partículas de várias formas e tamanhos, sendo que uma curva granulométrica otimizada será aquela que tiver mais tipos de agregados, havendo assim uma melhor distribuição e rearranjo dos mesmos pelos vazios das argamassas. Uma curva



granulométrica otimizada é também o que define uma argamassa, com boa trabalhabilidade, boa resistência mecânica e por fim boa compacidade. (FARIA, 2004; GRILO, 2013; RATO, 2006)

### **2.7.3. Componentes pozolânicos**

As pozolanas são materiais que tanto podem ser naturais como artificiais, de composição silico-aluminosa ou silicosa, têm uma superfície específica elevada. Na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio e são usadas para otimizar a durabilidade das argamassas e dos betões. As pozolanas naturais são de origem vulcânica, pois resultam da moagem de lavas vulcânicas meteorizadas, já as artificiais resultam de sub-produtos industriais. (FARIA, 2012)

Segundo a norma ASTM C125 a descrição de pozolana define-se por: “um material silicioso e aluminoso que só por si possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas que quando dividida em partículas finas e na presença de humidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a uma temperatura normal formando assim compostos que possuem propriedades cimentícias ” (C125)

#### **Metacaulino**

O metacaulino é obtido através da calcinação de cauliniticos, estes são sujeitos a temperaturas que rondam os 700°C a 800°C. Temperaturas inferiores a estas provocam a formação de uma fase vítrea, uma fase de cristalização e outras fases, já as temperaturas superiores às referidas anteriormente provocam a perda de hidroxilo.

O metacaulino tem uma reatividade muito elevada, já o processo de calcinação ocorre quando as se atinge temperaturas compreendidas entre os 600°C a 900°C.

No norte e no centro do país é possível obter o material para que o metacaulino possa ser fabricado.

Atualmente existe um crescente interesse científico no estudo desta pozolana, mais concretamente na sua utilização em argamassas e betões, o uso do metacaulino visa aumentar a resistência mecânica e reduzir a reação álcali-silica, é estimado que o sector industrial utilize cada vez mais o metacaulino, perante a perspectiva dos materiais pozolânicos tradicionais começarem a escassear.

A utilização de pozolanas em argamassas de cal aérea foi recentemente objeto de estudos e os resultados obtidos sugeriram que em quantidades apropriadas as pozolanas produzem um aumento na resistência mecânica da argamassa, aumentando também a sua durabilidade. Outra particularidade desta pozolana é a baixa suscetibilidade à abertura de fendas, limitando assim a absorção de água pelas paredes e aumentando a sua durabilidade. (VELOSA & VEIGA, 2007)

## **2.8. Argamassas**

### **2.8.1. Considerações iniciais**

As argamassas tiveram origem à 10000 anos atrás, sendo os primeiros indícios descobertos na localidade de Yftahél na Galileia (atualmente estado de Israel). A presença de cal e gesso nas construções foi também encontrada em Eynam, Jericó, sendo também encontrada no mesmo período na Turquia, gesso como reboco de paredes.

O fabrico de cal iniciou-se desde muito cedo, remonta aos tempos da antiguidade, tendo sido utilizada pelos chineses, etruscos, fenícios, egípcios, incas, gregos e romanos. A cal produzida designava-se por cal gorda e era utilizada como reboco pintado de cor natural e na consolidação de alvenarias.

Verificou-se também que nos tempos de Roma antiga surgiram as adições pozolânicas, antes do cozimento da cal, obtendo-se assim argamassas mais duradouras e com mais resistência, ou seja, a adição de materiais contendo silicatos reativos e aluminatos já remontam a tempos antigos.

Em pesquisas realizadas concluiu-se que, a cal era usada como ligante e que a cal aérea endurecia apenas pela ação do anidrido carbónico da atmosfera.

Tem vindo a tornar-se importante desde algum tempo formular e encontrar um tipo de argamassa que seja adequada para a conservação e restauro de edifícios de carácter histórico, um dos aspetos mais importante é garantir que essa argamassa terá uma durabilidade e resistências mecânicas compatíveis. (Alvarez *et al*, 2005)

Ao longo do tempo também se tem estudado a adição de materiais pozolânicos em argamassas de cal aérea, tendo como objetivo o melhoramento da resistência mecânica e da durabilidade da argamassa. As pozolanas estão associadas aos materiais que não têm por si só propriedades aglomerantes hidráulicas, sendo capazes de se combinar com hidróxido de cálcio quando está na presença de água e a temperatura ambiente, formando assim composto muito semelhantes aos que são originados na hidratação dos constituintes do cimento de Portland (óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, outros óxidos em pequenas quantidades).

É através do conhecimento dos compostos químicos obtidos através da reação pozolânica que necessitam de ser compatíveis com os materiais existentes nos edifícios históricos, que se poderá então obter uma argamassa com maior durabilidade e resistência mecânica. (FARIA, 2012)

### **2.8.2. Argamassas de cal aérea e metacaulino**

Para a reabilitação de edifícios a argamassa de cal aérea revelou ser aquela que apresenta características mais compatíveis com os rebocos originais

A adição de pozolanas em estudos realizados anteriormente, revelou não só aumentar a resistência à compressão, como também a resistência a tração por flexão.

As argamassas de cal aérea, têm um impacto ambiental baixo comparativamente às argamassas de cimento, este facto deve-se ao fabrico da cal que por si só implica um consumo de energia muito baixo e também devido a absorção de dióxido de carbono durante a carbonatação. (BRANCO, 2013).

## **2.9. Breve avaliação do comportamento dos principais materiais utilizados**

### **2.9.1. Fios metálicos**

Os fios metálicos utilizados são de um tipo de aço para construção com 95% de ferro, sendo uma das suas características principais a baixa percentagem de carbono.

Os componentes do aço são usados para a classificação do mesmo, estabelecendo as várias características dos fios metálicos.

O aço é composto por elementos de liga, nomeadamente:

- Carbono: confere resistência mecânica e dureza;
- Manganês : melhora a resistência mecânica;
- Níquel: oferece boa resistência à corrosão e melhora a resistência mecânica;
- Cobre: melhora a resistência à corrosão;
- Crómio: em concentrações elevadas melhora a resistência ao desgaste e em concentrações baixas melhora a resistência mecânica;
- Chumbo: melhora o acabamento;
- Boro: melhora a temperabilidade;
- Zircónio: aumenta a tenacidade;
- Selénio: torna mais fácil a maquinação;
- Silício: melhora a resistência mecânica e melhora a resistência à corrosão;
- Fósforo: aumenta a resistência e endurece;
- Enxofre: em percentagens superiores a 0,12% faz com que o material se torne mais frágil;
- Vanádio: confere características endurecedoras;
- Tungsténio: torna o material mais resistente ao desgaste;

O aço define-se então pela quantidade de materiais atrás referidos. (PACHECO, 2012)

#### **Resistência à tração**

O ensaio de resistência à tração é um ensaio muito utilizado devido às vantagens que confere em relação ao fornecimento de dados quantitativos das características mecânicas do aço,

tais como: resistências à tração, extensão na rotura, módulo de young e tensão de cedência. Este tipo de ensaio é muito utilizado na indústria dos componentes mecânicos.

O ensaio de resistência à tração consiste na aplicação de uma força de tração uniaxial crescente. À medida que vai decorrendo o ensaio vão-se registando os valores da força aplicada e o alongamento dos fios, até que estes atinjam a rotura. Os resultados são posteriormente apresentados num gráfico de tensões e extensões.

O aço que regista maior tensão de cedência é o aço mais duro, contudo em relação à extensão de rotura os valores não sejam assim tão diferentes. (LÚCIO, 2009)

### **2.9.2. Argamassa**

Quando é aplicada uma argamassa como reboco é crucial que esta tenha as características adequadas, torna-se assim muito importante o estudo da sua durabilidade e das ações mecânicas às quais é sujeita.

Os métodos utilizados tais como: resistências mecânicas, resistência aos sais solúveis (cloretos), são denominadas por ensaios destrutivos e de enorme importância na avaliação da argamassa.

No presente trabalho não se efetuou um estudo intensivo à argamassa, visto o objeto de estudo ser o fio metálico.

Neste contexto são também apresentados resultados de outros autores relativamente à avaliação do comportamento da argamassa utilizada, consultados a partir da bibliografia.

### **Módulo de elasticidade dinâmico**

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico baseia-se na determinação da frequência de ressonância longitudinal, sendo este determinado através de um equipamento próprio na emissão de vibrações.

As condições de ressonância segundo Paulina Faria estabelecem-se quando se obtêm amplitudes máximas. (FARIA, 2004)

### **Resistências mecânicas**

Quando se dá o processo de carbonatação em argamassas de cal aérea ocorre também um aumento de compacidade paralelamente ao envelhecimento, este processo provoca um aumento das resistências mecânicas da argamassa ao longo do tempo.

Quanto maior for a retração na argamassa maior será a tendência da mesma para fendilhar, tal como quociente entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração.

O mais aconselhável numa argamassa é que esta tenha um módulo de elasticidade e retração baixos. Quanto mais elevado for o quociente entre a resistência à tração e compressão,

mais dúctil será o comportamento da argamassa. Sendo assim é possível otimizar a resistência às tensões de tração criadas pela própria argamassa. (FARIA, 2004)

### **Resistência aos sais solúveis (cloretos)**

O ensaio de resistência aos sais solúveis serve para classificar o comportamento da argamassa face à ação dos sais existentes no suporte, caso o edifício em questão se situe em zonas marítimas, ou então em zonas muito poluídas.

A cristalização de sais nas argamassas provoca a deterioração da mesma, é um processo um pouco complexo que poderá ser produzido quando as tensões internas ultrapassam a resistência à tração do material. O processo de cristalização ocorre até que as tensões atinjam um determinado valor, valor este diretamente proporcional ao grau de saturação e inversamente proporcional à solubilidade do sal. (FARIA, 2004)

### **Absorção de água por capilaridade**

Define-se por capilaridade como a capacidade que o material tem em saturar-se em água devido a forças de sucção. Quanto mais finos forem os capilares do material, mais rápida e eficiente será o efeito de capilaridade.

A quantificação da quantidade de água absorvida é definida pelo valor assintótico da curva de capilaridade. Neste caso específico onde o material de estudo é uma argamassa de cal aérea foi considerado por (FARIA, 2004) citando Veiga que “nas argamassas com base em cal ocorre uma variação na estrutura interna do material quando ocorre o material e molhado, o que se vai refletir na absorção de água por capilaridade, sendo assim é importante que o ensaio de determinação de água por capilaridade seja feito após os provetes terem sido molhados previamente seguido este procedimento por um outro denominado por secagem”. (FARIA, 2004)

### **2.9.3. Resultados de outros autores**

Neste capítulo são também referidos alguns trabalhos de investigação sobre o comportamento de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino. Na apresentação de resultados, existiu a preocupação de referir valores de argamassas com o traço igual ao do presente trabalho, sendo que em alguns dos casos com diferentes dias de cura.

### **Fios metálicos**

O tipo de fios metálicos ensaiados no presente trabalho experimental, foram anteriormente utilizados no trabalho de investigação desenvolvido por Fernando Pinho (F.S.PINHO, 2007) em que o autor pretendeu determinar com vários ensaios experimentais a eficiência de várias soluções constituídas maioritariamente por reforço armado com e sem confinamento transversal.

## **Argamassa**

O objeto de estudo da presente dissertação é a durabilidade dos fios metálicos para construção, contudo, torna-se relevante o estudo do meio onde os mesmos se encontram embebidos, pois é um fator que afeta diretamente a durabilidade dos fios, protegendo-os das diferentes condições a que foram expostos.

Os vários autores referidos apresentaram todo o mesmo objeto de estudo, argamassa de cal aérea e metacaulino.

O trabalho de investigação realizado por Tiago Branco (BRANCO, 2013), intitulado “Evolução e Comparação das Características de Argamassas de Cal Área com adição de Metacaulino” teve como objetivo o estudo sobre argamassas de cal aérea com diferentes traços volumétricos, onde se substituiu a massa de cal aérea por metacaulino. O seu trabalho experimental consistiu em manter os provetes de argamassa em cura húmida, sujeitando os mesmos a vários ensaios de caracterização aos 28 e 90 dias (Quadro 2.3).

O autor verificou que o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias era muito maior do que aos 90 dias, provavelmente devido à reação pozolânica ocorrida durante este intervalo de tempo.

A adição de metacaulino nas argamassas de traço 1:3 (principalmente) revelou um ganho de deformabilidade dos 28 para os 90 dias concluindo assim, que o metacaulino permite obter melhores características mecânicas aos 28 dias da argamassa.

Em relação à absorção capilar, o autor observou que a adição de metacaulino fez aumentar significativamente o valor assintótico baixando em contrapartida o coeficiente de capilaridade, também verificou um aumento do índice de secagem aos 90 dias.

Para concluir registou que o aumento do teor de metacaulino provocou um aumento da  $P_{ab}$  das argamassas que tinham traço volumétrico mais fraco em ligante.

Quadro 2.3 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Tiago Branco (BRANCO, 2013)

Características		Idade [dias]		Argamassa	
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	28	90	Cal aérea e metacaulino	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	4251	1629		
	Resistência à compressão [MPa]	0,59	0,16		
		1,16	0,81		
<b>Físicas</b>	Absorção capilar	V.A[Kg/m <sup>2</sup> ]	23,1		26,8
		CC[Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	1,21		1,61
	Porosidade aberta [%]		32,8		35,7
	Secagem	IS	0,29		0,46
		TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	0,46		0,16

Na dissertação de Rodrigo Massena (MASSENA, 2011) intitulada “Avaliação da evolução das características de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural “ foi estudada a evolução de diferentes tipos de argamassa de cal aérea com e sem adição de metacaulino. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das curas nas argamassas recorrendo a técnicas de avaliação das características mecânicas das mesmas, para isso o autor realizou ensaios de caracterização das argamassas aos 28, 60 e 90 dias.

Uma das conclusões retiradas neste trabalho experimental em relação à substituição de massa de cal aérea por metacaulino nas argamassas foi que este aditivo pozzolânico aumentou ligeiramente as resistências mecânicas da argamassa.

Quadro 2.4 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Rodrigo Massena (MASSENA, 2011)

Características		Idade [dias]			Argamassa	
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	28	60	90	Cal aérea e metacaulino	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	402	1682	2156		
	Resistência à compressão [MPa]	0,23	-	0,03		
	Resistência à compressão [MPa]	0,30	0,14	0,17		
<b>Físicas</b>	Absorção capilar	V.A [Kg/m <sup>2</sup> ]	42,76	-		-
		CC[Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	3,68	-		-
	Porosidade aberta [%]	-	-	-		
	Secagem	IS	0,53	-		-
		TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	-	-		-

O autor André Bandeira (BANDEIRA, 2012) realizou um trabalho experimental onde caracterizou argamassas de cal aérea e de cal hidráulica com metacaulino, nesta dissertação foi estudada a influência da substituição parcial do ligante por metacaulino, em diferentes percentagens nas argamassas. Os ensaios de caracterização realizaram-se aos 28, 90 e 180 dias (cura húmida).

O autor registou uma melhoria das características mecânicas nas argamassas que continham metacaulino em substituição do ligante, estas mesmas melhorias decresciam com o avançar da idade. Verificou também que no ensaio de secagem, uma maior percentagem de metacaulino dificultava a secagem dos provetes.



Quadro 2.5 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por André Bandeira (BANDEIRA, 2012)

Características		Idade [dias]		Argamassa	
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	28	180	Cal aérea e metacaulino	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	2275	1360		
	Resistência à compressão [MPa]	0,17	0,17		
	Resistência à compressão [MPa]	0,30	0,53		
<b>Físicas</b>	Absorção capilar	V.A [Kg/m <sup>2</sup> ]	23,60		24,70
		CC[Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	4,67		2,59
	Porosidade aberta [%]		32,20		31,90
	Secagem	IS	0,20		0,12
		TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	0,09		0,10

Na dissertação de Nuno Felgueiras (FELGUEIRAS, 2011) estudou-se a evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferentes humidades relativas. Os ensaios de caracterização mecânica das argamassas foram realizados aos 28,60 e 90 dias.

Como finalização deste trabalho experimental o autor concluiu que o comportamento das resistências mecânicas das argamassas de cal aérea (traço 1:3) revelou ser desfavorável aquando da substituição de massa de cal por metacaulino.

Quadro 2.6 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Nuno Felgueiras (FELGUEIRAS, 2011)

Características		Idade [dias]			Argamassa	
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	28	60	90	Cal aérea e metacaulino	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1335	2035	1891		
	Resistência à compressão [MPa]	0,12	0,14	0,04		
	Resistência à compressão [MPa]	0,31	0,14	0,11		
<b>Físicas</b>	Absorção capilar	V.A [Kg/m <sup>2</sup> ]	44,69	-		40,57
		CC [Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	5,14	-		4,50
	Porosidade aberta [%]		34,00	26,00		26,00
	Secagem	IS	0,28	-		0,47
		TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	-	-		-

A autora Paulina Faria (FARIA, 2004) realizou um trabalho de investigação onde o objeto de estudo foram as argamassas de revestimento para alvenarias antigas, sendo o principal objetivo o estudo da influência dos ligantes e dos materiais que reagem diretamente nas características das distintas argamassas, para que posteriormente as mesmas fossem aplicadas em edifícios antigos.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.7

Quadro 2.7 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por Paulina Faria (FARIA, 2004)

Características		Idade [dias]			Argamassa	
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	60			Cal aérea e metacaulino	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1900				
	Resistência à compressão [MPa]	0,52				
	Resistência à compressão [MPa]	3,01				
<b>Físicas</b>	Absorção capilar	V.A [Kg/m <sup>2</sup> ]	24,40			
		CC [Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	0,24			
	Porosidade aberta [%]		35,00			
	Secagem	IS	-			
		TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	-			

**Nota:** O ensaio de absorção capilar realizado nos trabalhos experimentais referidos anteriormente, apresentou algumas diferenças na sua execução em relação à presente dissertação, a diferença consistiu no facto de os outros autores terem envolvido os provetes em película aderente de polietileno para impermeabilizar as faces laterais. No ensaio de porosidade aberta os provetes foram colocados dentro de uma meia de nylon e posteriormente dentro de água.



### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

#### 3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são descritos os procedimentos de ensaio, assim como os vários resultados de caracterização física, mecânica e química dos vários elementos que constituem este trabalho experimental.

Os ensaios realizados para a campanha experimental decorreram nos laboratórios do DEC-FCT/UNL e DCM-FCT/UNL.

No Quadro 3.1 apresentam-se registadas as siglas de cada um dos elementos ensaiados e o tipo de envelhecimento a que foram sujeitos.

Por fim neste capítulo encontram-se os resultados obtidos nos vários ensaios realizados.

Quadro 3.1 - Siglas dos elementos ensaiados

<b>Materiais</b>	<b>Tipo de envelhecimento</b>	<b>Sigla</b>
Fios metálicos sem envelhecimento	-	<b>FMR</b>
Fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a envelhecimento por cloretos	Câmara climática	<b>FMC-A</b>
Fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por cloretos		<b>FMC-L</b>
Fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino	Câmara de nevoeiro salino	<b>FMNS-A</b>
Fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por cloretos		<b>FMNS-L</b>

#### 3.2. Breve caracterização dos materiais utilizados

Para a realização dos ensaios da presente dissertação foram necessários os seguintes materiais:

- Fios metálicos ferríticos (12cm de comprimento);
- Ligante (Cal aérea);
- Componente pozolânico (metacaulino);
- Agregados (areia de rio e areia de areeiro) (agregado);

Na Figura 3.1, encontra-se um organograma para melhor compreensão dos ensaios de caracterização, a que cada um dos elementos constituintes deste trabalho experimental foi sujeito.

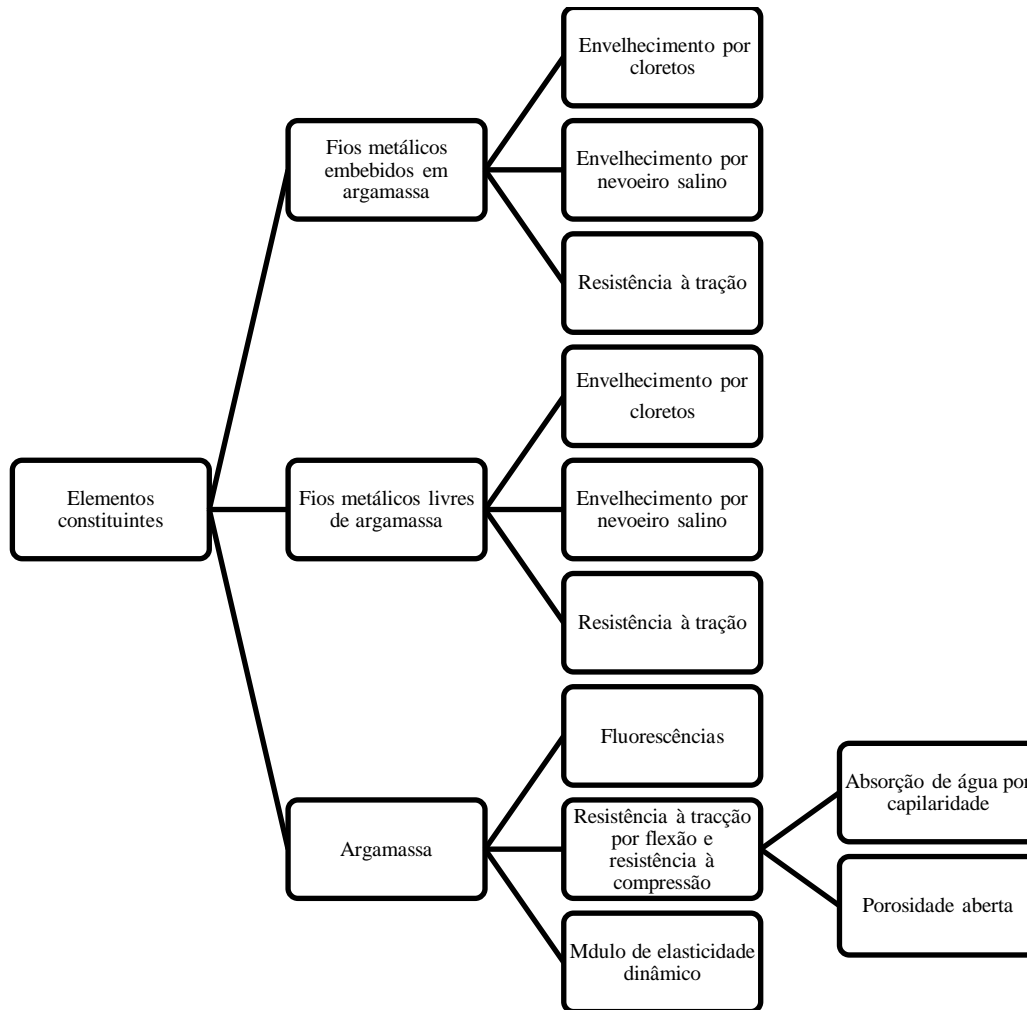


Figura 3.1- Elementos constituintes do trabalho experimental

### 3.2.1. Fios metálicos

Os fios metálicos livres e embebidos em argamassa utilizados na presente dissertação são do tipo ferrítico, sendo uma das suas principais características a resistência à corrosão.

Estes fios apresentam (segundo o ensaio de fluorescência representado no Quadro 3.10) na sua composição 0,1% de carbono (Ca), 4% de zinco (Zn) e 95% de ferro (Fe), a percentagem de níquel também é bastante reduzida, o que faz com que este tipo de aço tenha um preço bastante acessível. O ensaio de fluorescência realizou-se não só à parte exterior do fio, como também ao interior do mesmo, a partir desta análise foi possível observar que a quantidade de zinco existente no exterior do fio era mais elevada do que a existente no interior.

### 3.2.2. Agregados

Na preparação da argamassa foram utilizados dois tipos de areias, areia amarela e areia de rio, com granulometrias distintas.

Ambas as areias, em quantidades distintas foram misturadas para a preparação da argamassa e foi definido traço de 1:3 (ligante:agregado)

### 3.2.3. Ligante

Na preparação da argamassa foi utilizada cal aérea (ligante) da marca Lusical [Figura 3.2 (a)], as características gerais encontram-se referidas no capítulo 2, onde se encontra uma introdução geral a este tipo de ligante utilizado na presente dissertação

### 3.2.4. Pozolana

O componente pozolânico (A.P.210) utilizado na preparação das argamassas, foi metacaulino fornecido pela empresa Fradical.



(a) - Cal área (CA) usada na preparação da argamassa; (b) - Metacaulino (MK) fornecido pela empresa Fradical usado na preparação da argamassa

Figura 3.2 - Materiais utilizados na preparação da argamassa

Quadro 3.2 - Características físicas do metacaulino

Produto em pó de granulometria	
Material passado em 0,063 mm	≥70%
Material passado em 0,08 mm	≥80%
Material passado em 0,125 mm	≥95%
Massa volúmica	700 ± 100 Kg/m <sup>3</sup>
Massa volúmica (NF EN 1097-7): 2600±100 Kg/m <sup>3</sup>	2600 ±100 Kg/m <sup>3</sup>
Valor em Azul-de-metileno (NF EN 933-9)	<10 g/Kg
Superfície específica BET (NF ISSO 9277)	≥12 m <sup>2</sup> /g

Quadro 3.3 - Características químicas do metacaulino

Composição Química	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(entre 25% e 40%)
SiO <sub>2</sub>	(entre 60% e 70%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O	Quantidade irrelevante
Sulfatos (NF EN 1744-1) ASO <sub>2</sub>	<0,01%
Enxofre total (NF EN 1744-1) S	<0,02%
Alcalis equivalentes	<0,01%

### 3.3. Corte dos fios metálicos

Antes da execução dos provetes foi necessário cortar os fios metálicos com determinada dimensão, para que os mesmos pudessem ser inseridos dentro dos moldes (Figura 3.3).

Para que os fios se mantivessem imóveis dentro dos provetes recorreu-se a espaçadores de betão, cortados de maneira específica para que não ocupassem muito espaço dentro do molde.

Depois de cortados os fios metálicos, foram limadas as pontas de maneira a que ficassem lisas.





Figura 3.3 – Corte dos fios metálicos utilizados na preparação dos provetes

### Equipamento

- Fios metálicos;
- Rebarbadora;
- Lixa;
- Torno;

### Procedimento experimental:

- Preparou-se a rebarbadora;
- Colocaram-se luvas e óculos de proteção;
- Prenderam-se os fios a um torno;
- Cortaram-se os fios com a ajuda da rebarbadora;
- Limaram-se as pontas dos fios metálicos;

## 3.4. Ensaio de caracterização física dos constituintes da argamassa

### 3.4.1. Análise granulométrica das areias

A análise granulométrica foi feita às duas areias, utilizadas na preparação da argamassa, a determinação da granulometria das mesmas baseou-se na norma NP EN 933-1:2000 (IPQ, 2000).

A granulometria de uma material consiste em, definir para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho dos grãos a percentagem em peso que cada fração possui relativamente à massa total da amostra, através de um processo de peneiração obtém-se a granulometria. A partir desta retira-se a curva granulométrica dos agregados, a sua máxima e mínima dimensão e por fim o módulo de finura, que se obtém somando as percentagens totais retidas em cada peneiro

da série. Ao fazer-se o acumulado da massa dos agregados em cada peneiro obtém-se a curva granulométrica de cada agregado.

Este ensaio foi realizado fazendo passar o agregado através de um agitador mecânico contendo uma série de peneiros da série principal ASTM, estando ordenados da malha mais larga à malha mais apertada, sendo o material retido pesado em cada peneiro.

A série principal de peneiros ASTM inicia-se no peneiro cuja abertura da malha é de 0,075mm continuando em progressão geométrica de razão 2, até à máxima dimensão do agregado. (COUTINHO, 1997)

#### **Equipamento:**

- Estufa ventilada;
- Balança de precisão 0,001g;
- Agitador mecânico de peneiros;
- Peneiros ASTM com aberturas de malha quadrada de 19,1mm (3/4”), 12,7mm (1/2”), 9,51mm (3/8”), 4,76mm (n.º4), 2,38 (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100), 0,075mm (n.º200);

#### **Procedimento experimental:**

- Secaram-se as areias na estufa ventilada a  $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$  até atingir massa constante;
- Esquartelou-se as areias para obtenção das amostras representativas das areias;
- Peneirou-se previamente duas amostras de areias através do peneiro n.º4;
- Colocou-se a amostra da areia, com 1000g de massa, no interior do peneiro superior do agrupamento de peneiros, dispostos de modo que a abertura das malhas diminuísse de cima para baixo;
- Colocou-se o conjunto de peneiros no agitador mecânico de peneiros, incluindo o peneiro de fundo (refugo);
- Calculou-se o módulo de finura, a máxima e a mínima dimensão do agregado e desenhou-se a curva granulométrica;

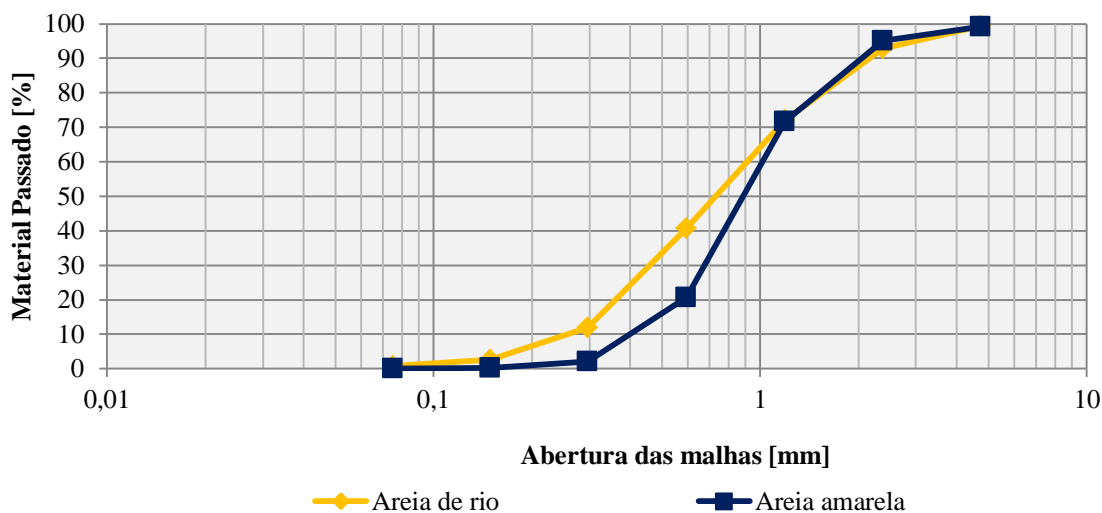


Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados

Quadro 3.4 - Características das areias (areia amarela e areia de rio)

Material	Módulo de finura	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]
Areia amarela	2,805	2,380	0,149
Areia de rio	3,108	2,380	0,149

### 3.4.2. Baridade das areias

A baridade das areias consiste na determinação do material seco, ou seja, é a massa por unidade de volume aparente na qual está incluída a quantidade de vazios dentro das partículas das areias e o recipiente onde está a mesma está contida. A baridade é determinada a partir da norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, NP EN 1097-3, 2002,b)

A baridade de uma material varia consoante o modo como as partículas estão arrançadas dentro do recipiente, da sua forma, da humidade e por fim do seu grau de compactação. Será tanto maior quanto mais espaços vazios forem preenchidos, ou seja, se o material apresentar partículas de dimensões bastante variadas, a sua baridade será maior do que um material cujas partículas tenham todas o mesmo tamanho, pois assim não preencherão todos os vazios existentes (Figura 3.5).

#### Equipamento:

- Balança de precisão de 0,001g;
- Funil de plástico;
- Régua metálica;
- Suporte de altura regulável;
- Recipiente metálico cilíndrico;

### Procedimento experimental:

- Pesou-se o recipiente metálico vazio e limpo;
- Colocou-se o funil a uma distância entre o seu aro superior e bordo inferior do funil de 50mm para garantir que a altura da queda dos materiais fosse variável, garantindo uma igual compactação;
- Colocou-se o material (agregados ou ligante) no recipiente através do funil;
- Removeu-se o material excedente com uma régua metálica;
- Pesou-se o material na balança, tendo-se inicialmente registado a sua tara;
- Determinou-se a baridade do material a partir de 3.1

$$Ba = \frac{(m_3 - m_0)}{V} \quad 3.1$$

Em que:

- $Ba [g/cm^3]$ : baridade
- $m_0 [g]$ : massa do recipiente
- $m_3 [g]$ : massa do recipiente com o material
- $V [cm^3]$ : volume do recipiente;



Figura 3.5 - Determinação da baridade

No Quadro 3.5 encontra-se o resultado da baridade dos materiais utilizados no ensaio, para cada tipo de material efetuaram-se três pesagens, calculando-se a média dos três valores a partir da qual se obtém a baridade final.

Quadro 3.5 - Baridade dos materiais constituintes da argamassa

Baridade dos materiais (g/cm <sup>3</sup> )	
Areia de rio	1,476
Areia de areeiro	1,338
Cal aérea	0,397
Metacaulino	0,775

### 3.5. Preparação das argamassas

Para esta campanha experimental produziu-se apenas um tipo de argamassa, com traço volumétrico 1:3 (definido pelo orientador do presente trabalho).

Utilizou-se areia de rio, areia amarela e cal aérea, à qual se adicionou 20% de metacaulino (MK) à massa de cal aérea.

Para a preparação da argamassa foram utilizados 750ml de água. No Quadro 3.6 encontram-se as quantidades de materiais utilizados para a preparação da mesma.

Quadro 3.6 - Quantidade dos materiais utilizados para a preparação da argamassa

	Quantidade dos materiais utilizados (g)	Quantidade de água utilizada (ml)
Areia de rio	1,771	750
Areia de areeiro	1,606	750
Cal aérea	0,317	750
Metacaulino	0,186	750

#### 3.5.1. Amassaduras

A preparação das amassaduras (Figura 3.6) foi executada de acordo com a ficha de ensaio número 19, Fe19 (FCT/UNL, 1996), considerou-se para este trabalho experimental um espalhamento de 75%.

Posteriormente apresentam-se o material utilizado e o procedimento experimental seguido na realização das amassaduras.

#### Equipamento:

- Espátula de metal;
- Tabuleiro;
- Misturador mecânico de argamassas;

- Balança de precisão 0,001g;
- Proveta graduada;
- Cronómetro;

**Procedimento experimental:**

- Pesaram-se todos os constituintes da argamassa;
- Homogeneizou-se manualmente os constituintes secos e colocaram-se os mesmos na cuba;
- Mediu-se a quantidade de água necessária para adicionar à mistura, através de uma proveta graduada;
- Ligou-se o misturador mecânico (contando o tempo em 45s) e adicionou-se simultaneamente a quantidade de água determinada no ensaio de espalhamento;
- Parou-se o misturador e mecânico e procedeu-se à limpeza dos bordos da cuba durante um intervalo de 30s
- Procedeu-se a mais uma amassadura mecânica durante 60s;



(a) - Mistura manual dos vários materiais; (b) - misturador mecânico

Figura 3.6 - Preparação das argamassas

### 3.5.2. Ensaio de espalhamento

Depois de concluída a amassadura estando a argamassa em estado fresco, avaliou-se o impacto da água na sua trabalhabilidade, esta avaliação é feita através do ensaio de consistência por espalhamento da argamassa (Figura 3.7).

Este ensaio realizou-se com base na norma EN 1015-3:1999, não se encontrando atualizada aos seus aditamentos (A1:2004/A2:2006) (CEN, 1999/2004/2006).

O valor da consistência por espalhamento é dado pela fluidez da argamassa fresca, fornecendo informação sobre a deformabilidade da argamassa em estudo, quando esta é submetida a um tipo de tensão. (FARIA, 2004)

Neste ensaio houve necessidade de humedecer os utensílios utilizados, colocando-se seguidamente a argamassa no cone de espalhamento, em duas camadas compactadas individualmente.



(a) - Molde tronco cônico; (b) - argamassa no molde; (c) - 15 pancadas nas camadas existentes  
 Figura 3.7 - Sequência do ensaio de consistência por espalhamento

**Equipamento:**

- Mesa de consistência;
- Craveira analógica;
- Molde tronco cônico;
- Régua metálica;
- Varão metálico de compactação com 15mm de diâmetro;

**Procedimento experimental:**

- Verificou-se se o material se encontrava seco e limpo;
- Colocou-se o molde no centro da mesa de consistência;
- Encheu-se o molde em duas camadas muito semelhantes;
- Compactou-se com o varão dando 20 pancadas em cada camada, mantendo o molde fixo em cima da mesa de consistência;
- Nivelou-se a superfície, retirando-se o molde cuidadosamente;
- Rodou-se a manivela provocando 15 pancadas em 15s;
- Mediu-se com a craveira de acordo com os quatro diâmetros gravados no tampo da mesa, do afastamento entre dois pontos de intersecção de cada um deles com o contorno da argamassa, posteriormente ao espalhamento provocado pelas 15 pancadas;
- Calculou-se a média das quatro medições;



### 3.6. Execução dos provetes

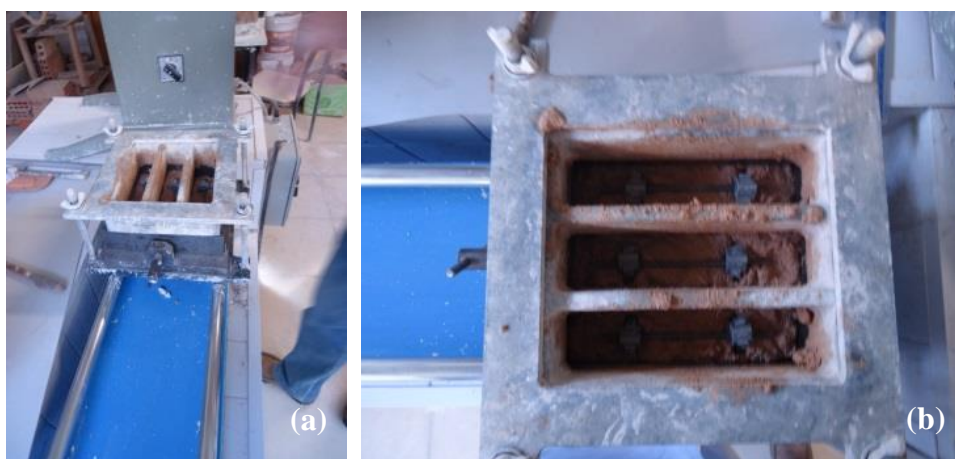
Posteriormente ao ensaio de consistência por espalhamento, iniciou-se a moldagem dos provetes com forma prismática de dimensões 40×40×160 (mm), os moldes utilizados foram moldes metálicos (Figura 3.8).

#### Equipamento:

- Compactador mecânico;
- Moldes prismáticos 40×40×160 (mm);

#### Procedimento experimental:

- Colocou-se o molde fixo na mesa do compactador mecânico;
- Encheu-se o molde em duas camadas de alturas sensivelmente iguais
- Compactou-se cada camada em vinte pancadas;
- Introduziu-se os fios metálicos (já com os espaçadores) dentro da argamassa;
- Removeu-se o excesso de argamassa;



(a) - Compactação de cada camada; (b) - Introdução dos fios no interior do molde

Figura 3.8 - Sequência da execução dos provetes

No total foram moldados 39 provetes, 30 armados (com fio metálico no interior) e 9 simples (sem fio metálico no interior), após a moldagem, colocaram-se os mesmos numa sala de ambiente condicionado cobertos com sacos de plástico.

Após um período de 7 dias desmoldaram-se os provetes e colocaram-se os mesmos em cura húmida do DEC-FCT/UNL durante 60 dias. Esta cura apresenta condições de humidade elevada ( $HR > 95\%$ ), as condições tiveram de ser mantidas a uma temperatura (T) de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  e a uma humidade relativa (HR) de  $95 \pm 5\%$ . A cura húmida consiste numa grelha onde estão



colocados os provetes, por baixo desta grelha existe uma cuba com água, os provetes tiveram de ser cobertos com um plástico de polietileno (Figura 3.9)



Figura 3.9 - Provetes colocados em cura húmida

### **3.7. Caracterização dos fios metálicos**

#### **3.7.1. Organização dos ensaios**

Os ensaios de caracterização dos fios metálicos realizaram-se para dois tipos de situações diferentes, fios metálicos embebidos em argamassa e fios metálicos livres de argamassa.

Os primeiros ensaios (zero dias) de tração realizaram-se 24 horas após os primeiros provetes terem sido retirados da cura húmida.

Antes da realização dos ensaios de tração, houve necessidade de partir os provetes de argamassa nos quais os fios estavam embebidos.

Os restantes ensaios aos fios metálicos foram realizados após estes terem sido sujeitos a envelhecimento artificial, por cloretos e nevoeiro salino.

O envelhecimento por cloretos consiste em colocar o material dentro de uma solução de cloretos durante 24 horas, sendo posteriormente colocado dentro de uma câmara climática, neste caso, programada para ter uma temperatura constante de 23°C e ciclos de humidade a variar entre os 30 e 90%.

O envelhecimento por câmara de nevoeiro salino consiste em colocar o material numa câmara de nevoeiro salino programada para ter uma temperatura constante de 40°C com ciclos de vaporização e secagem, cada um deles com a duração de 6 e 18 horas respetivamente.

No total foram colocados 22 fios metálicos embebidos em argamassa e 16 fios metálicos livres em ambas as câmaras.

O Quadro 3.7 representa os tipos de fio e os respetivos dias de ensaio.

Quadro 3.7 - Tipos de fio metálico e dias de ensaio respectivos

Tempo [dias]	Fio metálico
0D	FMR
	FMC-A
30D	FMC-L
	FMNS-A
	FMNS-L
60D	FMC-A
	FMC-L
	FMNS-A
	FMNS-L
90D	FMC-A
	FMC-L
	FMNS-A
120D	FMNS-L
	FMNS-A
	FMNS-L

### 3.7.2. Resistência à tração

Este ensaio tem como objetivo a avaliação da resistência dos fios metálicos livres e embebidos em argamassa. Para tal foi realizado o ensaio de resistência à tração aos fios, expostos a quatro condições diferentes:

- Fios de referência (0 dias), ou seja, fios sem envelhecimento (FMR);
- Fios embebidos em argamassa sujeitos a envelhecimento por cloretos (FMC-A);
- Fios livres de argamassa sujeitos a envelhecimento por cloretos (FMC-L);
- Fios embebidos em argamassa sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino (FMNS-A)
- Fios livres de argamassa sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino (FMNS-L);

#### Envelhecimento por nevoeiro salino

O envelhecimento por nevoeiro salino, iniciou-se após os fios metálicos embebidos em argamassa terem sido retirados da cura húmida. Este tipo de envelhecimento é feito através de uma solução com 5% de cloreto de sódio, sendo os provetes no interior da câmara (Figura 3.10) sujeitos a ciclos de vaporização e secagem (6 horas de spray e 18 horas de secagem).



Figura 3.10 - Câmara de nevoeiro salino

### **Envelhecimento por solução de cloretos**

O envelhecimento por solução de cloretos consistiu em colocar os fios metálicos e os provetes dentro de uma solução de cloreto de sódio, na qual permaneceram 24 horas submersos, sendo colocados posteriormente numa câmara climática (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Câmara climática

### **Procedimento do ensaio tração aos fios metálicos:**

#### **Ensaio aos 0 dias:**

O primeiro ensaio realizou-se aos 0 dias, foram ensaiados os fios metálicos (sem qualquer tipo de envelhecimento) na ZWICK Z050 (Figura 3.12).

Na Figura 3.13 podemos observar o gráfico tensão-deformação obtido a partir da média dos três fios ensaiados.



Figura 3.12 - Ensaio de tração aos fios metálicos

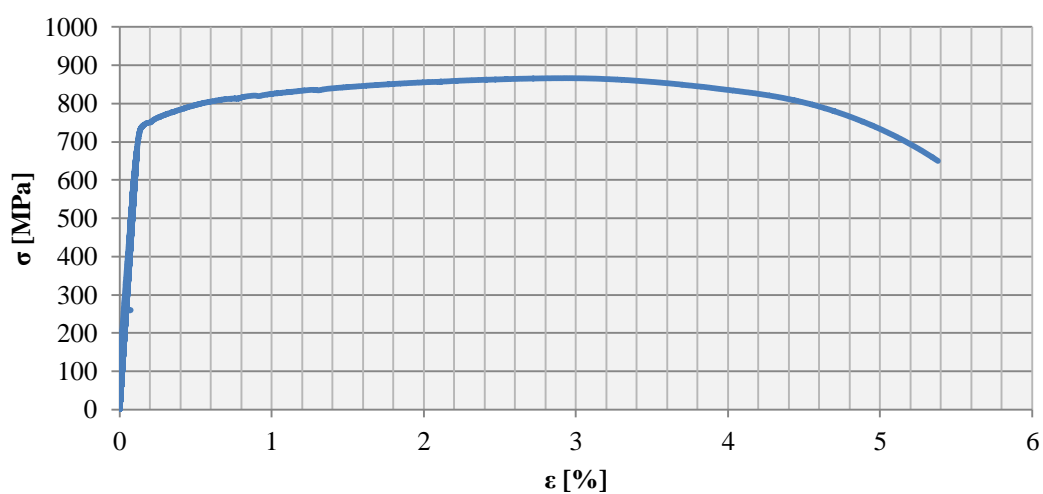


Figura 3.13 - Gráfico tensão-deformação média aos 0 dias <sup>1</sup>

### Ensaio 30 dias

Aos 30 dias ensaiaram-se à tração os fios sujeitos a envelhecimento por cloretos e nevoeiro salino, para isso, houve necessidade de partir os provetes para que os mesmos pudessem ser retirados (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Remoção dos fios metálicos da argamassa

<sup>1</sup> Para o ensaio de tração aos fios metálicos de referência, ao contrário dos ensaios de tração dos 30, 60,90 e 120 dias, foram utilizados fios com 20cm de comprimento, sendo também utilizado um extensômetro na realização do ensaio.

Na Figura 3.15 é possível observar a média obtida aos 30 dias do gráfico tensão-deformação. Neste gráfico estão presentes os seguintes elementos: FMC-A, FMC-L, FMNS-A, FMNS-L.

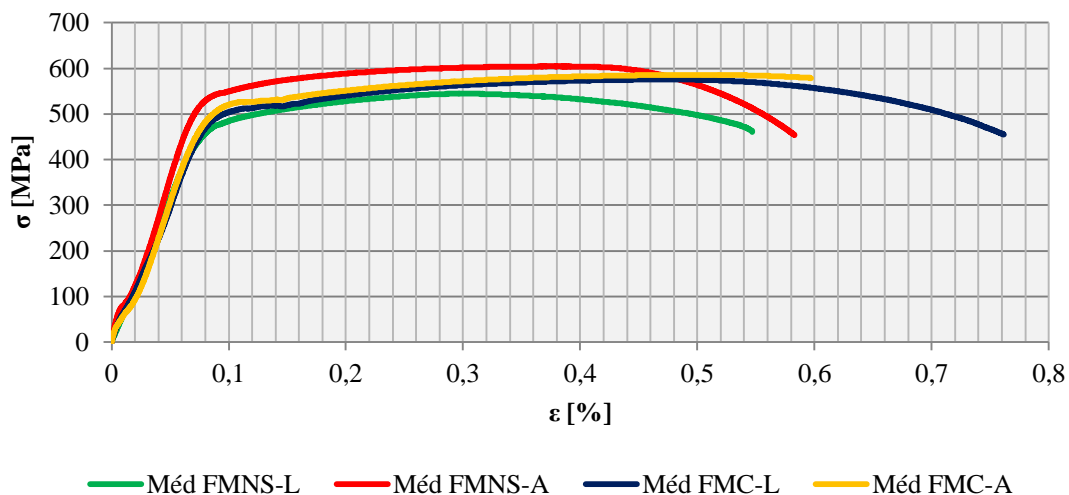


Figura 3.15 – Gráfico tensão deformação média aos 30 dias

#### Ensaio aos 60 dias

Na Figura 3.16 observa-se o gráfico tensão-deformação obtido pela média dos fios metálicos, de acordo com os vários tipos de envelhecimento aos 60 dias.

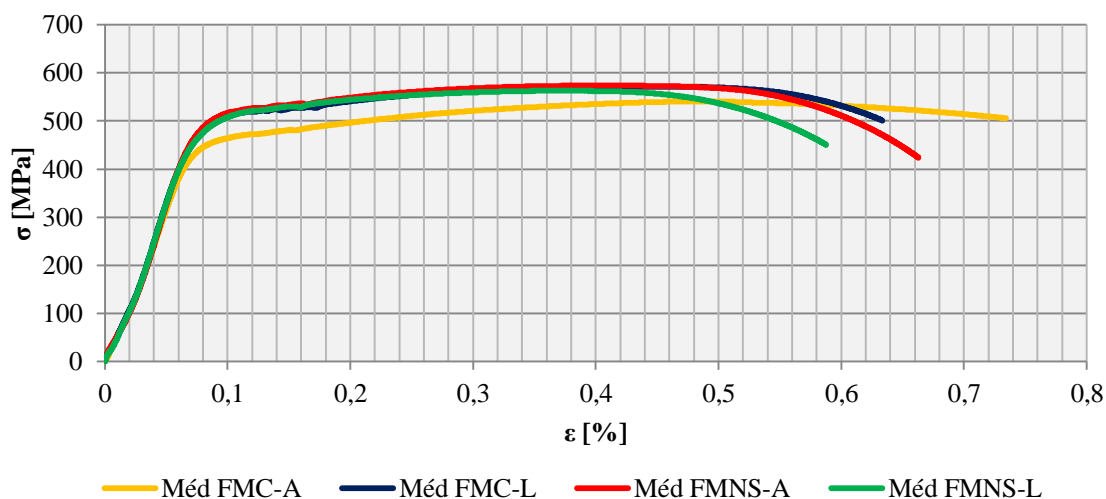


Figura 3.16 - Gráfico tensão deformação média aos 60 dias

### Ensaio aos 90 dias

Aos 90 dias foi obtido o seguinte gráfico tensão deformação, o qual se pode observar na Figura 3.17, para os diferentes tipos de envelhecimento aos quais os fios foram expostos.

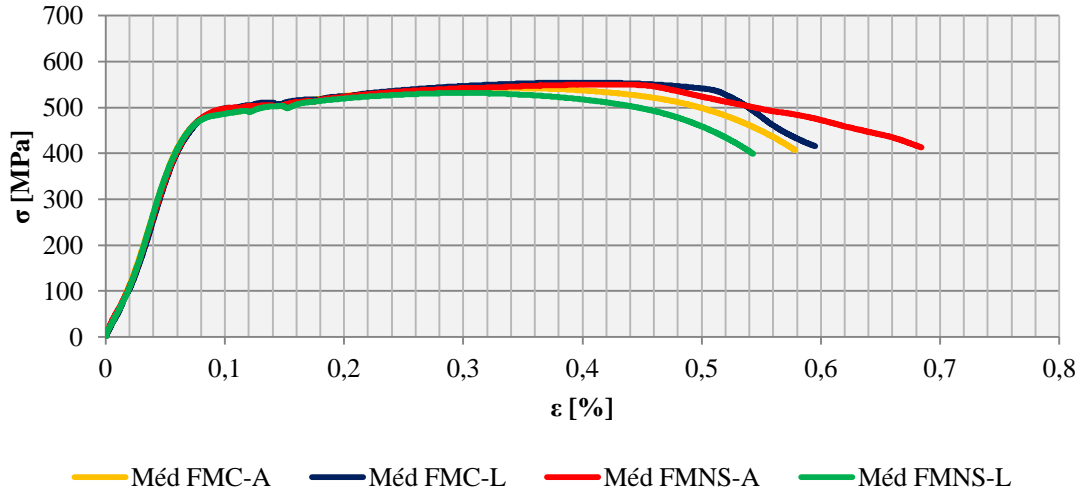


Figura 3.17 - Gráfico tensão deformação média 90 dias

### Ensaio aos 120 dias

Aos 120 dias apenas foi possível avaliar os fios sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino, devido a problemas técnicos da câmara climática utilizada <sup>2</sup>. Na Figura 3.18 podemos observar o gráfico tensão deformação obtidos pelos fios no ensaio à tração.

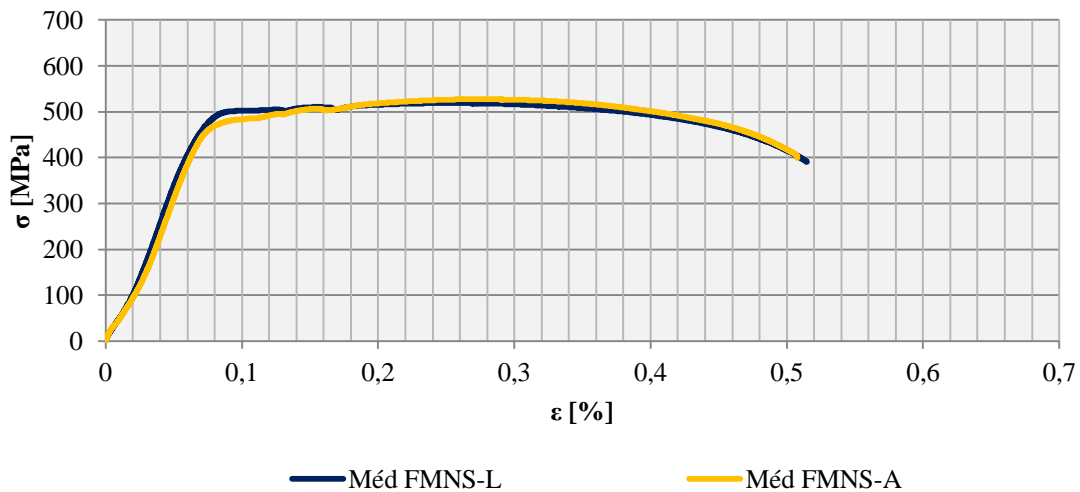


Figura 3.18 - Gráfico tensão deformação média aos 120 dias

<sup>2</sup> Os problemas técnicos ocorridos na câmara climática, deveram-se a um descontrolo na transição de ciclos e ao aumento de temperatura e humidade relativa.

### Secção resistente dos fios metálicos

A secção dos fios metálicos calculou-se a partir da força máxima de rotura dos fios metálicos de referência e dos fios metálicos oxidados, Figura 3.19.

A partir de 3.2 verifica-se o cálculo da perda de secção.

$$\frac{F_{ref}}{A_{ref}} = \frac{F_{fm}}{A_{fm}} \quad 3.2$$

Em que:

- $F_{ref}$  [N]: Força máxima de rotura dos fios metálicos de referência;
- $A_{ref}$  [mm<sup>2</sup>]: Área da secção dos fios metálicos de referência;
- $F_{fm}$  [N]: Força máxima de rotura do fio metálico sujeito a envelhecimento artificial;
- $A_{fm}$  [mm<sup>2</sup>]: Área da secção do fio metálico sujeito a envelhecimento artificial;

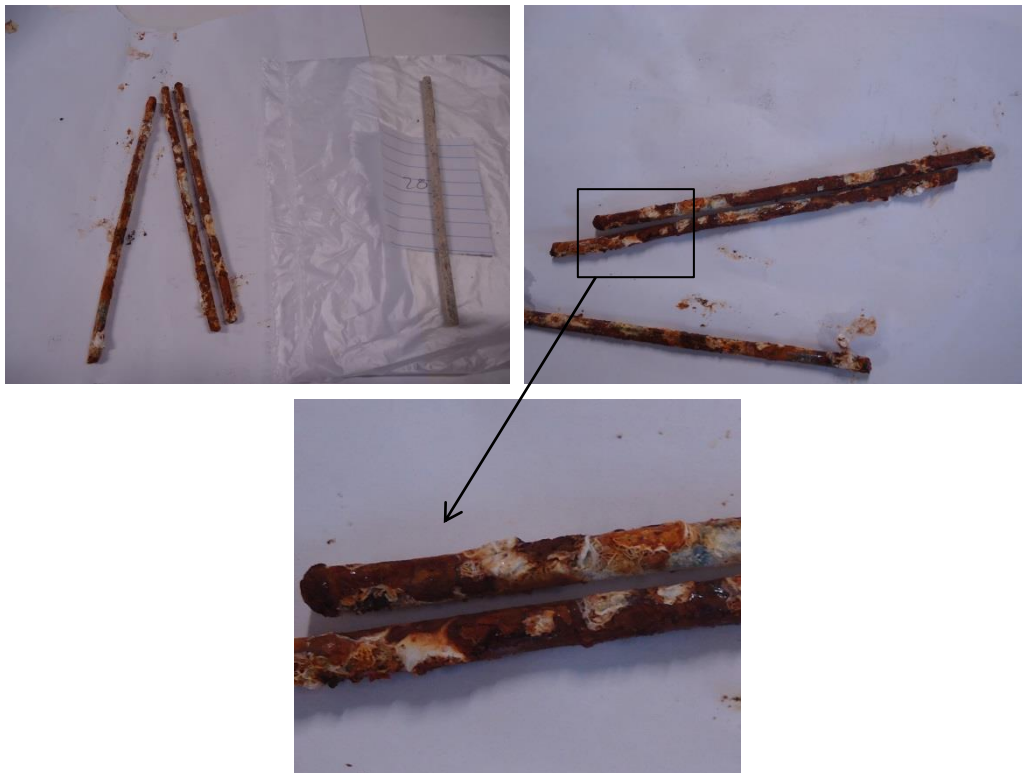


Figura 3.19 – Fios metálicos oxidados posteriormente a serem sujeitos a envelhecimento artificial

A partir da Figura 3.20 observam-se as forças máximas dos fios metálicos de referência obtidas no ensaio de tração que posteriormente são usadas no cálculo da perda de secção dos fios metálicos ensaiados.



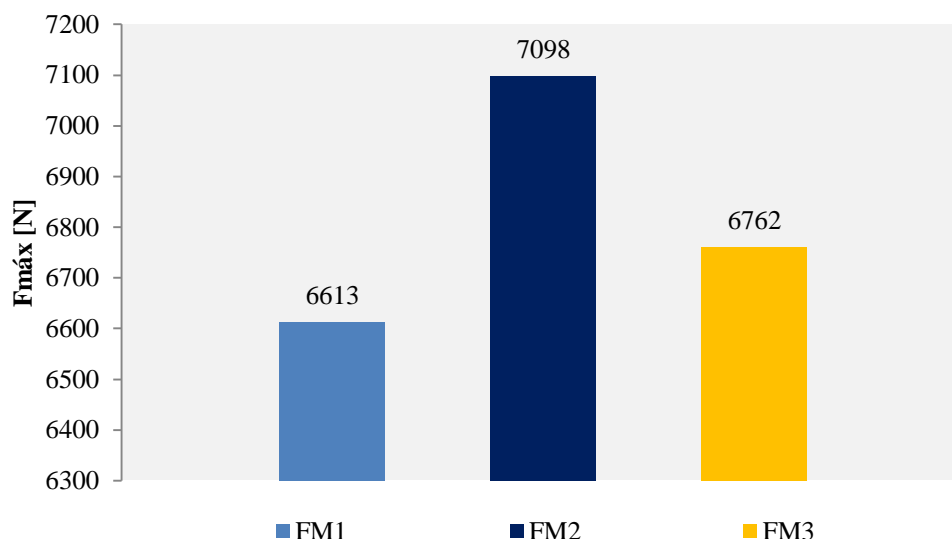


Figura 3.20 - Força máxima de rotura aos fios metálicos de referência

No Quadro 3.8 encontram-se representados as siglas correspondentes aos fios metálicos sujeitos a envelhecimento, com as respetivas forças máximas de rotura, perda de secção e secção resistente.

Quadro 3.8 – Força máxima, perda de secção e secção resistentes dos fios metálicos sujeitos a arrefecimento

Dias	Tipo de envelhecimento	$F_{máx}$ [N]	Perda de secção [%]	Secção resistente [%]
30D	FMC-A	6590	2,35%	97,65%
	FMC-L	6570	2,65%	97,35%
	FMNS-A	6680	0,97%	99,03%
	FMNS-L	6365	5,96%	94,04%
60D	FMC-A	6209	8,63%	91,37%
	FMC-L	6212	8,57%	91,43%
	FMNS-A	6233	8,20%	91,80%
	FMNS-L	6117	10,25%	89,75%
90D	FMC-A	5897	14,37%	85,63%
	FMC-L	6027	11,90%	88,10%
	FMNS-A	5981	12,76%	87,24%
	FMNS-L	5781	16,66%	83,34%
120D	FMNS-A	5732	17,67%	82,33%
	FMNS-L	5641	19,56%	80,44%



A Figura 3.21 representa a secção média resistente dos fios metálicos e respetivas forças máximas ao longo do envelhecimento artificial.

Observa-se que os fios metálicos com menor secção resistente são aqueles que se encontram livres em argamassa sujeitos a envelhecimento por ataque de nevoeiro salino, sendo estes também que verificam uma menor força de rotura ao longo do processo de envelhecimento. Quanto maior a força de rotura menor é a perda de secção dos fios metálicos.

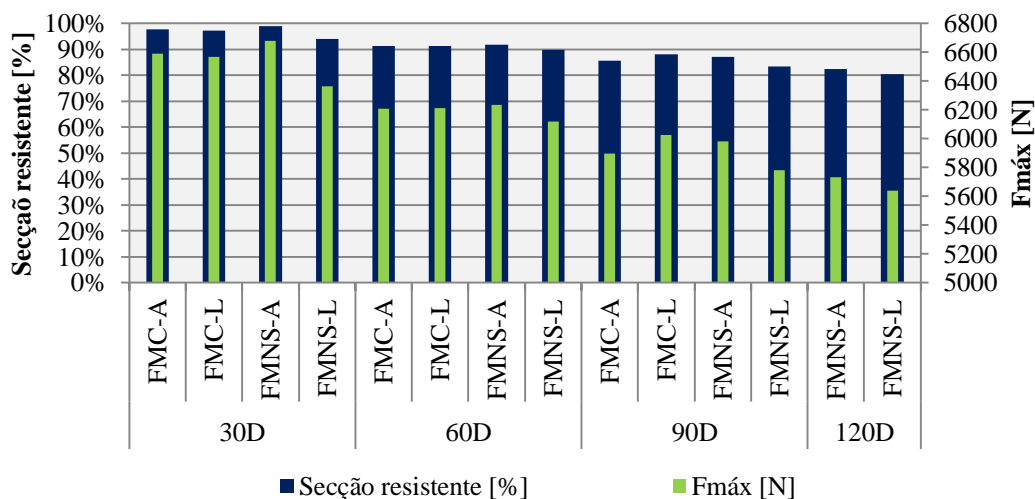


Figura 3.21 – Secção média resistente e respetiva força máxima ao longo do envelhecimento

No Quadro 3.9 observa-se as secções dos fios metálicos após sujeitos a envelhecimento artificial. Os fios metálicos livres são aqueles que mais secção perderam, com exceção dos fios metálicos livres envelhecidos por ataque de cloretos.

Quadro 3.9 – Fios metálicos com respetivas secções ao longo do processo de envelhecimento

Dias	Secção FMR [mm <sup>2</sup> ]	Secção FMC-A [mm <sup>2</sup> ]	Secção FMC-L [mm <sup>2</sup> ]	Secção FMNS-A [mm <sup>2</sup> ]	Secção FMNS-L [mm <sup>2</sup> ]
30D	10,87	10,62	10,59	10,76	10,26
60D	10,87	10,00	10,01	10,04	9,86
90D	10,87	9,50	9,71	9,64	9,32
120D	10,87	-	-	9,24	9,09

A partir da Figura 3.22 é possível comparar a secção de referência do fio metálico com as secções obtidas ao longo do processo de envelhecimento dos mesmos.

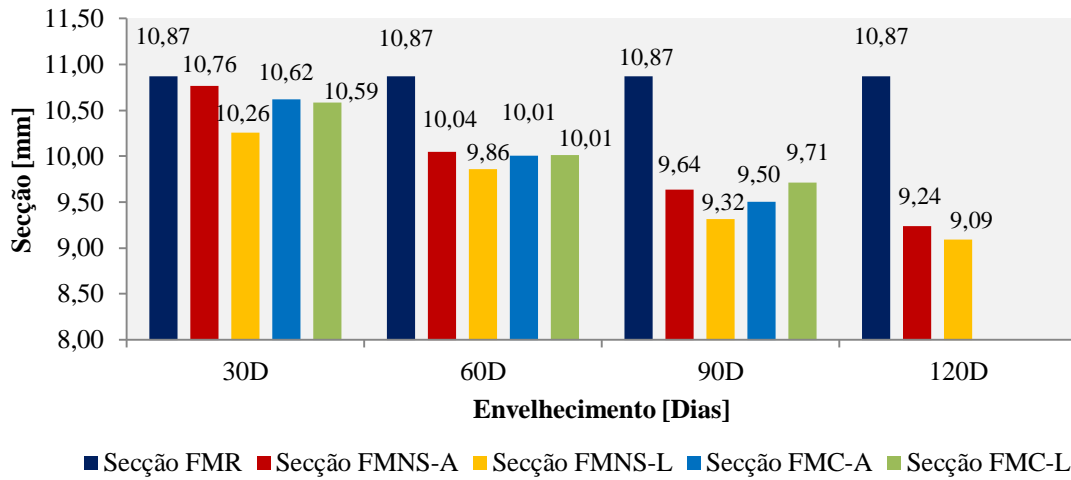


Figura 3.22 - Secção dos fios metálicos ao longo do processo de envelhecimento

### 3.7.3. Difração de raio x (DRX)

O ensaio de DRX teve como objetivo identificar se existiu ou não contaminação da argamassa por parte do fio metálico, como também identificar os vários componentes existentes na constituição do mesmo.

Este ensaio experimental consiste em incidir um feixe de raios X de cobalto sobre a amostra, a partir deste feixe é possível registar os dados entre  $3-74^\circ 2\theta$ , com um incremento de  $0.05^\circ 2\theta s^{-1}$ . A análise por difração de raio X é feita a partir de planos cristalográficos de um composto que é irradiado por um feixe monocromático de raios X com comprimento de onda  $\lambda$ , estes planos cristalográficos refletem a radiação (Figura 3.23).

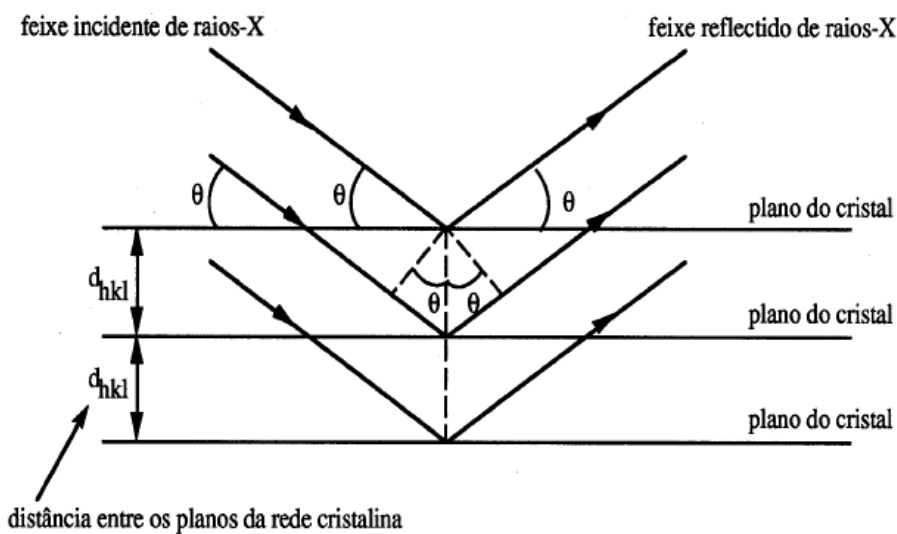


Figura 3.23 - Feixes de raio X (BRANCO, 2013)

Quando a radiação é refletida cumpre-se a lei de Bragg:

$$2 \times d \times \sin \theta = n \times \lambda$$

Em que:

- n: número inteiro;
- $\lambda$ : comprimento de onda dos raios X;
- d: distância específica de cada substância;
- $\theta$ : ângulo de incidência do feixe;

O comprimento de onda do feixe de raios X, verifica-se apenas para uma dada gama de valores do ângulo  $\theta$  de difração, sendo que o valor de (lei de Bragg) fica assim determinado, ou seja, a cada valor de d irá corresponder um ângulo específico.

Depois de determinada esta incógnita e recorrendo também a uma base de dados instalada no computador que se encontra ao lado do equipamento de análise, é possível identificar a espécie cristalográfica através de comparação com difratogramas conhecidos previamente de cada grupo mineral.

A partir da comparação sistemática da posição e intensidade de todos os picos de difração do difratograma da espécie desconhecida com os difratogramas da espécie padrão é possível identificar a espécie cristalina. (BRANCO, 2013)

A análise de DRX (Figura 3.24) permite identificar as substâncias cristalinas presentes num material quando a sua concentração é considerável (normalmente acima dos 5%), contudo este tipo de análise por si só não é suficiente, pois apenas fornece informação suplementar

Relativamente às argamassas de cal aérea com alto teor de substituição de cal por metacaulino, o ensaio de DRX revela que o pico de stratlingite é tanto mais intenso quanto maior teor de metacaulino tiver a argamassa, aumentando com o envelhecimento, contrariamente verifica-se uma diminuição do pico da portlandite com o aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea. Concluiu-se que quanto maior for o teor em metacaulino menor será o período de tempo em que a portlandite é detetável no DRX. (BRANCO, 2013)



Figura 3.24 - Máquina de DRX (DCM-FCT/UNL)

### 3.7.4. Fluorescência

A fluorescência de raios X é uma técnica precisa e não destrutiva com a qual se obtém uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos constituintes da amostra do material em estudo. É um método que consiste em medir a intensidades dos raios X característicos de cada elemento presente na amostra do material em estudo. Este tipo de equipamento contém sistemas de detectores que deteta a raios x, sendo estes energias emitidas pelas amostras quando excitadas.

Os ensaios de fluorescências foram realizados no CENIMAT num espectómetro de raio X por dispersão em comprimento de onda, *Panalycal Axios*.

No Quadro 3.10 encontram-se os componentes encontrados no interior do fio ensaiado.

Quadro 3.10 - Ensaio de fluorescência dos fios metálicos utilizados

Aço	
Componentes	Quantidade (%)
Si	0,6
S	0,1
Cr	0,1
Mn	0,5
Fe	95
Ni	0,02
Cu	0,3
Zn	4

## 3.8. Caracterização das argamassas

### 3.8.1. Organização dos ensaios

No Quadro 3.11 apresentam-se os ensaios de caracterização física, mecânica e química, realizados à argamassa no seu estado fresco, assim como as fichas de ensaio referentes a cada um, exceto dos ensaios realizados no Departamento de Ciências dos Materiais.

Quadro 3.11 - Ensaio realizados e fichas de ensaio correspondentes

Tipo de característica	Características em estudo	Ficha de ensaio
Características mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	Fe08 (FCT/UNL, 1996)
	Resistência à tração por flexão	Fe27 (FCT/UNL, 1999)
	Resistência à compressão	
Características físicas	Absorção de água por capilaridade	Fe06 (FCT/UNL, 1996)
	Secagem	
	Porosidade aberta	Fe02 (FCT/UNL, 1996)
Características químicas	Resistência aos cloretos	Fe12 (FCT/UNL, 1999)
	Fluorescências	-
	DRX	-

Os ensaios de caracterização da argamassa decorreram após 60 dias de permanência dos provetes em cura húmida. Convém realçar que o estudo em causa nesta dissertação não é o estudo da argamassa, mas sim a durabilidade do fio metálico embebido na mesma, razão pela qual a argamassa não foi sujeita a ensaios mais detalhados.

Os ensaios de caracterização do fio metálico ocorreram para 2 tipos de envelhecimento diferentes (cloretos e câmara de nevoeiro salino).

**Nota:** Tanto os ensaios de fluorescência como os de DRX realizados às argamassas serviram não só para que se pudesse identificar os materiais existentes nas argamassas, como também para identificar a contaminação do fio metálico embebido na mesma.

### 3.8.2. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade de um material, quanto menor for o seu valor maior a deformabilidade do mesmo.

A suscetibilidade para fendilhar de um material é obtida através do módulo de elasticidade dinâmico e a sua aderência ao suporte (ensaio não realizado na presente dissertação).

Este ensaio é considerado um ensaio não destrutivo que consiste na medição da frequência de ressonância longitudinal do provete (Figura 3.25), realizou-se de acordo com a norma NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006) e Fe08 (FCT/UNL, 1996), utilizando-se um equipamento associado a um programa de cálculo designado por “Zeus Resonance Meter”.

O equipamento registou as amplitudes das vibrações correspondentes ao intervalo de frequências transmitido ao vibrador por um oscilador de frequência variável (RATO, 2006). No decorrer do ensaio alternou-se as faces de topo dos provetes que estava em contato com o emissor de vibrações.

Para este ensaio utilizaram-se três provetes simples (sem fio metálico no seu interior).

Os referidos provetes estiveram em cura húmida do DEC-FCT/UNL durante 60 dias, sendo posteriormente retirados e colocados na estufa ventilada à temperatura de 60°C, onde permaneceram 24 horas para que pudessem atingir massa constante.

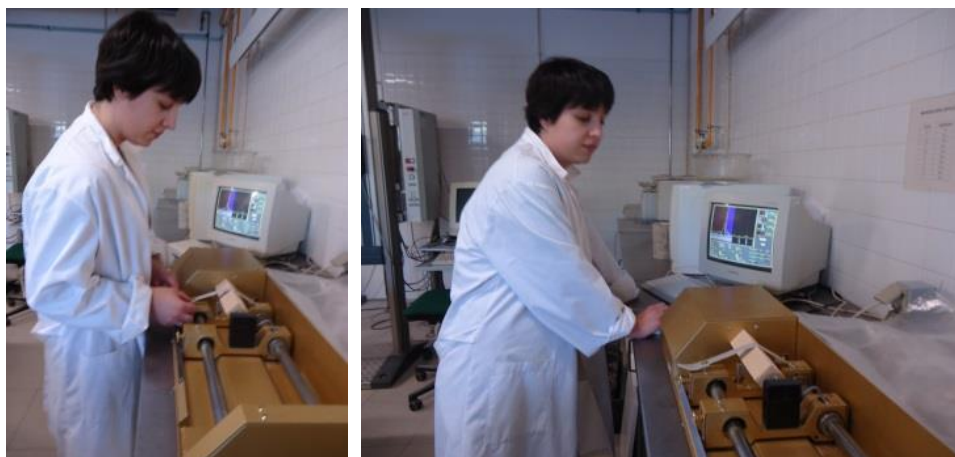


Figura 3.25 - Ensaio módulo de elasticidade dinâmico

**Equipamento:**

- Estufa ventilada;
- Balança com precisão de 0,001g;
- Equipamento associado a um programa de cálculo designado por “Zeus Resonance Meter”;

**Procedimento experimental:**

- Secaram-se os provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- Colocou-se cada provete simples no equipamento, aplicando numa extremidade uma fonte emissora e na outra ponta a unidade de receção (deixou-se uma distância de 1cm entre eles);
- Ligou-se o oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, onde as amplitudes máximas correspondem às condições de ressonância;
- Determinou-se automaticamente o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{\text{din}}$ ) a partir do programa de cálculo pela seguinte expressão:

$$E_{\text{din}} = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad 3.3$$

Em que:

- $E_{\text{din}}$  [Mpa]: módulo de elasticidade dinâmico;

- $l$  [m]: comprimento do provete;
- $f_0$  [Hz]: frequência de ressonância longitudinal;
- $\rho$  [N/ m<sup>3</sup>]: massa volúmica do material;
- $g$  [9,81 m/s<sup>2</sup>]: aceleração da gravidade;

Para cada provete efetuou-se no mínimo duas determinações, calculando-se a média das duas, a partir da qual se retirou a frequência longitudinal final.

**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.12 apresentam-se o valor médio e o respetivo desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico obtidos para os provetes ensaiados. No total ensaiaram-se três provetes simples (PS), numerados da seguinte forma: PS07, PS08 e PS09.

Quadro 3.12 – Módulo de elasticidade dinâmico

Méd [MPa]	DP [MPa]
1697	21,22
1717	28,75
1655	27,88

**3.8.3. Resistência à tração por flexão e à compressão**

Os ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão realizaram-se após o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, este ensaio consiste na aplicação de uma força de tração por flexão em três pontos do provete e permite determinar a capacidade resistente da argamassa em estudo.

A metodologia de ensaio teve como base a norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 1999/2006) e realizou-se segundo a ficha de ensaio Fe27 (FCT/UNL, 1999) (Figura 3.26).

**Equipamento:**

- Estufa ventilada;
- Máquina universal de tração ZWICK Z050;
- Suporte para ensaio de flexão;
- Suporte para ensaio de compressão;

**Procedimento experimental (determinação da resistência à tração por flexão):**

- Colocaram-se os provetes a secar na estufa ventilada a  $T=60\pm 5^\circ\text{C}$ , até atingirem massa constante;

- Colocaram-se os provetes prismáticos sobre o suporte para o ensaio de flexão, cujos pontos de apoio se encontravam afastados 10mm e onde as faces de moldagem estavam em contacto com as superfícies de carregamento;
- Aplicou-se a carga a meio vão com uma velocidade de 0,2mm/min até à rotura;
- Registou-se o valor da carga última ao qual resistiram os provetes;
- Calculou-se a resistência à tração por flexão a partir da seguinte expressão:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_t \times l}{b \times d^2} \times 10^3 \quad 3.4$$

Em que:

- $R_t$  [Mpa]: resistência à tração por flexão;
- $F_t$  [KN]: carga de rotura à tração por flexão;
- $L$  [mm]: distância entre pontos de apoio;
- $b$  e  $d$  [mm]: dimensão do lado da secção do provete;

A máquina universal de tração designada por ZWICK Z050 está equipada com uma célula de carga de 20N e com uma velocidade de aplicação da carga de 0,2mm/min. O ensaio de tração por flexão consiste na aplicação de uma carga pontual que será aplicada a meio vão do comprimento do provete, este encontra-se apoiado em dois pontos que se encontram distanciados a 10mm.

#### **Procedimento experimental (determinação da resistência à compressão):**

- Colocaram-se os provetes resultantes do ensaio de flexão no suporte para o ensaio de compressão e assegurou-se uma área de contato mínima da máquina com o provete (o contacto do provete fez-se através de uma das suas faces lisas);
- Aplicou-se uma carga com uma velocidade de 0,7mm/min, até à rotura;
- Registou-se o valor da carga última ao qual os provetes resistiram.
- Calculou-se a resistência à compressão a partir da seguinte expressão:

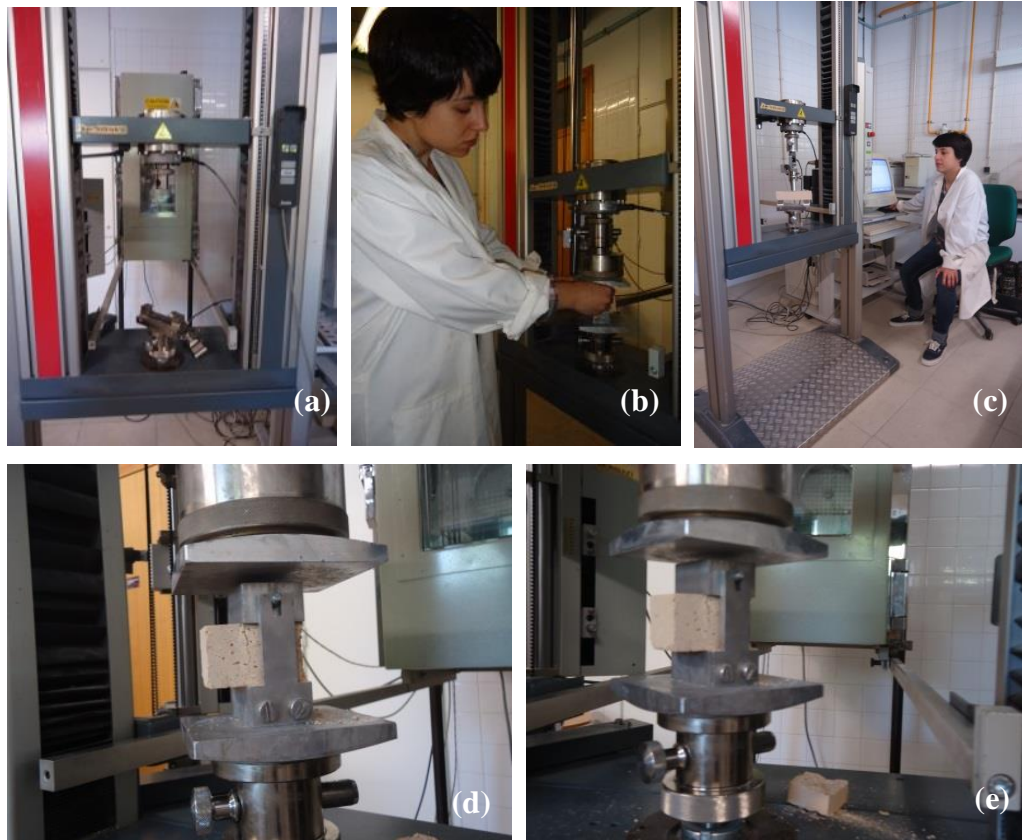
$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]} \quad 3.5$$

Em que:

- $R_c$  [Mpa]: resistência à compressão;
- $F_c$  [N]: força de compressão correspondente à rotura;
- $A$  [mm<sup>2</sup>]: área de contacto;



O ensaio de compressão realizou-se com o mesmo equipamento do ensaio anterior (ZWICK Z050), aplicou-se uma célula de carga de 50 KN e com uma velocidade de aplicação de 0,7mm/min [Figura 3.26 (d),(e)]



(a) - Suporte de ensaio flexão/tração; (b), (c) - Ensaio de tração; (d), (e) - Extremidade dos provetes resultantes do ensaio de compressão

Figura 3.26 - Ensaio de determinação de resistência mecânica na ZWICK Z050

**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.13 apresentam-se os valores de resistência à tração, tal como a média e o desvio padrão obtidos.

Quadro 3.13 – Resistência à tração por flexão dos três provetes ensaiados

Provetes	F <sub>máx</sub> [N]	R <sub>t</sub> [Mpa]	Méd	Dp
PS07	138,63	0,32		
PS08	153,84	0,36	0,35	0,02
PS09	152,79	0,36		

No Quadro 3.14 encontram-se os valores de resistência à compressão dos 3 provetes simples.

Quadro 3.14 – Resistência à compressão

Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [N]	$R_{comp}$ [Mpa]	Méd.	Dp
PS07	2350	1,47		
PS08	2289	1,43	1,44	0,03
PS09	2253	1,41		

#### 3.8.4. Resistência aos sais solúveis (cloretos)

O ensaio de resistência aos cloretos tem como objetivo registrar a perda de massa ocorrida tal como a percentagem de cloretos retidos em cada provete.

##### Equipamento:

- Estufa ventilada;
- Balança de precisão 0,001g;
- Câmara climática Fitoclima 300EDTU da Aralab (Figura 3.27);
- Recipiente de plástico para a realização da contaminação dos provetes;
- Cloreto de sódio;

##### Procedimento experimental:

- Colocaram-se os provetes armados e simples em estufa ventilada a  $T=60\pm 5^{\circ}C$  até atingirem massa constante;
- Preparou-se uma solução saturada de cloreto de sódio;
- Pesaram-se os provetes secos,  $M_0$ ;
- Colocaram-se dos provetes em imersão na solução saturada de cloreto de sódio durante 24 horas;
- Colocaram-se os provetes na estufa ventilada a  $T=90\pm 5^{\circ}C$ , até que atingissem massa constante;
- Pesaram-se os provetes secos, com cloretos retidos,  $M_1$ ;
- Colocaram-se os provetes na câmara climática (Figura 3.27), onde foram sujeitos a ciclos sucessivos de 12 horas a 30% de humidade relativa e 12 horas a 90% de humidade relativa, a uma temperatura constante de  $T=23^{\circ}C$ ;
- Pesaram-se os provetes e verificou-se o seu estado de integridade, no fim do ciclo seco ao fim de 4 ciclos completos;
- Calculou-se a percentagem de cloretos retidos a partir da seguinte expressão:

$$CR = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad 3.6$$

Em que:

- CR[%]: percentagem de cloretos retidos no provete;
- $M_0$ [g]: peso do provete seco ;
- $M_1$ [g]: peso do provete seco com cloretos retidos;

Para este ensaio usou-se uma solução saturada de cloreto de sódio obtida dissolvendo 1Kg de cloreto de sódio em 4L de água, verificando-se posteriormente que não havia deposição significativa de sal no fundo do recipiente.

O ensaio de resistência aos cloretos teve como base a Fe12 (FCT/UNL, 1999) e consiste em secar os provetes numa estufa ventilada a  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  até que estes fiquem com massa constante, sendo posteriormente preparada uma solução de cloreto de sódio,

Após 24 horas é feita a pesagem dos provetes (armados e simples), observando-se também o seu estado de integridade.



Figura 3.27 - Câmara climática usada para o ensaio aos cloretos.

### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.15 observa-se a percentagem de cloretos retidos dentro dos provetes simples e armados.

Quadro 3.15 – Percentagem média de cloretos retidos

Cloretos retidos [%]	
Provetes	Média
Provetes armados (PA)	16,41
Provetes não armados (PS)	15,63

Em relação ao ensaio de resistência aos sais solúveis, observa-se a partir da Figura 3.28 que os provetes armados revelaram uma maior perda de massa entre o 27° e o 30° ciclo, apesar da diferença não ser considerável e tendo em conta que a máquina sofreu várias variações de temperatura e ciclos de humidade devido a problemas técnicos, a variação de perda de massa não é muito significativa.

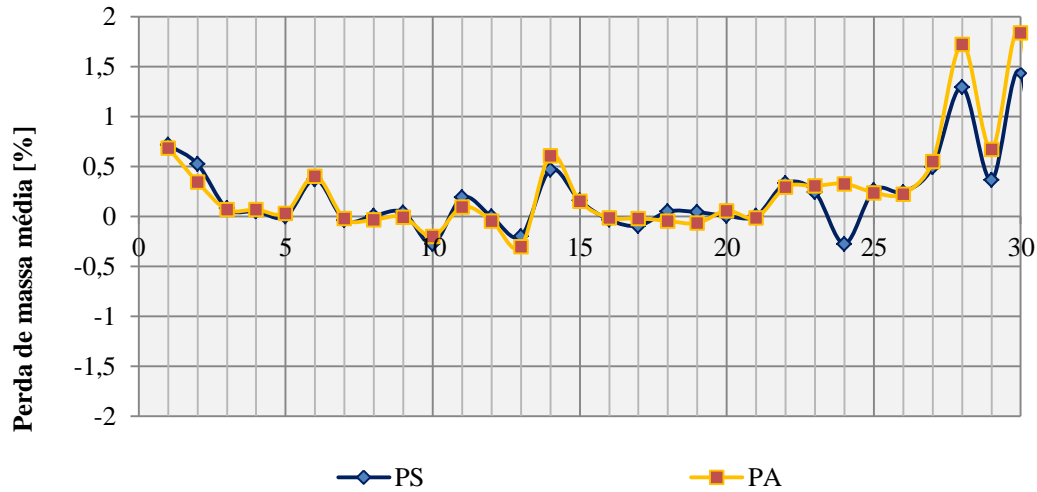


Figura 3.28 - Média da variação da perda dos provetes armados e não armados

A partir da Figura 3.29 observa-se que os provetes armados (PA) apresentaram maior percentagem de cloretos retidos.

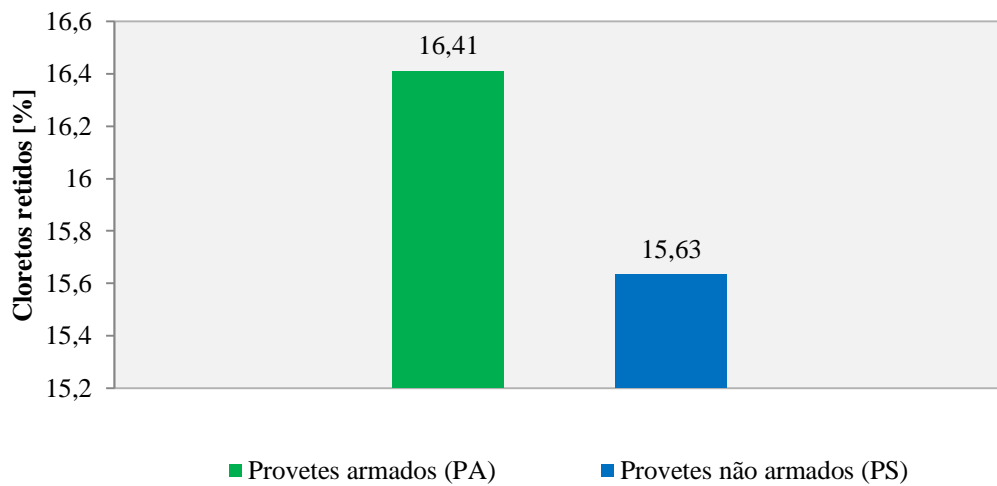


Figura 3.29 - Média de cloretos retidos nos PA e PS

Na Figura 3.30 observa-se a evolução dos provetes ao longo dos ciclos por ataque aos cloretos.

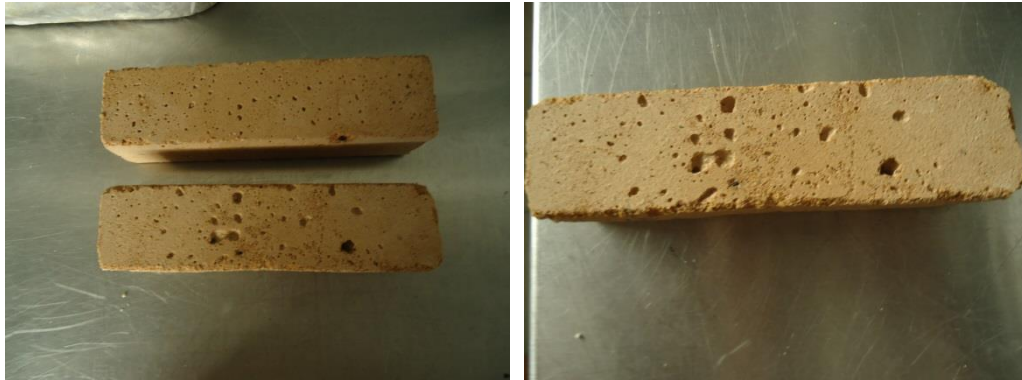


Figura 3.30 - Evolução dos provetes por ataque aos cloretos

### 3.8.5. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade destina-se a determinar o coeficiente de capilaridade, tal como o valor assintótico da curva de absorção de água, o primeiro traduz a velocidade de absorção de água obtida através do declive inicial da curva de absorção de água e o segundo o valor máximo de água absorvido por capilaridade.

A capilaridade traduz a ascensão de água através dos poros de um material. Quanto maior for a dimensão dos poros de um material (porometria), menor será a sua capilaridade e quanto mais finos forem os capilares do material mais rápida será a progressão da água (FARIA, 2004).

Este ensaio teve por base a norma EN 15801:2009 (CEN, 2009) e EN 1015-18:2002 (CEN, 2002). Foram ensaiados 3 metades de provetes simples (resultantes do ensaio à flexão por tração e à compressão), antes de serem colocados dentro do recipiente de plástico com água foram colocados em estufa a 60°C por um período de 48 horas para que atingirem condições de massa constante (Figura 3.31).



Figura 3.31 - Ensaio de absorção por capilaridade

**Equipamento:**

- Estufa ventilada;
- Recipiente de plástico com tampa;
- Balança de precisão 0,001g;
- Tabuleiro com rede de plástico;
- Nível;
- Água;
- Régua;

**Procedimento experimental:**

- Colocaram-se os provetes em estufa a 60°C por 48 horas;
- Preparou-se a caixa estanque para a realização do ensaio, nivelando o tabuleiro com rede de plástico dentro da caixa, mantendo uma lâmina de água com 5mm acima da rede, criando condições de ambiente saturado na caixa;
- Retiraram-se os provetes a ensaiar e deixaram-se a arrefecer a temperatura ambiente;
- Introduziram-se os provetes dentro da caixa;
- Efetuaram-se pesagens aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos durante as primeiras 5 horas de ensaio;
- Efetuaram-se outras pesagens 24 e 48 horas após o início do ensaio e deu-se o mesmo por terminado;
- Traçou-se a curva de absorção tendo como ordenada a massa de água absorvida pelo provete por unidade de área [Kg/m<sup>2</sup>] e sendo a abcissa a raiz quadrada do tempo decorrido [min<sup>0,5</sup>], calculou-se a massa de quantidade absorvida através da seguinte expressão:

$$m = \frac{m_i - m_0}{A} \quad 3.7$$

Em que:

- m [Kg/m<sup>2</sup>]: massa da quantidade de água absorvida;
- m<sub>i</sub> [Kg]: massa do provete ao fim do tempo t<sub>i</sub>;
- m<sub>0</sub>[Kg]: massa do provete seco ao fim do tempo t<sub>0</sub>;
- A [m<sup>2</sup>]: área da secção do provete em contato com a água;

Depois de obtidos os valores da massa de água absorvida, definiu-se o valor assintótico (VA) da curva de absorção de água, que traduz o total de água que a argamassa absorve por capilaridade que é definida em função do volume médio de metade do provete original, é também

definido o coeficiente de capilaridade (CC) da argamassa que é o declive do troço reto inicial da curva.

**Resultados obtidos no ensaio:**

A realização do ensaio de absorção de água por capilaridade permite obter não só o traçado das curvas de absorção de água, que traduzem a quantidade de água absorvida por área de contacto em função da raiz do tempo de ensaio decorrido, como também o cálculo do valor assintótico (VA), que representa o máximo da quantidade de água absorvida pelo provete e o coeficiente de capilaridade (CC), que é obtido através do declive inicial da curva de absorção de água e traduz a velocidade da absorção decorrida.

No Quadro 3.16 registam-se os valores de CC e VA para a média dos provetes.

Quadro 3.16 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico

	CC [Kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	VA [Kg/m <sup>2</sup> ]
Méd	0,24	15,56

**3.8.6. Secagem**

O ensaio de secagem realizou-se imediatamente após o ensaio de absorção de água por capilaridade, fazendo-se corresponder o último valor registado no ensaio de capilaridade ao primeiro no ensaio de secagem. A partir deste ensaio é possível traçar as curvas de secagem, determinando também os parâmetros que definem as características do material em estudo.

A taxa de secagem (TS) e o índice de secagem (IS) são os dois parâmetros determinados a partir deste ensaio, o primeiro traduz a velocidade inicial de secagem e o segundo o comportamento de secagem ao longo do prazo.

Este baseia-se na especificação de RILEM (25-PEM, 1980) e utiliza o método simplificado de integração numérica através da soma sucessiva de trapézios, quanto menor for o valor deste índice de secagem mais facilmente será feita a secagem.

**Equipamento:**

- Bancada metálica impermeável;
- Balança de precisão 0,001g;

**Procedimento experimental:**

- Após efetuada a última pesagem do ensaio de capilaridade retiraram-se os provetes que se encontravam em contacto com a lâmina de água;



- Colocaram-se os provetes na bancada metálica impermeável e pesaram-se os mesmos durante as primeiras 5 horas de ensaio;
- De seguida efetuaram-se pesagens diárias durante 21 dias, totalizando 846 horas;
- Terminado o ensaio traçou-se a curva de secagem e determinou-se a taxa de secagem obtida através do declive inicial da reta da curva de secagem, o valor do teor em água (3.8) e o índice de secagem através de somas sucessivas de trapézio (3.9).

$$w_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad 3.8$$

Em que:

- $W_i$ [%]: teor em água no instante  $t_i$ ;
- $m_i$ [g]: massa do provete no instante  $t_i$ ;
- $m_0$ [g]: massa do provete seco;

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times (\frac{w_{t_{i-1}} + w_{t_i}}{2})]}{w_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad 3.9$$

Em que:

- IS: índice de secagem;
- $t_i$ [h]: tempo de ensaio decorrido até ao instante  $i$ ;
- $t_{i-1}$ [h]: tempo de ensaio decorrido até ao instante anterior a  $i$ ;
- $t_f$ [h]: tempo total do ensaio;
- $w_{t_i}$  [%]: teor em água no instante  $i$ ;
- $w_{m\acute{a}x}$  [%]: teor em água máximo do provete,  $t=0$ ;



Figura 3.32 - Provetes na bancada lisa e impermeável



**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.17 encontram-se representados os valores do teor em água obtidos pelos provetes simples.

Quadro 3.17 – Teor de água dos provetes simples

Teor em água ( Wt) %					
Tempo (h)	Provetes			Méd	Dp
	PS07	PS08	PS09		
0	15,31	17,25	16,87	16,48	1,03
1	14,48	16,49	16,10	15,69	1,06
2	14,00	16,01	15,75	15,25	1,09
3	13,39	15,42	15,03	14,61	1,08
4	12,33	14,45	14,06	13,61	1,13
5	11,86	14,02	13,61	13,17	1,15
24	4,29	6,85	6,04	5,73	1,31
98	0,97	2,88	2,32	2,06	0,98
120	0,62	2,50	1,97	1,70	0,97
147	0,52	1,52	1,87	1,31	0,70
171	0,50	2,33	1,83	1,56	0,94
195	0,50	2,35	1,85	1,56	0,96
268	0,50	2,35	1,85	1,57	0,96
293	0,51	2,36	1,86	1,58	0,96
315	0,52	2,38	1,88	1,59	0,96
339	0,54	2,39	1,88	1,60	0,96
363	0,56	2,41	1,90	1,62	0,96
436	0,59	2,43	1,93	1,65	0,95
459	0,60	2,45	1,94	1,66	0,96
485	0,62	2,46	1,96	1,68	0,95
625	0,65	2,49	1,99	1,71	0,95
653	0,67	2,52	2,00	1,73	0,95
677	0,68	2,53	1,97	1,73	0,95
774	0,68	2,51	1,98	1,73	0,94
796	0,68	2,56	2,00	1,75	0,96
820	0,70	2,52	1,99	1,74	0,94
846	0,72	2,53	2,02	1,76	0,93

Taxa de secagem	0,69	0,65	0,66	0,67	0,02
-----------------	------	------	------	------	------

### 3.8.7. Porosidade aberta

A porosidade aberta é uma das características físicas das argamassas que influencia o seu comportamento mecânico, ao nível das resistências mecânicas e relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico (FARIA, 2004).

Ao aumentar a massa volúmica de um material aumenta também o seu módulo de elasticidade, compacidade e resistências mecânicas, mas implica uma menor porosidade.

A partir deste ensaio experimental calculou-se o valor de porosidade aberta ( $P_{ab}$ ), tal como a massa volúmica (MVA) das amostras e realizou-se segundo a norma NP EN 1936 (IPQ, 2008).

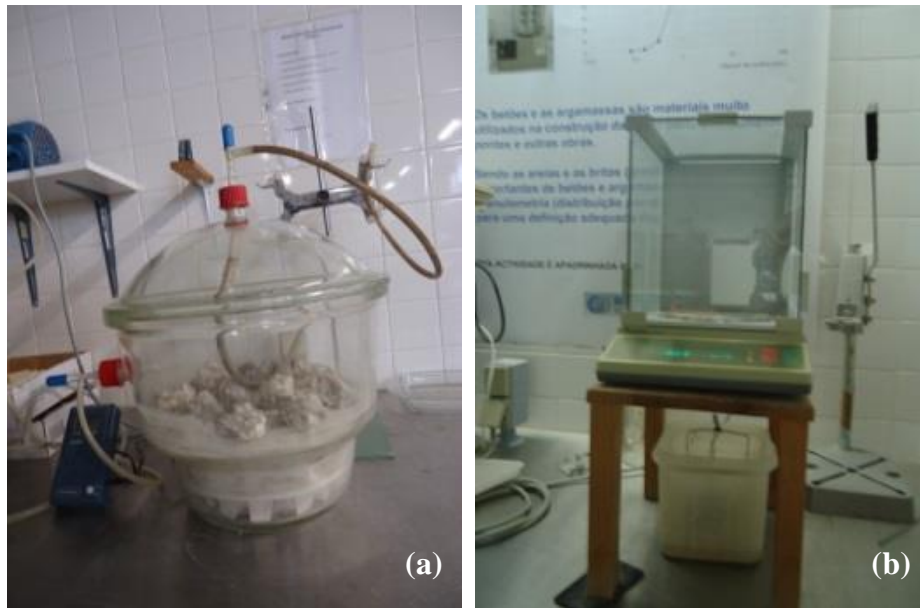
#### Equipamento:

- Estufa ventilada;
- Balança de precisão 0,001g;
- Exsicador;
- Bomba de vácuo ligada a exsicador e recipiente com sílica gel;
- Funil de vidro
- Recipiente com sílica gel;
- Mangueiras de plástico;

#### Procedimento experimental:

- Secaram-se os provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
- Pesaram-se os provetes secos,  $M_0$ ;
- Colocaram-se os provetes dentro do exsicador fechado e provocou-se uma depressão gradual até 2667 Pa, com o auxílio da bomba de vácuo;
- Mantiveram-se as condições anteriores por 24 horas;
- Colocou-se lentamente água no exsicador até à imersão total dos provetes, durante cerca de 15 minutos, onde a bomba de vácuo permaneceu ligada enquanto a água foi introduzida através de uma mangueira de PVC
- Mantiveram-se os provetes imersos à pressão referida durante 24 horas;
- Desligou-se a bomba de vácuo ao fim de 24 horas e retirou-se a tampa do exsicador, deixando os provetes imersos durante mais 24 horas dentro de água e à pressão atmosférica normal;
- Pesou-se os provetes em imersão (pesagem hidrostática),  $M_1$ ;
- Retiraram-se os provetes da água, absorveu-se a água em excesso com um pano e determinou-se a  $M_2$ , massa dos provetes saturados (pesagem saturada);

Durante a realização deste ensaio experimental sujeitou-se o ambiente exterior ao exsiccador [Figura 3.33 (a)] à ação de uma bomba de vácuo (por sucção) que retirou o ar presente no interior dos poros dos provetes, assim quando se introduziu água no interior do exsiccador, esta conseguiu penetrar com mais facilidade nos poros dos provetes, devido a uma menor pressão criada pelo vácuo. Este trabalho experimental além de tornar o ensaio mais rápido, permite obter valores de porosidade mais precisos do que aqueles obtidos por uma simples imersão dos provetes em água (BARRETO, 2010).



(a) - Provetes dentro do exsiccador (b) pesagem hidrostática

Figura 3.33 – Ensaio de determinação de porosidade aberta

Os resultados de porosidade aberta ( $p_{ab}$ ) e massa volúmica ( $m_{va}$ ) aparente são obtidos de acordo com a expressão 3.10 e 3.11.

$$P_{ab} = \frac{m_2 - m_0}{m_2 - m_1} \times 100 \quad 3.10$$

Em que:

- $P_{ab}$  [%]: porosidade aberta;
- $m_0$  [g]: massa da amostra seca;
- $m_1$  [g]: massa hidrostática da amostra;
- $m_2$  [g]: massa saturada da amostra;

$$m.v.a = \frac{m_0}{m_2 - m_1} \times 10^3 \quad 3.11$$

Em que:

- m.v.a [ $\text{Kg/m}^3$ ]: massa volúmica aparente;
- $m_0$  [g]: massa da amostra seca;
- $m_1$  [g]: massa hidrostática da amostra;
- $m_2$  [g]: massa saturada da amostra;

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.18 encontra-se o valor médio e o respetivo desvio padrão de porosidade aberta e da massa volúmica aparente, obtidos a partir das 3 amostras ensaiadas

Quadro 3.18 - Porosidade aberta ( PA) e massa volúmica aparente (m.v.a)

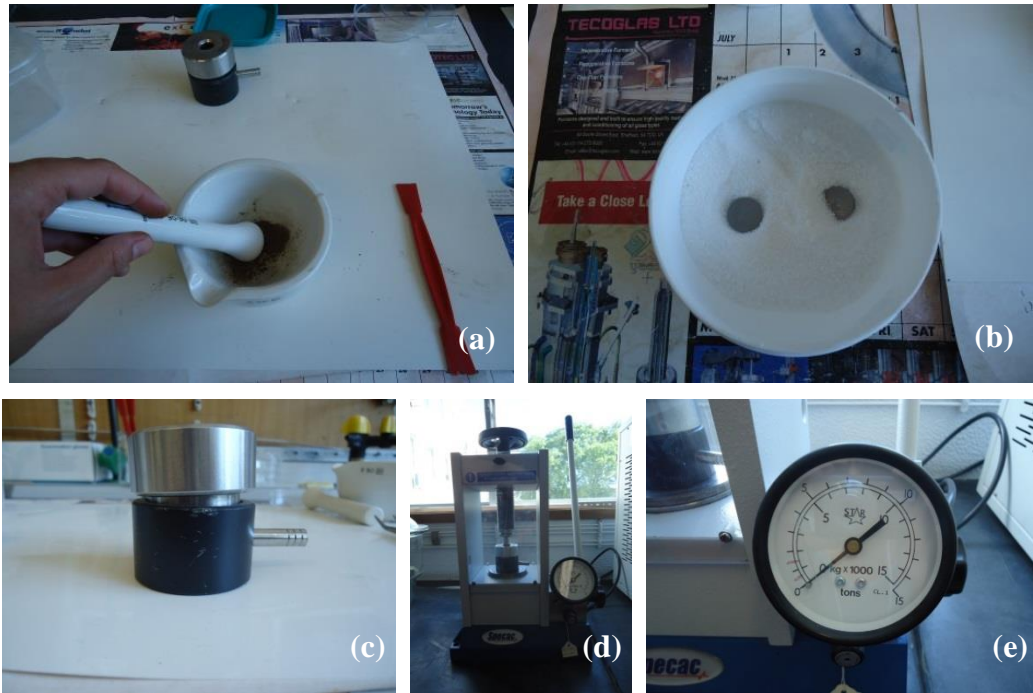
Provetes	$m_0$ (g)	$m_1$ (g)	$m_{\text{saturada}}$ (g)	PA (%)	Méd	Dp	m.v.a [ $\text{Kg/m}^3$ ]	Méd	Dp
PS07	65,64	38,25	75,93	27,33			17412		
PS08	61,91	36,25	71,50	27,20	27,44	0,31	1757	1752	8,94
PS09	55,04	32,44	63,74	27,79			1758		

#### 3.8.8. Difração de raio x (DRX)

Na elaboração deste ensaio utilizaram-se amostras de todos os constituintes da argamassa, tais como cal aérea, metacaulino, areia de rio e areia amarela.

No ensaio de DRX, as pastilhas correspondentes a cada tipo de amostra de diferentes materiais foram colocadas dentro da máquina esta contém no seu interior um feixe de raios X, que irá incidir sobre a amostra, sendo seguida registados os dados entre  $3-74^\circ 2\theta$ , com um incremento de  $0.05^\circ 2\theta \text{ s}^{-1}$ .

Este ensaio realizou-se às argamassas em contacto com o fio metálico para que se pudesse observar a influência do processo de oxidação no meio em que o fio se encontrava.



(a) - Almofariz; (b) - Ácido esteárico; (c) - Molde para pastilhas; (d) - Prensa hidráulica; (e) - Visor com força aplicada

Figura 3.34 - Material utilizado na elaboração de pastilha no DCM

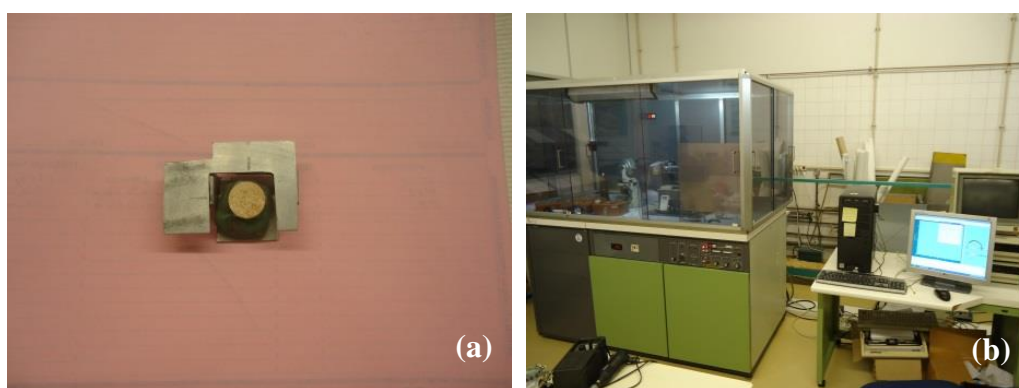
**Equipamento:**

- Almofariz;
- Balança de precisão 0,001g;
- Espátula de plástico;
- Prensa hidráulica (5000 Kg);
- Molde para pastilhas;
- Cotonetes;
- Álcool;
- Papel absorvente;
- Ácido esteárico;
- Silicone;
- Plasticina
- Porta amostras;
- Máquina de DRX;

**Procedimento experimental:**

- Pesou-se um grama de cada material numa balança de precisão de 0,001g;
- Colocou-se o material dentro do almofariz e desfez-se a amostra até se encontrar reduzida a pó;

- Colocou-se o pó dentro do molde de pastilhas onde previamente se colocou ácido esteárico para que o pó do material não ficasse colado ao molde;
- Colocou-se o molde dentro da prensa hidráulica e aplicou-se com a manivela uma força de 5 toneladas;
- Retirou-se o molde da prensa e retirou-se um dos lados da mesma;
- Voltou-se a colocar o molde na prensa e aplicou-se novamente uma força de 5 toneladas para que a pastilha pudesse sair intacta;
- Colocou-se um pouco de silicone na plasticina;
- Colou-se a pastilha à plasticina que se encontrava no porta amostras;
- Colocou-se a pastilha dentro da máquina de Drx;
- Registaram-se os dados entre  $3-74^{\circ} 2\theta$ , com um incremento de  $0.05^{\circ} 2\theta s^{-1}$ ;



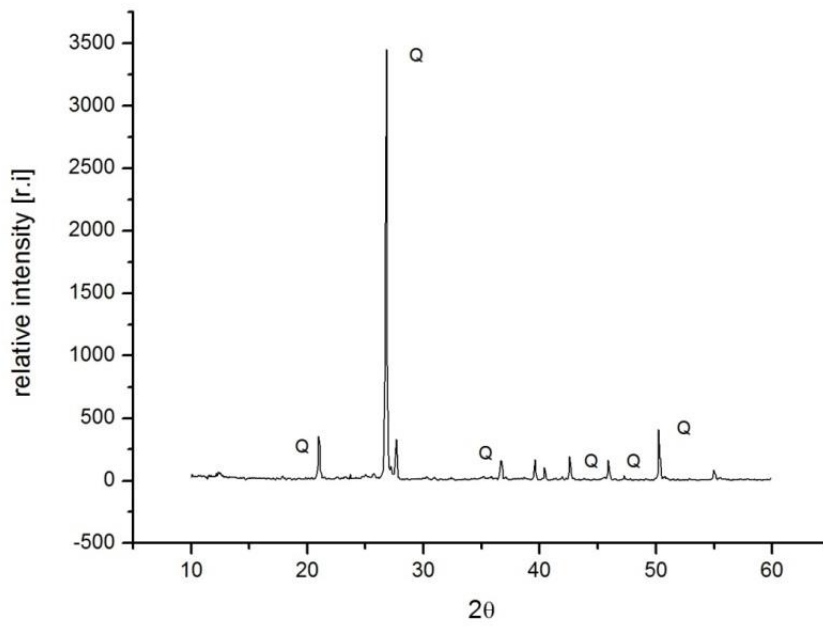
(a) - Pastilha colocada no porta amostras com plasticina; (b) - Máquina de DRX

Figura 3.35 - Pastilha analisada por DRX

#### **Resultados obtidos no ensaio:**

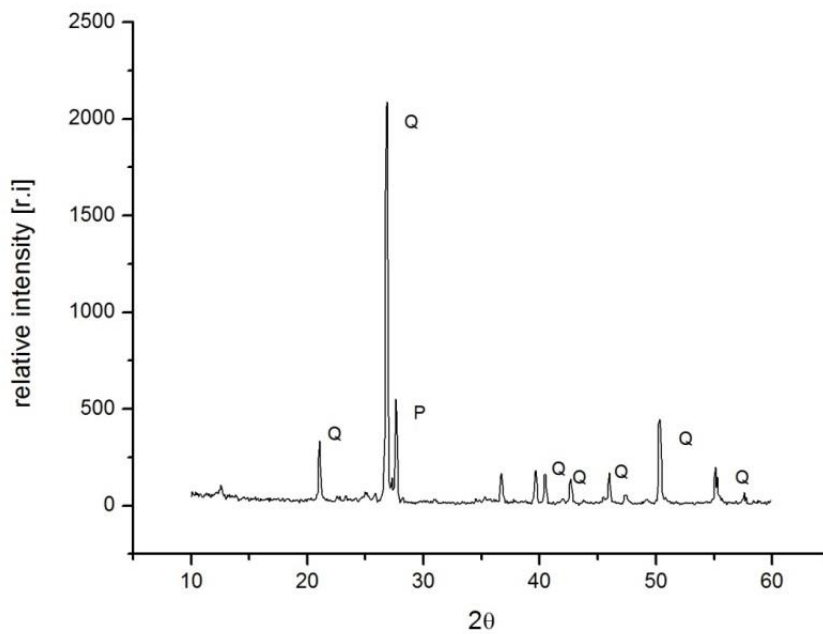
Antes de analisar a argamassa foram analisados por DRX todos os componentes da mesma para que posteriormente se identificassem mais facilmente os vários componentes existentes na argamassa contaminada pelo fio metálico.

Na Figura 3.36 e na Figura 3.37 é possível observar a composição dos vários agregados usados na preparação da argamassa respetivamente da areia amarela, sendo o pico do gráfico a fase cristalina.



Q - Quartz ( $\text{SiO}_2$ )

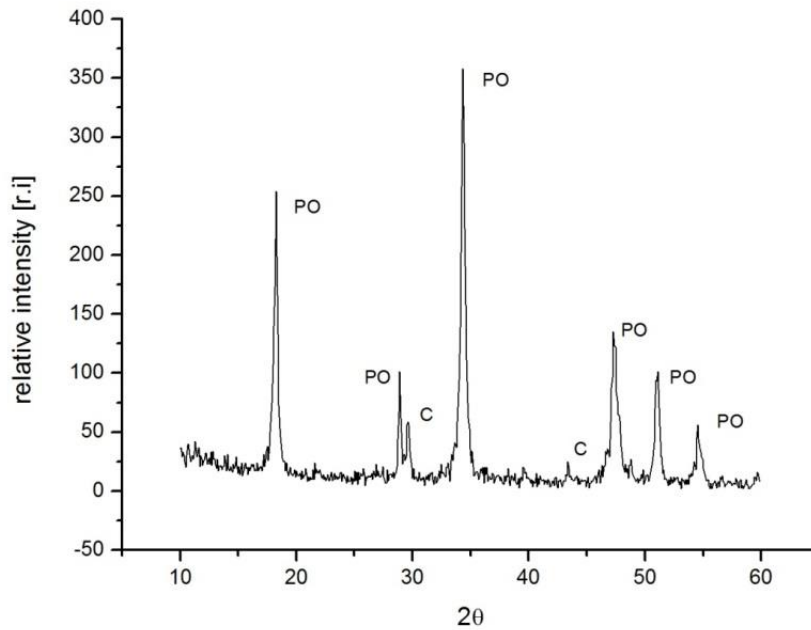
Figura 3.36 - DRX areia amarela



Q - Quartz ( $\text{SiO}_2$ ); P- Potassium aluminum silicate hydrate ( $\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{H}_2\text{O}$ )

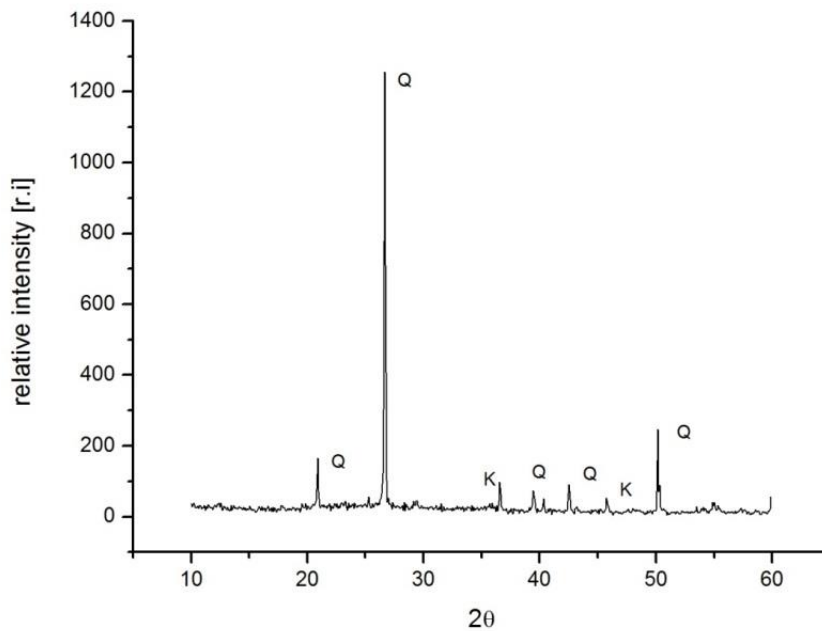
Figura 3.37 - DRX areia de rio

Nas Figura 3.38 e Figura 3.39 observa-se a análise de DRX do ligante e do aditivo pozolânico, repetivamente, utilizados na preparação da argamassa.



C - Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ); PO - Portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

Figura 3.38 - DRX cal aérea



Q - Quartz ( $\text{SiO}_2$ ); k - Kyanite ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ )

Figura 3.39 - DRX metacaulino



## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados globalmente os resultados obtidos nos vários ensaios realizados aos fios metálicos (livres e embebidos em argamassa), sujeitos a envelhecimento artificial, tal como à argamassa utilizada.

### 4.1. Fios metálicos

#### 4.1.1. Tração nos fios

##### Ensaio aos 30 dias

Na Figura 4.1 observa-se a força máxima de referência e as forças máximas de rotura após 30 dias envelhecimento artificial. Verifica-se que os fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a ataque por nevoeiro salino (FMNS-A) são os que apresentam a força máxima de rotura mais próxima da força de referência, seguidos dos fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a ataque por cloretos (FMC-A). Ao contrário dos fios metálicos livres sujeitos a ataque por nevoeiro salino (FMNS-L) que são os que apresentam a força de rotura com o valor mais baixo.

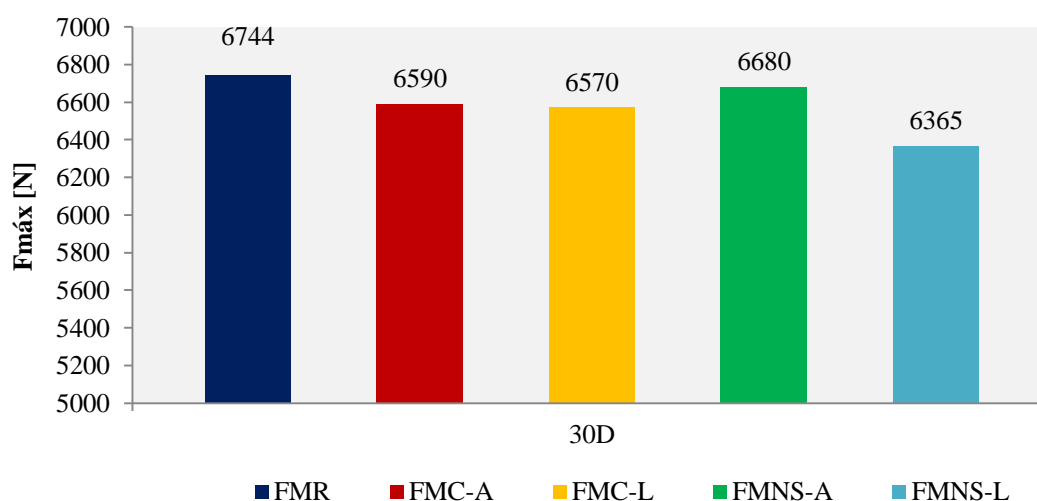


Figura 4.1 – Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 30 dias

##### Ensaio aos 60 dias

A Figura 4.2 representa as forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento artificial aos 60 dias de idade. Observa-se que os fios metálicos livres sujeitos a ataque por nevoeiro salino são os que apresentam a menor força de rotura (FMNS-L), contrariamente aos fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a ataque por nevoeiro salino (FMNS-A).

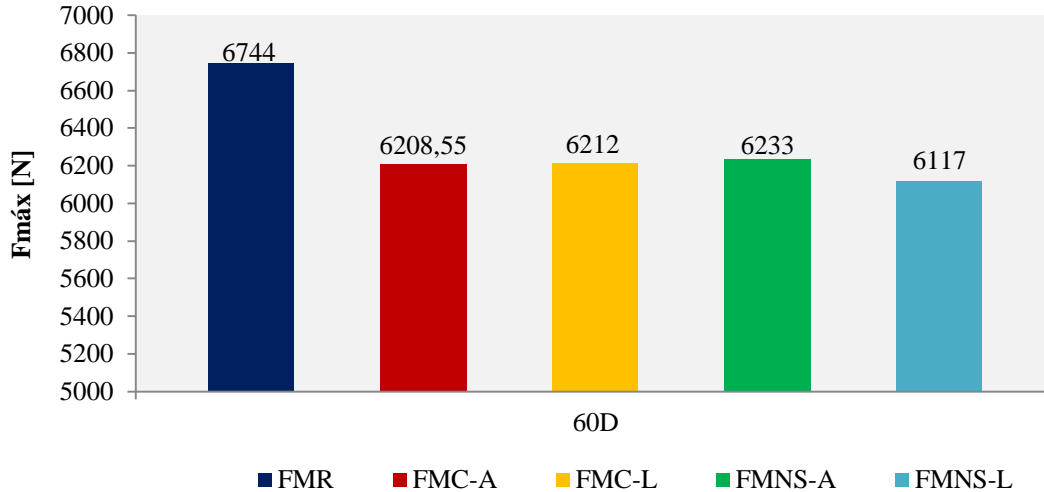


Figura 4.2 -Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 60dias

### Ensaio aos 90 e 120 dias

Na Figura 4.3 e na Figura 4.4 estão representadas a forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento após 90 e 120 dias respetivamente. Aos 120 dias apenas estão presentes os fios metálicos sujeito a envelhecimento por nevoeiro salino.

É possível observar nas duas figuras que os fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino (FMNS-L), são aqueles que continuamente registam uma menor força de rotura comparativamente à força máxima de referência

Aos 90 dias os fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por cloretos são aqueles que registam a maior força de rotura.

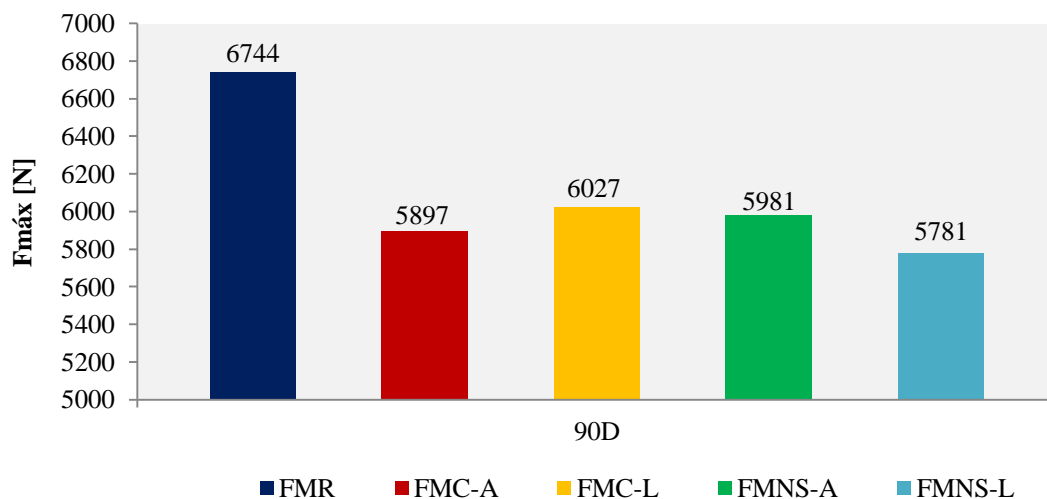


Figura 4.3- Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 90dias

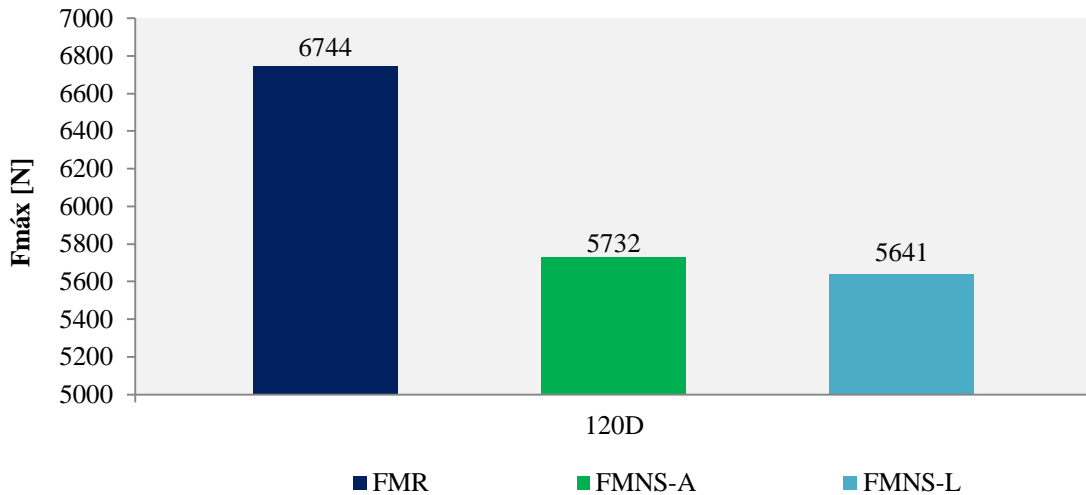


Figura 4.4- Forças máximas de rotura dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento aos 120dias

#### 4.1.2. Secção resistente e secção de referência dos fios metálicos

Aos zero dias ensaiaram-se o que se denominou por fios metálicos de referência (fios que não sofreram qualquer tipo de envelhecimento), posteriormente os ensaios realizaram-se aos 30, 60, 90 e 120 dias.

Nas figuras seguintes está representada a secção resistente dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento, nos diferentes dias de ensaio. A secção dos fios foi calculada a partir da força máxima de rotura à qual os fios metálicos resistiram. Registou-se também a correspondente secção dos fios metálicos após o envelhecimento artificial (cloretos e nevoeiro salino).

##### Ensaio aos 30 dias

A partir da Figura 4.5 observa-se as secções resistentes dos fios após sujeitos a envelhecimento artificial, incluindo a secção do fio metálico de referência. Verifica-se que os fios metálicos com menor secção são aqueles que se encontram livres de argamassa. Os fios metálicos com secção com valor mais próximo da secção de referência são os que se encontram embebidos na argamassa. Os fios metálicos embebidos em argamassa são aqueles que registaram uma maior força de rotura.

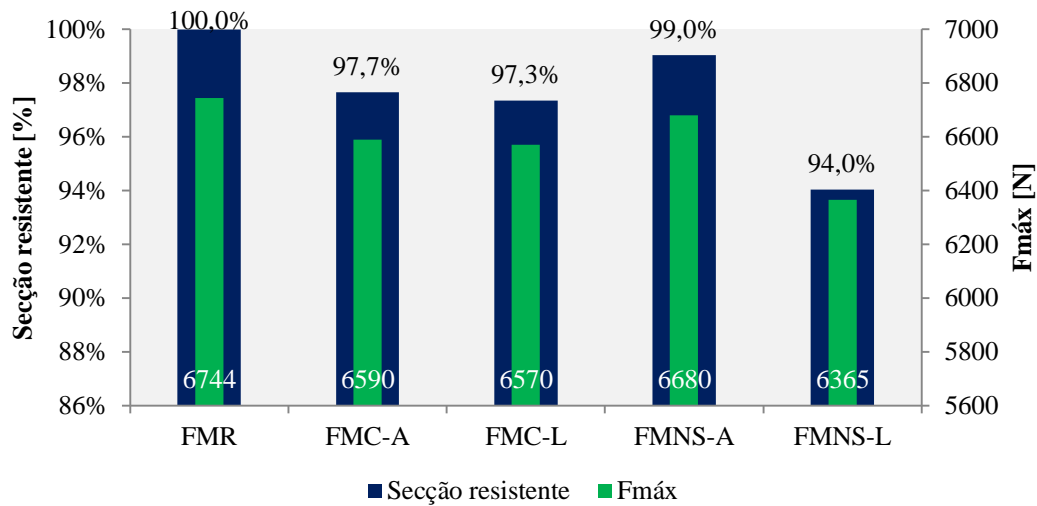


Figura 4.5 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 30 dias de envelhecimento

### Ensaio aos 60 dias

Observa-se a partir da Figura 4.6 que os fios livres de argamassa sujeitos a ataque por nevoeiro salino são aqueles que apresentam uma menor força de rotura e uma menor secção resistente. Os fios embebidos em argamassa sujeitos a ataque por nevoeiro salino são os que apresentam a maior secção resistente, sendo também estes que apresentam uma maior força de rotura.

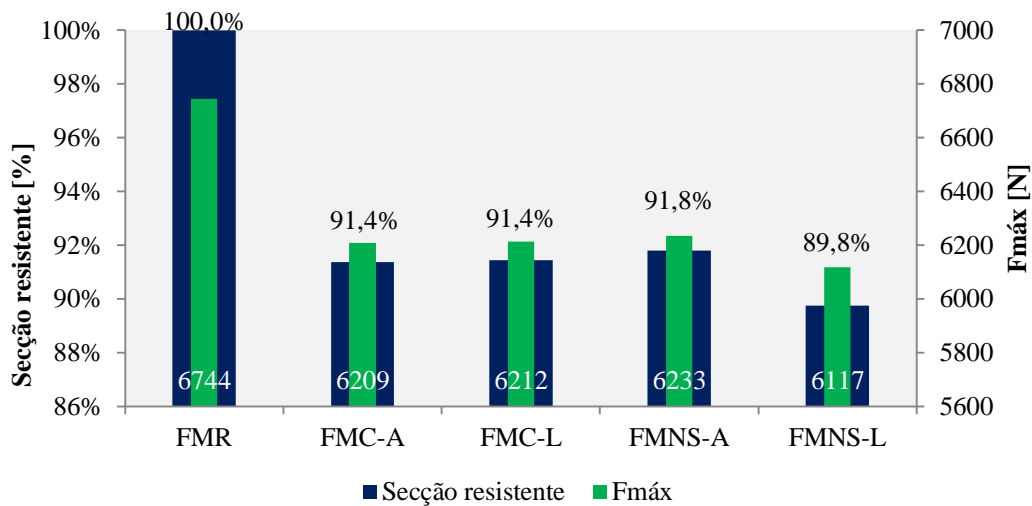


Figura 4.6 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 60 dias de envelhecimento

### Ensaio aos 90 dias

A partir Figura 4.7 é possível observar que os fios metálicos que registaram uma maior força de rotura e uma maior secção resistente são aqueles que se encontram livres de argamassa sujeitos a ataque por cloretos.

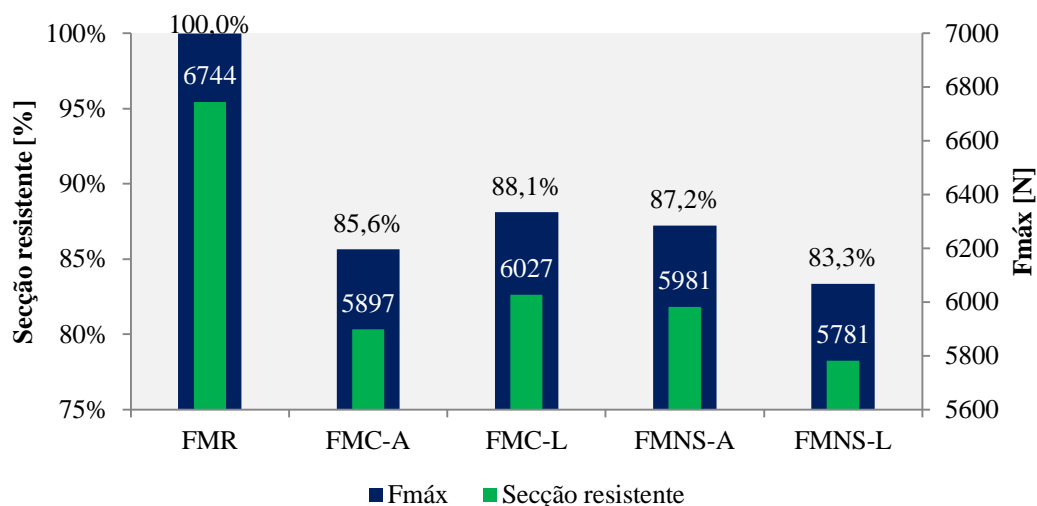


Figura 4.7 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 90 dias de envelhecimento

#### Ensaio aos 120 dias

Na Figura 4.8 verifica-se que os fios livres de argamassa sujeitos a ataque por nevoeiro salino foram aqueles que mais uma vez registaram uma menor força máxima de rotura e uma menor secção resistente

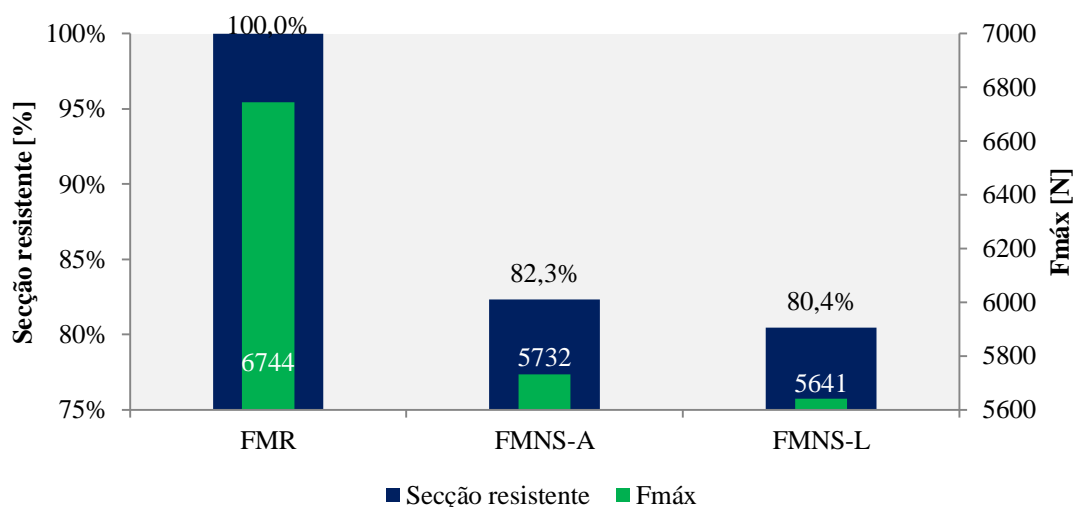


Figura 4.8 - Secção resistente e força máxima de rotura dos fios metálicos aos 120 dias de envelhecimento

#### Análise global de resultados:

A partir da Figura 4.9 e da Figura 4.10 é possível avaliar o comportamento dos fios consoante o tipo de envelhecimento a que os fios metálicos estiveram sujeitos.

Na Figura 4.9 estão registadas as secções resistentes dos fios metálicos sujeitos a envelhecimento artificial por nevoeiro salino. A partir destes valores observa-se que os fios embebidos em argamassa (FMNS-A) no final do ensaio experimental obtiveram uma maior

secção resistente do que os fios que se encontram livres da mesma (FMNS-L). A argamassa atuou como meio protetor do fio metálico, protegendo-o da ação dos sais solúveis.

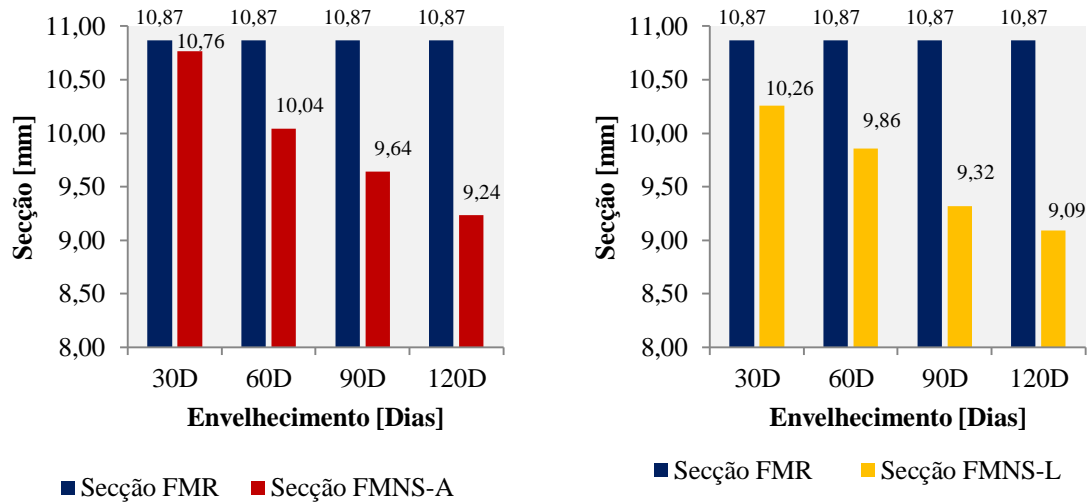


Figura 4.9 - Fios metálicos sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino

Na Figura 4.10 apresentam-se as secções resistentes dos fios metálicos, sujeitos a envelhecimento por cloretos. Dado por terminado este ensaio, registou-se que contrariamente aos fios sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino (FMNS), os fios metálicos embebidos em argamassa, envelhecidos por cloretos (FMC-A), registaram uma secção resistente menor do que os fios livres de argamassa (FMC-L). Uma das justificações existentes para este fenómeno foi o facto de os fios metálicos livres ao longo do processo de envelhecimento por cloretos não terem sido mergulhados na solução de cloretos diariamente.

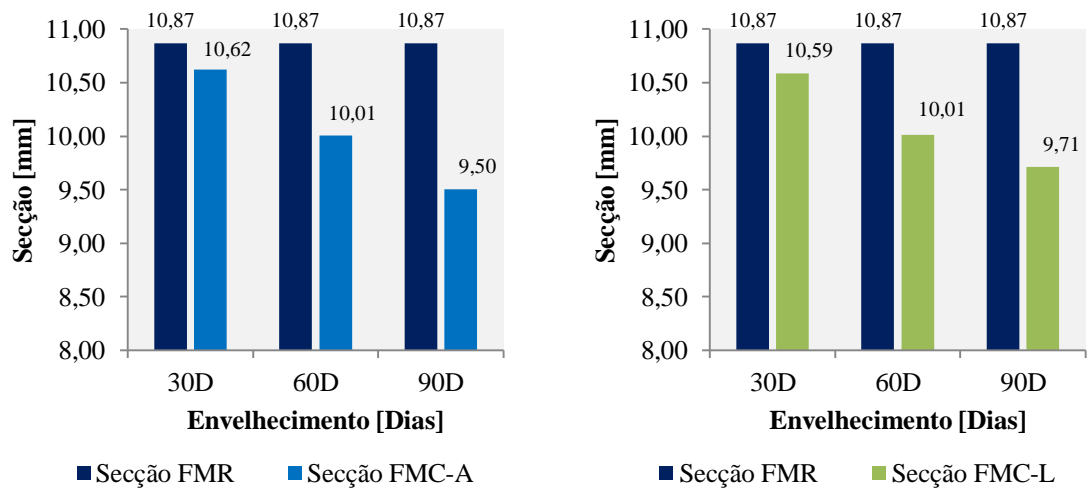


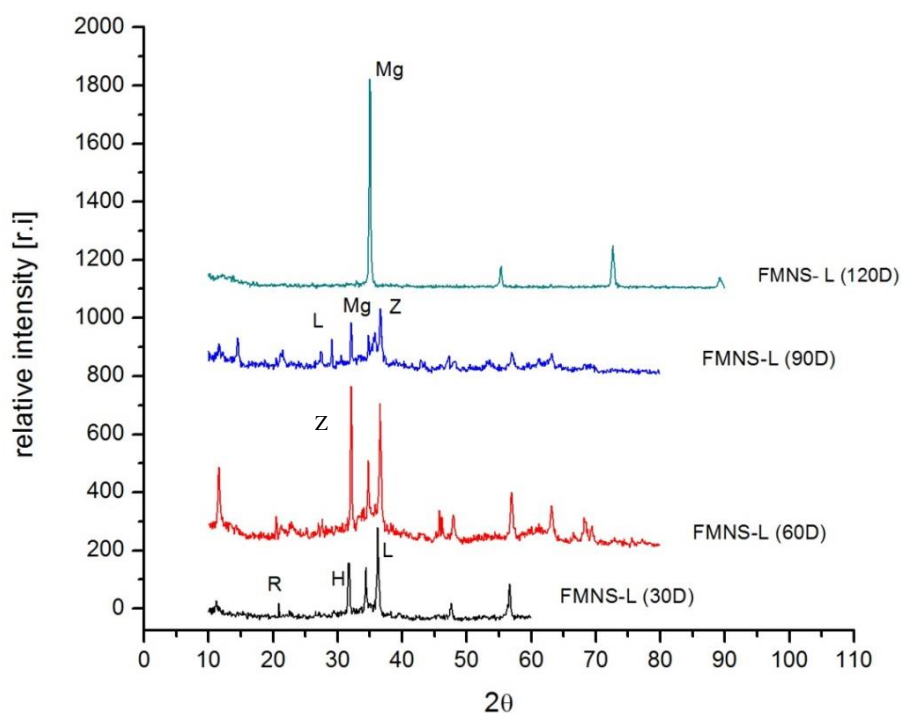
Figura 4.10- Fios metálicos sujeitos a envelhecimento por cloretos

#### 4.1.3. DRX aos fios metálicos

A partir da análise de DRX aos fios metálicos, foi possível identificar alguns dos seus componentes, identificaram-se os picos existentes no gráfico como fases cristalinas.

Na Figura 4.11 estão registados os gráficos de DRX obtidos ao longo do tempo (30, 60, 90 e 120 dias).

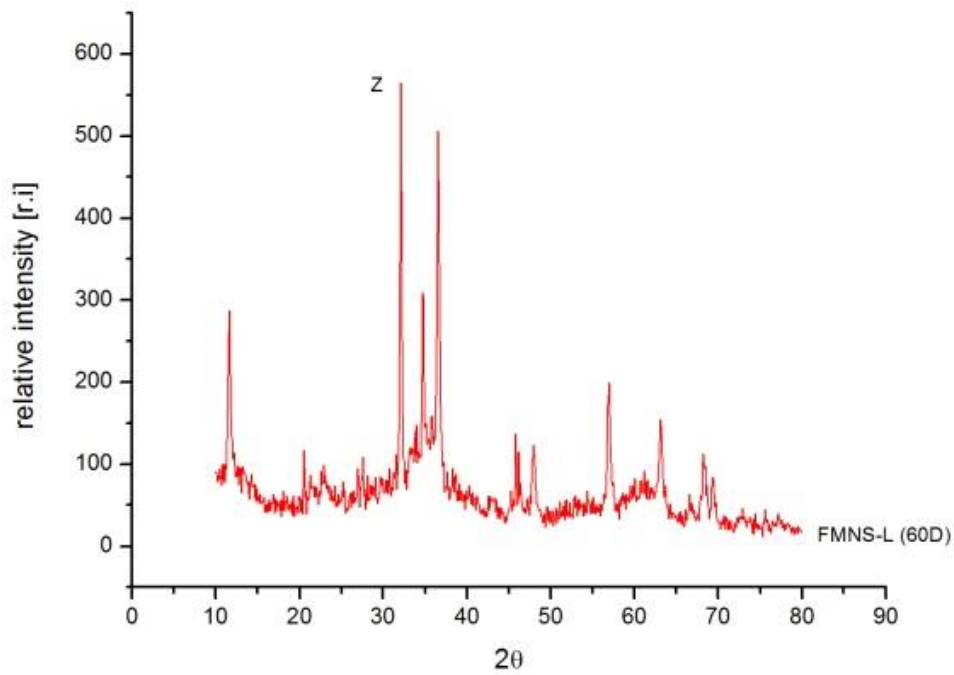
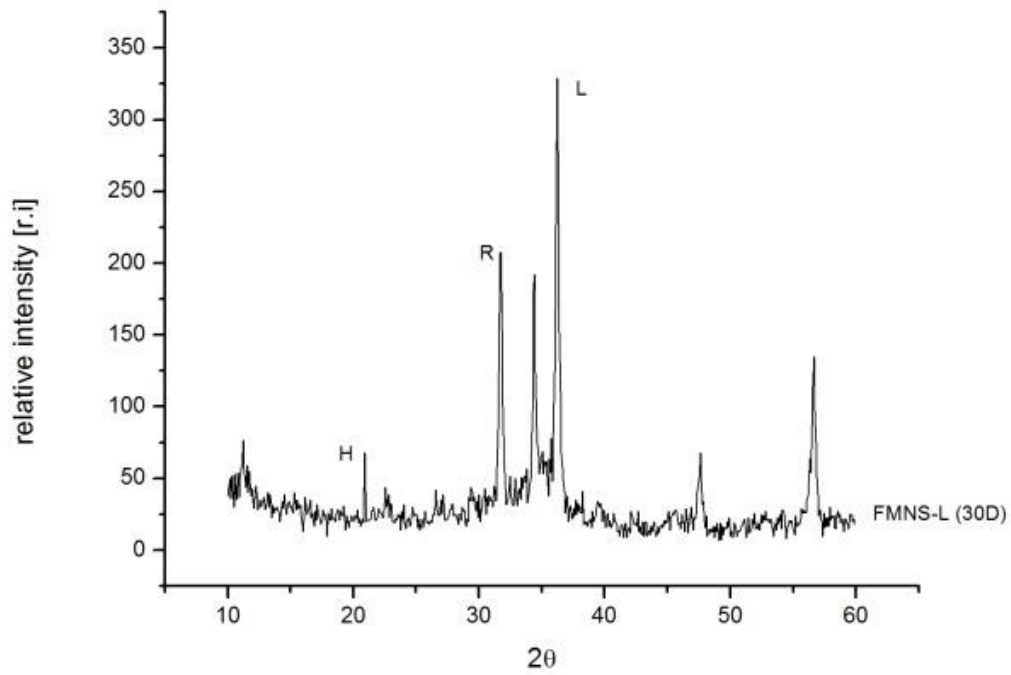
Verifica-se que todos os compostos identificados têm presente o ferro (Fe) e o cloro (Cl), isto porque a oxidação do varão se deu num ambiente exposto a cloretos, mais precisamente numa câmara de nevoeiro salino.



Mg - Magnetite [ $\text{Fe}+2\text{Fe}+3\text{O}_4$ ]; L - Lepidocrocite [ $\text{Fe}+3\text{O}(\text{OH})$ ]; H - Halite [ $\text{NaCl}$ ]; R - Rokuhnite [ $\text{FeCl}_2\text{H}_2\text{O}$ ]; Z - Zincite

Figura 4.11 - DRX dos fios metálicos FMNS-L ao longo do processo de envelhecimento artificial por nevoeiro salino

A Figura 4.12 permite observar melhor os valores registados na análise de DRX para os fios metálicos livres sujeitos ao ataque por nevoeiro salino aos 30, 60, 90 e 120 dias





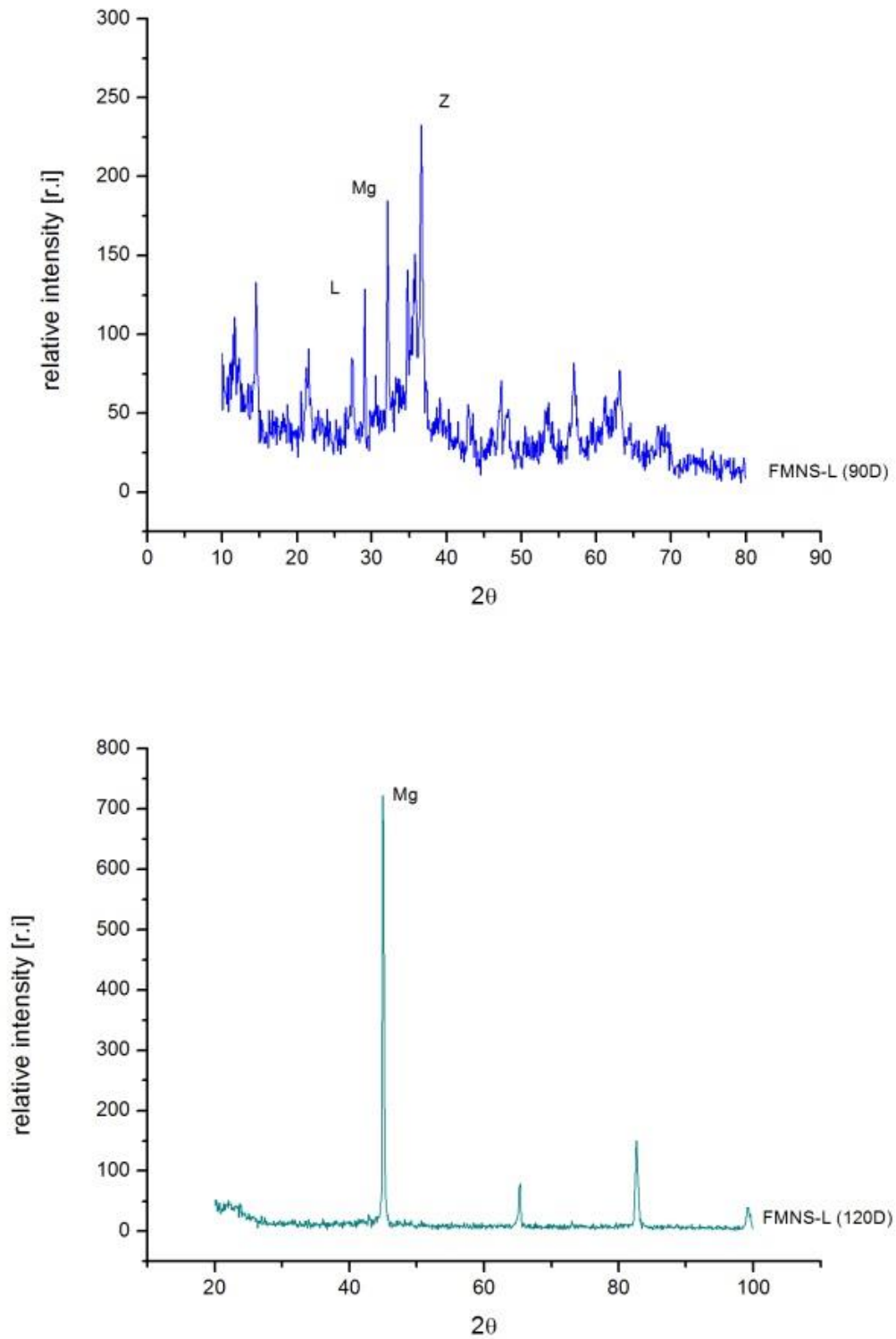


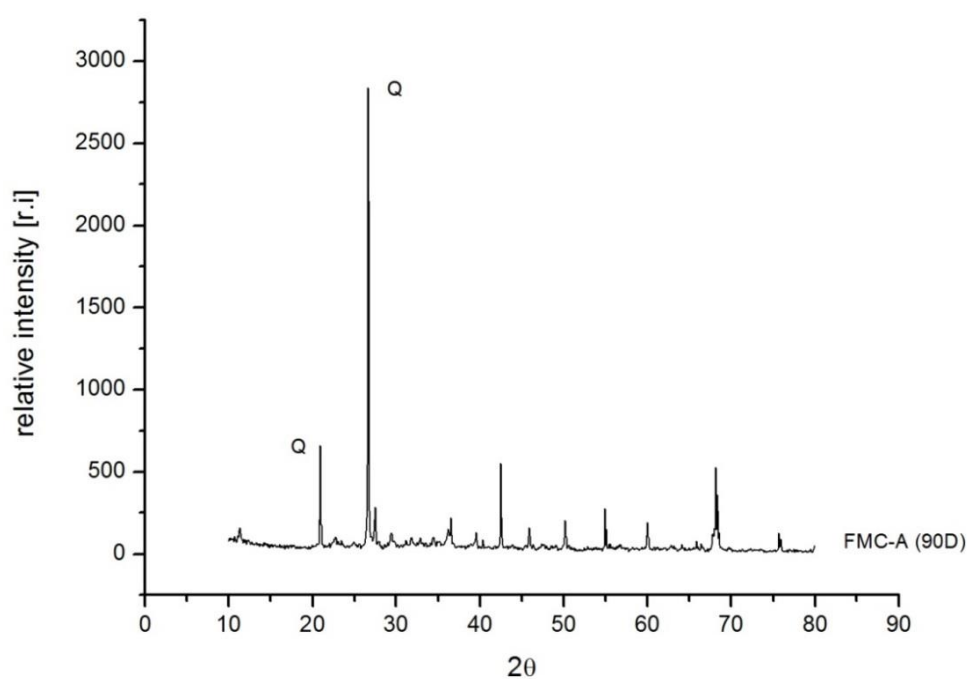
Figura 4.12 - DRX aos fios metálicos livres envelhecidos por nevoeiro salino aos 30, 60, 90 e 120dias

Ao contrário dos fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino que oxidaram bastante, os fios metálicos livres sujeitos a envelhecimento por cloretos não sofreram

praticamente oxidação nenhuma <sup>3</sup>, visto não terem sido mergulhados diariamente na solução de cloretos.

A Figura 4.13 representa o fio metálico em contacto com a argamassa em envelhecimento por cloretos aos 90 dias. Apenas a partir desta idade é que se verificou alguma oxidação do fio dentro da argamassa.

Ao realizar-se a análise por DRX encontrou-se Quartzo na sua constituição, o que se deve ao facto de o fio metálico se encontrar em contacto com a argamassa levando assim a uma contaminação do mesmo.



Q - Quartzo [SiO<sub>2</sub>]

Figura 4.13 - DRX FMC-A aos 90 dias de envelhecimento por cloretos

## 4.2. Argamassa

### 4.2.1. Parâmetros mecânicos

No Quadro 4.1 e nas Figuras Figura 4.15 Figura 4.16 encontram-se os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e resistência à compressão.

<sup>3</sup> A oxidação dos fios metálicos embebidos em argamassa sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino apenas se verificou aos 90 dias.

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico este será tanto maior quanto menor for a deformabilidade do material.

Analisando os vários provetes individualmente e tendo os provetes a mesma constituição, os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico não diferem muito entre si, sendo o provete de argamassa simples PS08 aquele que apresenta uma gama de valores mais altos.

Relativamente ao ensaio de resistência à tração por flexão é também o provete simples PS08 que apresenta valores mais altos em relação ao PS07 e PS09, o mesmo não acontece no ensaio de resistência à compressão onde o valor mais alto pertence ao provete simples PS07.

Quadro 4.1 - Módulo de elasticidade dinâmico [Mpa] obtido por cada provete simples (PS)

Módulo elasticidade dinâmico				
Provetes	Massa [g]	1° Medição [Mpa]	2° Medição [Mpa]	3° Medição [Mpa]
PS07	457,047	1673	1707	1712
PS08	456,343	1694	1707	1749
PS09	452,342	1663	1678	1624

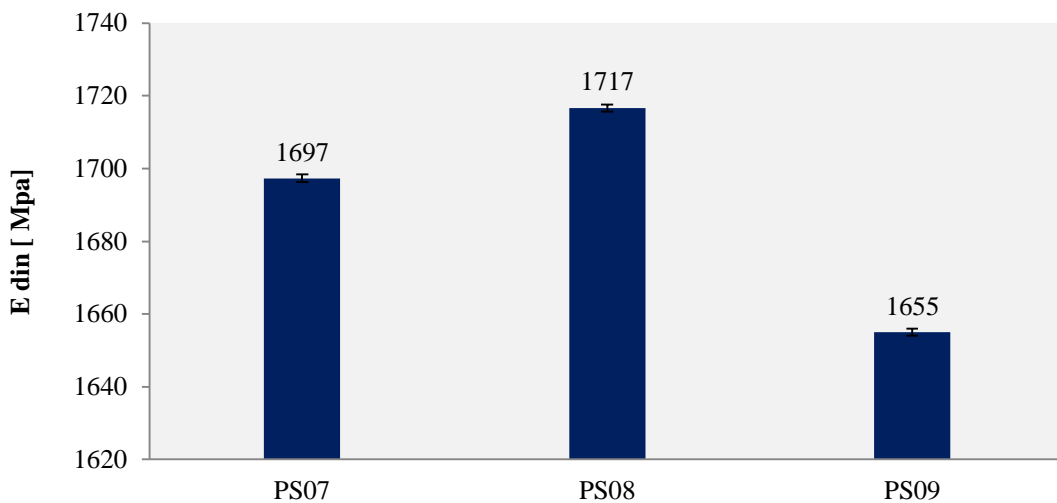


Figura 4.14- Módulo de elasticidade dinâmico

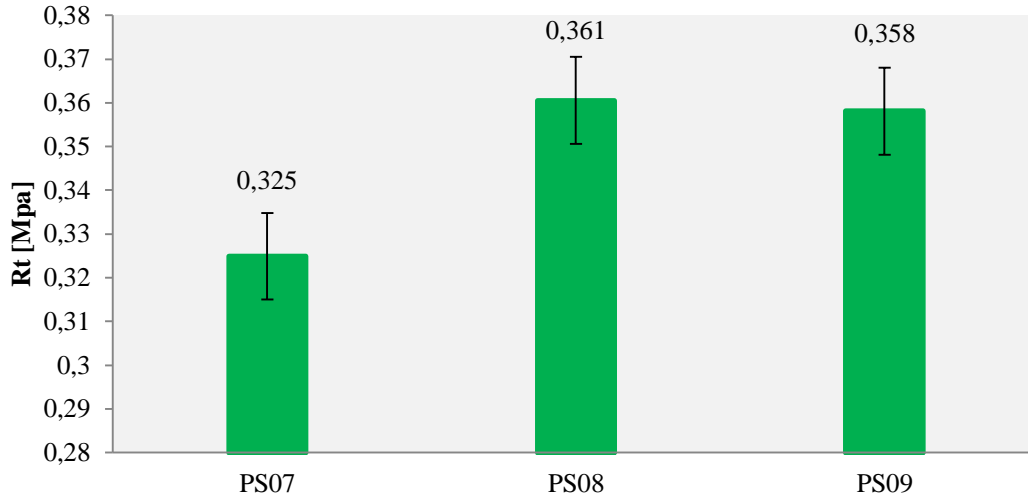


Figura 4.15 - Resistência à tração dos provetes simples

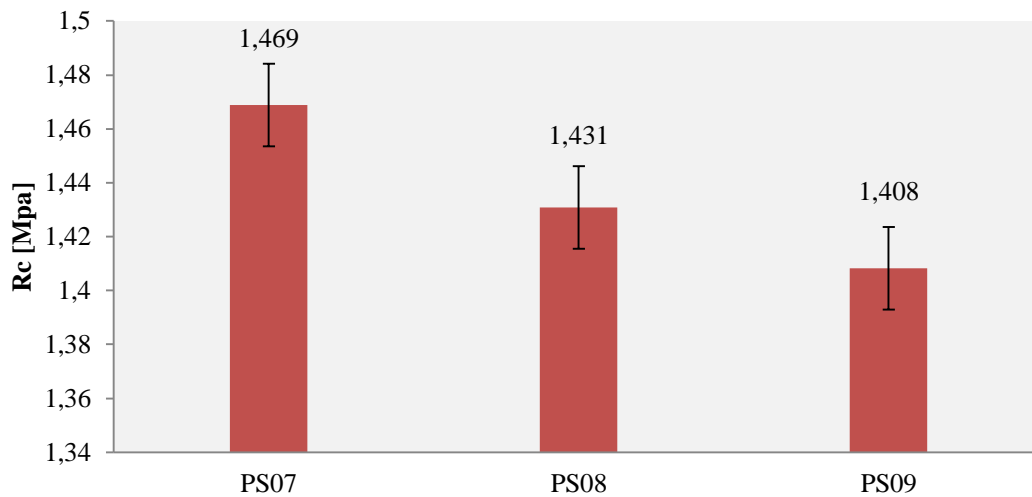


Figura 4.16 - Resistência à compressão dos provetes simples

#### 4.2.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de água por capilaridade permite traçar as curvas de absorção de água por capilaridade, a partir das quais se pode traçar o CC (coeficiente de capilaridade) pelo declive inicial das curvas e o VA (valor assintótico), valor de absorção obtido no troço horizontal (patamar de saturação).

Este ensaio experimental permite avaliar o comportamento das argamassas face à ação da água da chuva e aos ciclos gelo-degelo.

Na Figura 4.17 apresenta-se a curva de absorção capilar obtida e observa-se no que diz respeito à absorção máxima por capilaridade, que o provete que regista o valor mais elevado é o PS08, sendo o mais baixo registado por PS07.

A figura também permite identificar qual o provete que atingiu o patamar de saturação mais rapidamente, respetivamente PS07.

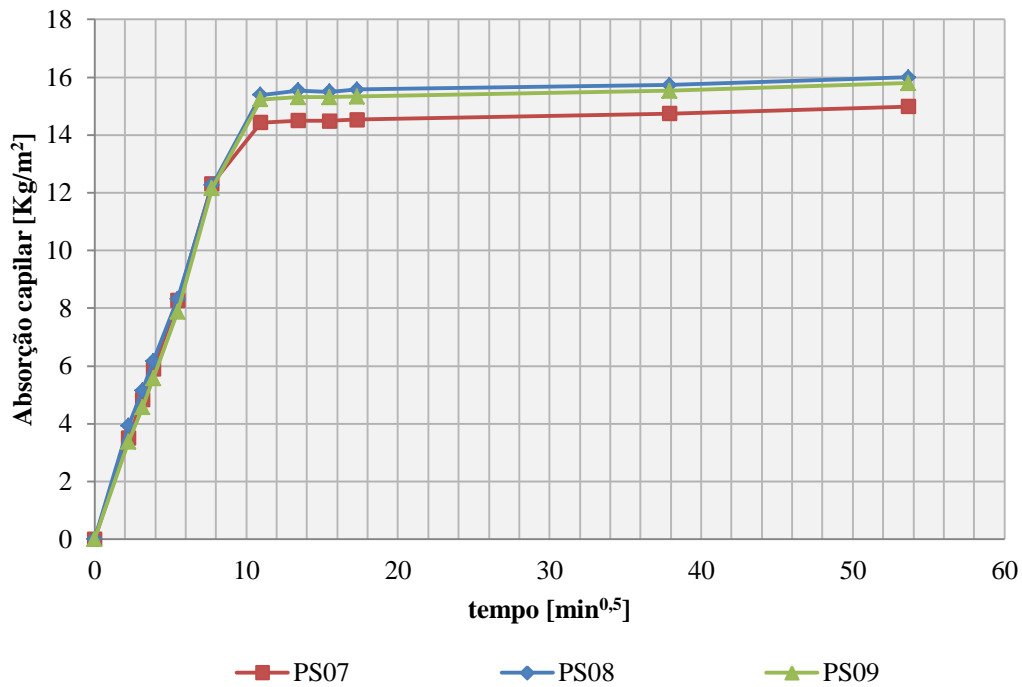


Figura 4.17 - Absorção capilar

Na Figura 4.18 analisa-se num gráfico de coluna o valor de VA (valor assintótico) e CC (coeficiente de capilaridade) obtidos no ensaio experimental.

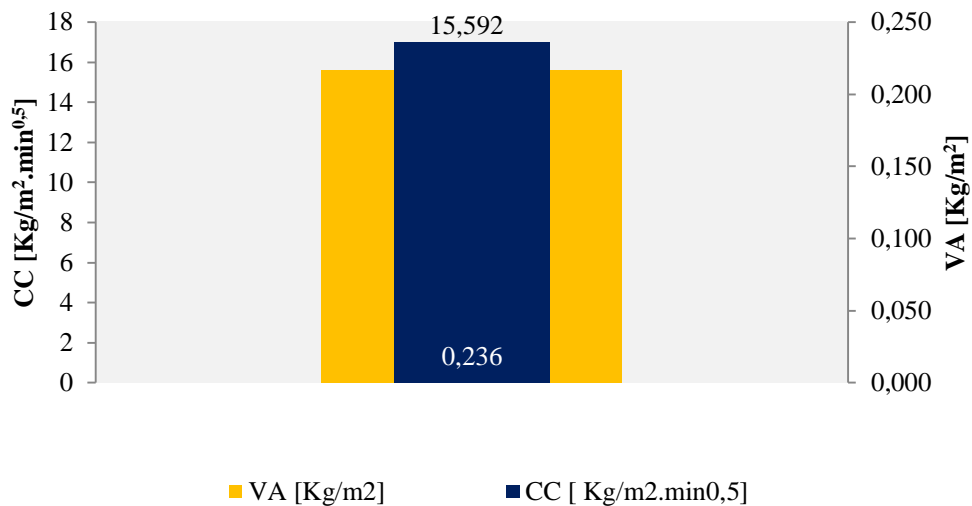


Figura 4.18 - Valores de VA e CC

Para os provetes simples ensaiados registou-se um valor assintótico de 15,59Kg/m<sup>2</sup> e um coeficiente de capilaridade de 0,24Kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>.

### 4.2.3. Secagem

Na Figura 4.19 está representada a curva de evaporação de água dos provetes simples ensaiados e na Figura 4.20 estão representados o IS (índice de secagem) e TS (taxa de secagem). A taxa de secagem permite determinar a velocidade de secagem inicial média das argamassas, quanto maior for a taxa de secagem, maior será a velocidade de evaporação de água.

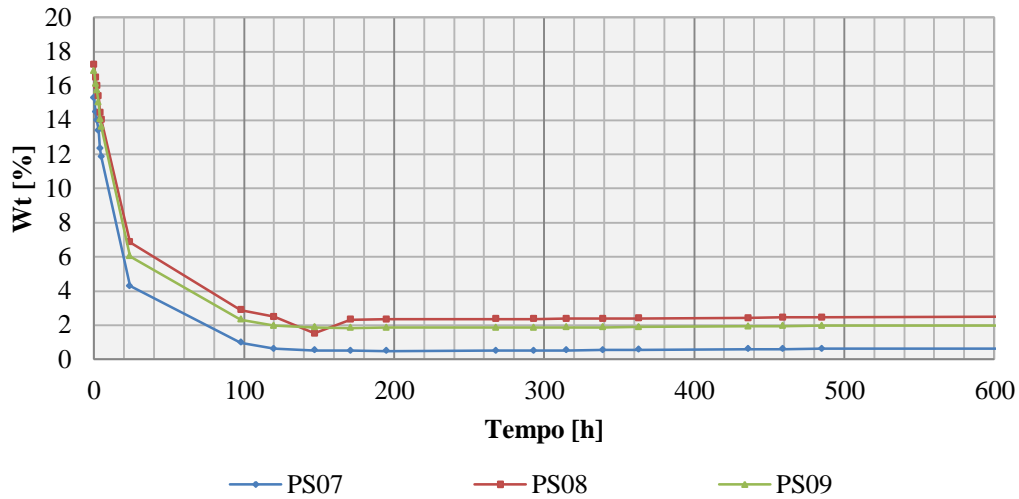


Figura 4.19 – Teor em água

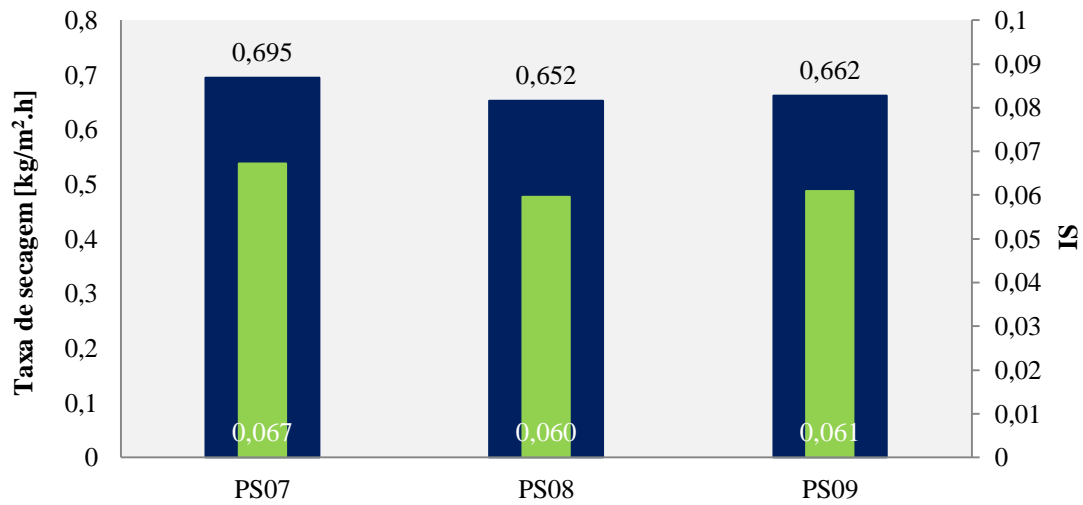


Figura 4.20- Taxa de secagem e Índice de secagem

#### 4.2.4. Porosidade aberta

Na Figura 4.21 e na Figura 4.22 são apresentados os valores de porosidade aberta e de massa volúmica aparente, respetivamente.

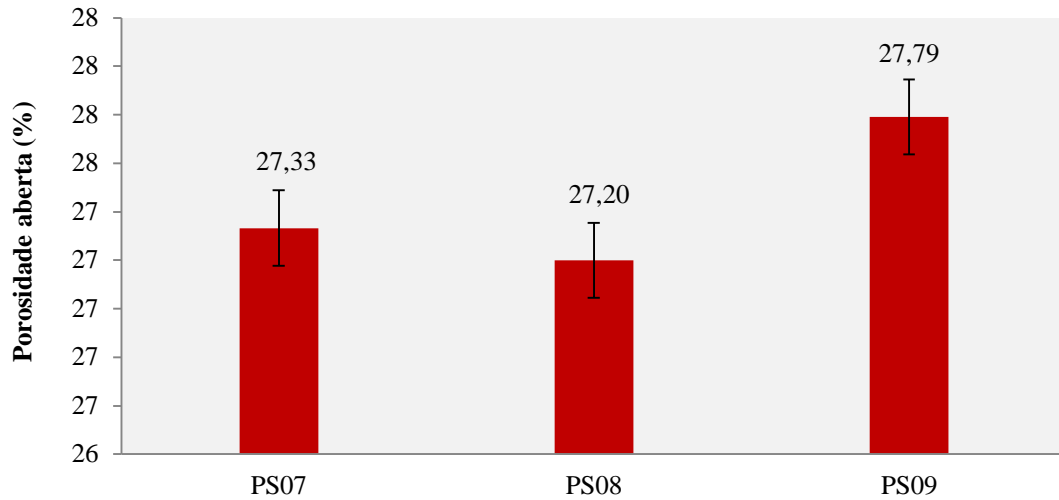


Figura 4.21 - Porosidade aberta

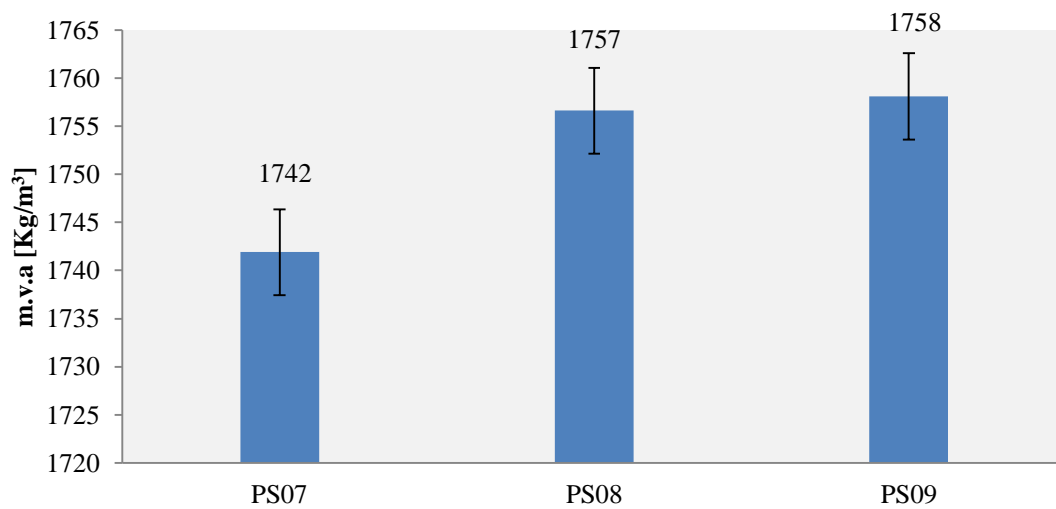


Figura 4.22- Massa volúmica aparente

#### 4.2.5. Resistência aos cloretos

Na Figura 4.23 está representada a percentagem de cloretos retidos nos provetes simples e armados, verifica-se que os provetes armados registaram uma maior retenção de cloretos em relação aos provetes simples, o que poderá levar a uma maior oxidação do fio metálico inserido nos mesmos.

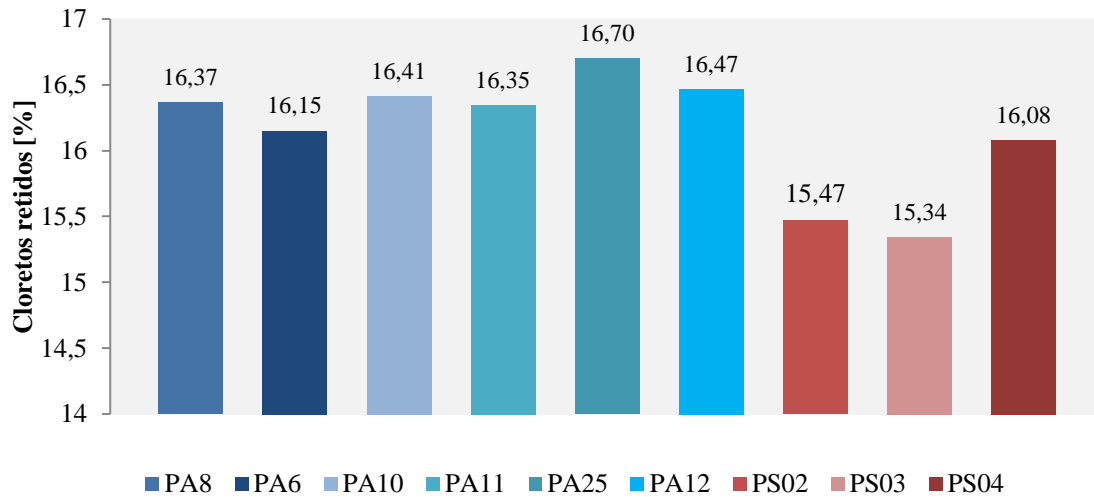


Figura 4.23 - Percentagem de cloretos retidos

A Figura 4.24 e a Figura 4.25 representam a variação de massa dos provetes armados e simples.

Na Figura 4.25 está representada a variação de massa apenas até aos 20 ciclos para uma melhor compreensão de resultados. Conclui-se então que a perda de massa varia por volta dos --1 e 1 %, com a exceção do pico registado ente o vigésimo sétimo e o trigésimo ciclo o que se deveu muito provavelmente à variação de temperatura e humidade causado por problemas técnicos na câmara climática.

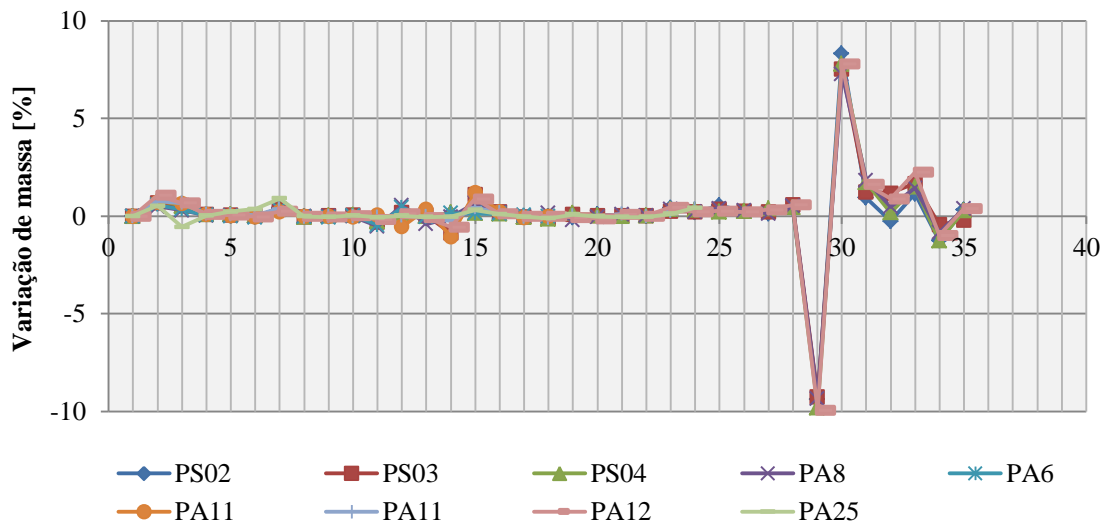


Figura 4.24 - Variação de massa dos provetes até aos 35 ciclos



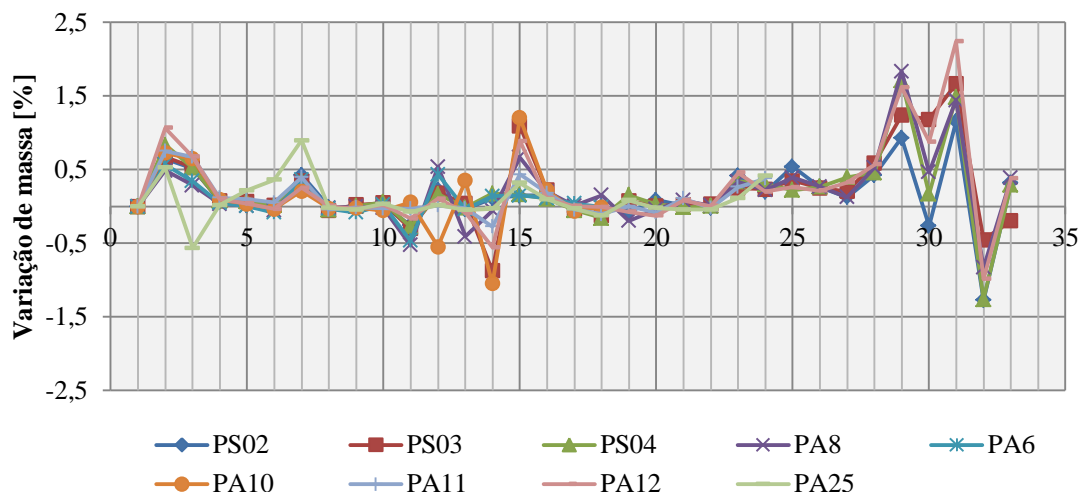


Figura 4.25 - Variação de massa dos provetes até aos 20 ciclos

**Nota:** O pico existente na Figura 4.24 deve-se muito provavelmente às avarias técnicas existentes nas máquinas, estas avarias são referentes a variações de temperatura e de humidade, o que poderá ter levado a uma cristalização dos sais nos provetes.

#### 4.2.6. DRX

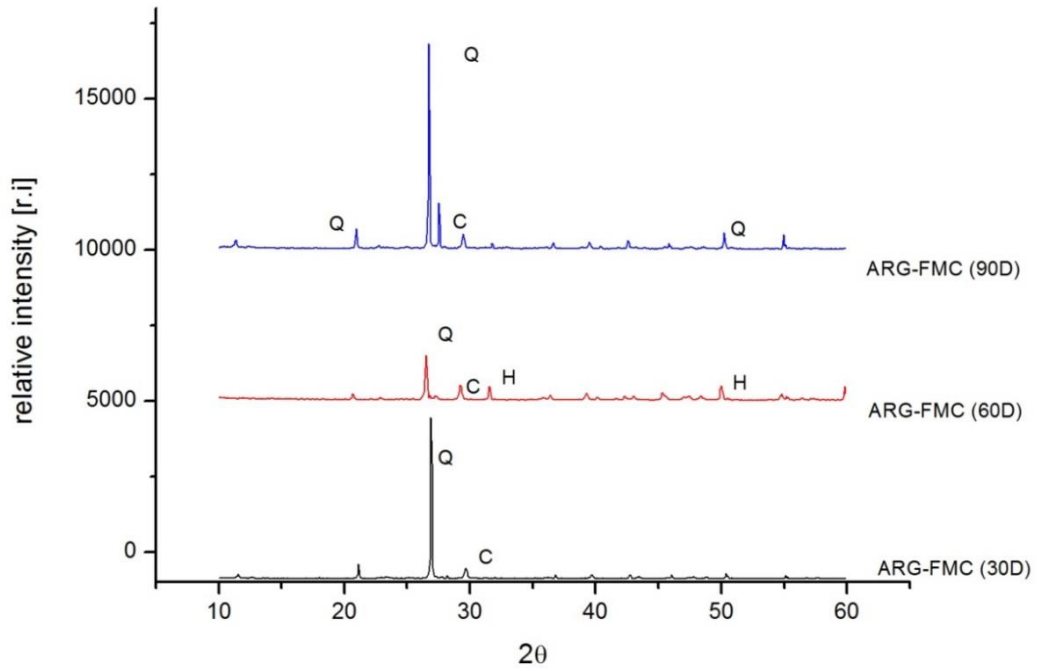
A análise de DRX realizou-se às argamassas na qual os fios se encontravam embebidos, a partir destas é possível observar a contaminação dos mesmos na argamassa.

No Quadro 4.2 observam-se as siglas que representam a argamassa em contacto com o fio metálico de acordo com o envelhecimento a que foram sujeitas.

Quadro 4.2 - Siglas da argamassa em contacto com o fio metálico

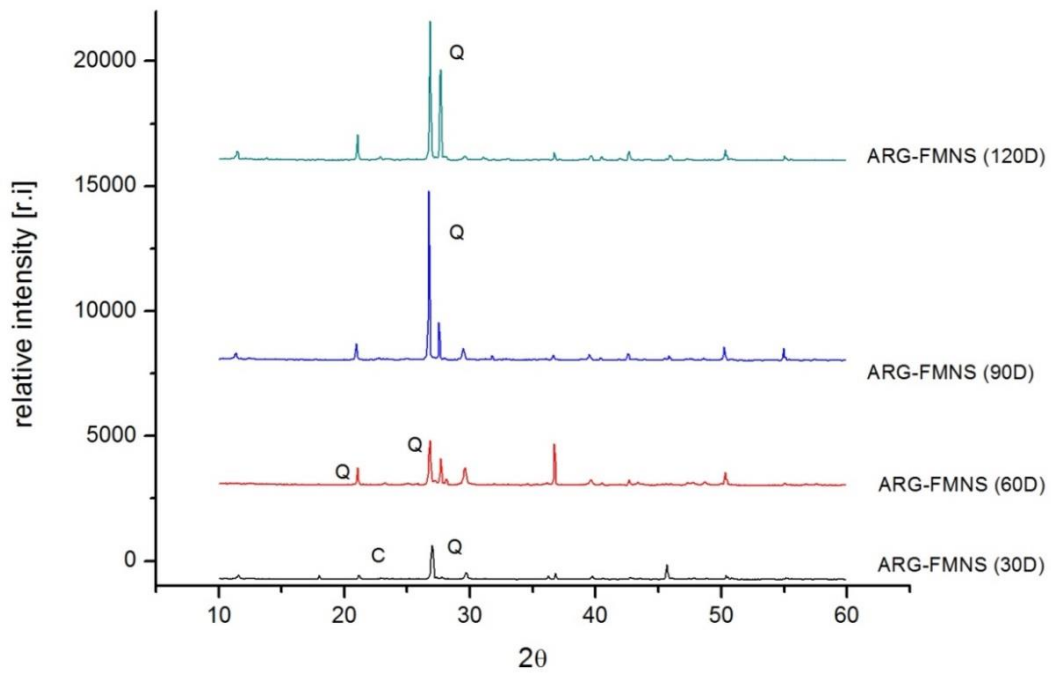
	Siglas	Tipo de envelhecimento
Argamassa em contacto com o fio metálico	ARG-FMC	Cloretos
	ARG-FMNS	Nevoeiro salino

De acordo com as Figura 4.26 Figura 4.27 é possível identificar os vários componentes presentes na argamassa em contacto com o fio metálico. Este ensaio de DRX teve como avaliar se tinha existido contaminação da argamassa por parte do fio metálico.



Q-Quartzo [SiO<sub>2</sub>]; C- Calcite [CaCO<sub>3</sub>]

Figura 4.26 - DRX ARG-FMC ao longo do processo de envelhecimento artificial



Q - Quartzo [SiO<sub>2</sub>]; C - Calcite [CaCO<sub>3</sub>]

Figura 4.27 -DRX ARG-FMNS ao longo do processo de envelhecimento artificial

### 4.3. Comparação com outros autores

#### 4.3.1. Fios metálicos

##### Comportamento mecânico

Comparando os resultados do ensaio à tração dos fios metálicos de referência com os resultados obtidos por Fernando Pinho no seu trabalho de investigação (F.S.PINHO, 2007), representados na Figura 4.28, podemos observar que os valores obtidos não podem ser comparados pois apresentam valores muito diferentes, apesar do fio metálico ensaiado pertencer à mesma amostra.

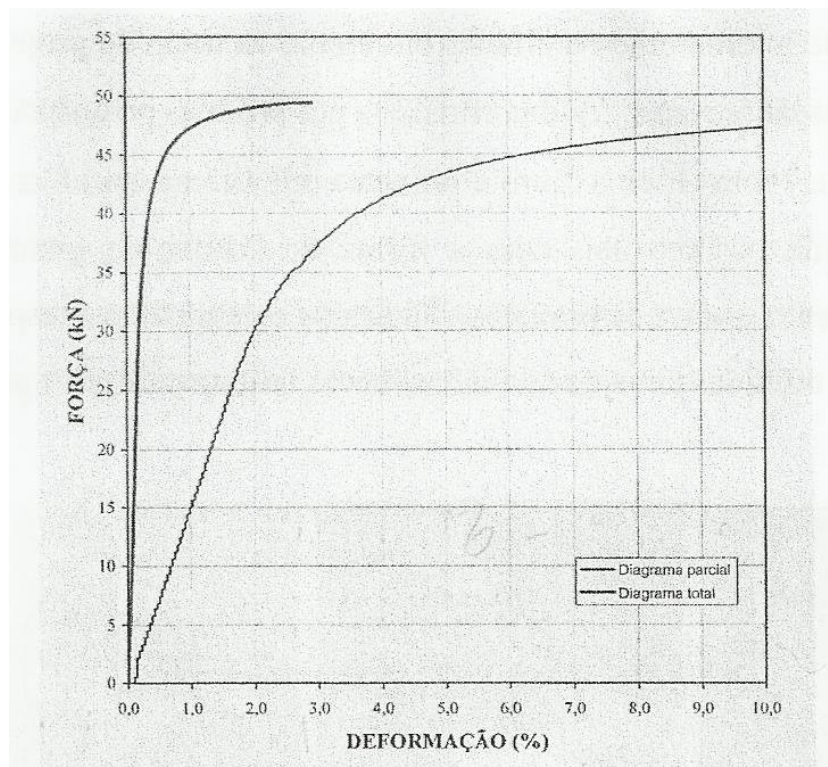


Figura 4.28 – Ensaio de tração de um varão metálico utilizado no confinamento transversal no trabalho de investigação desenvolvido por Fernando Pinho (F.S.PINHO, 2007)

#### 4.3.2. Argamassa

##### Comportamento mecânico

Comparando os resultados apresentados no Figura 4.3, com os valores obtidos no âmbito do presente trabalho é possível afirmar que para o módulo de elasticidade dinâmico e para a resistência à compressão, os valores mais altos foram obtidos no presente trabalho, já para a resistência à tração o valor mais alto foi obtido pela autora Paulina Faria (FARIA, 2004).

Quadro 4.3 - Resultados de outros autores para o comportamento mecânico da argamassa

Ensaio realizado	Tiago Branco		Rodrigo Massena		André Bandeira		Nuno Felgueiras		Paulina Faria		Lara Neves		
	28D	90D	28D	60D	90D	28D	180D	28D	60D	90D	60D	60D	
Módulo elasticidade dinâmico [Mpa]	Méd	4245	1629	402	1682	2156	2275	1360	1335	2035	1891	1900	1689,70
	Dp	95	100	28	75	151	49	87	62	511	502	10	25,95
Resistência à tração [Mpa]	Méd	0,59	0,16	0,23	-	0,03	0,17	0,17	0,12	0,14	0,04	0,52	0,35
	Dp	0,03	0,02	0,30	-	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Resistência à compressão [Mpa]	Méd	1,16	0,81	0,30	0,14	0,17	0,30	0,53	0,31	0,14	0,11	3,01	1,44
	Dp	0,01	0,05	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,08	0,25	0,03

### Comportamento face à ação da água

Consultando o Quadro 4.4 observa-se que o valor mais elevado em relação à TS (taxa de secagem) e o valor mais baixo de IS (índice de secagem) se verificaram no presente trabalho experimental, o que se deveu ao facto de não ter sido utilizada película aderente de polietileno a envolver os provetes, sendo assim os provetes aquando do ensaio de secagem perderam área por uma secção muito maior do que provetes ensaiados nos outros trabalhos experimentais.

Em relação ao CC (coeficiente de capilaridade) o valor mais elevado foi obtido pelo autor André Bandeira aos 28 dias de idade da argamassa.

A autora Paulina Faria (FARIA, 2004) foi que obteve resultados mais elevados para o ensaio de porosidade aberta.

Quadro 4.4 - Resultados de outros autores para o comportamento face à ação da água da argamassa

Ensaio realizado	Tiago Branco		Rodrigo Massena			André Bandeira		Nuno Felgueiras			Paulina Faria	Lara Neves	
	28D	90D	28D	60D	90D	28D	180D	28D	60D	90D	60D	60D	
Coeficiente de capilaridade [Kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	Méd	1,20	1,61	3,68	-	-	4,67	2,59	5,14	-	4,50	0,24	0,24
	Dp	0,07	0,08	-	-	-	0,25	0,21	0,02	-	2,28	0,01	
Valor assintótico [Kg/m <sup>2</sup> ]	Méd	23,10	26,80	42,76	-	-	23,60	24,70	44,69	-	40,57	24,40	15,59
	Dp	2,10	1,00	-	-	-	0,80	0,90	-	-	-	1,60	
Índice de secagem	Méd	0,29	0,46	0,53	-	-	0,20	0,12	0,28	-	0,47		0,06
	Dp	0,01	0,02	0,02	-	-	0,02	0,10	0,03	-	0,00		0,00
Taxa de secagem [Kg/m <sup>2</sup> .h]	Méd	0,46	0,16	-	-	-	0,09	0,10	-	-	-		0,67
	Dp	0,02	0,02	-	-	-	0,00	0,00	-	-	-		0,02
Porosidade aberta [%]	Méd	32,80	35,70	-	-	-	32,20	31,90	34,00	26,00	28,00	35,00	27,44
	Dp	0,30	0,50	-	-	-	1,50	0,40	0,60	1,50	0,00	0,23	0,31

#### 4.3.3. Resistência aos cloretos

Observando o Quadro 4.5 podemos observar que os valores divergem muito em relação aos diferentes autores, uma das razões existentes para esta discrepância de valores deve-se ao facto de terem ocorrido problemas técnicos na câmara climática utilizada na realização de ensaio de resistência aos cloretos, sendo assim os resultados obtidos no presente trabalho podem ser considerados pouco fidedignos, concluindo então que os resultados obtidos pela autora Paulina Faria são mais aceitáveis no que diz respeito a este ensaio.

Quadro 4.5 - Resultados de outros autores para a resistência da argamassa face aos cloretos

Ensaio realizado	Paulina Faria		Lara Neves	
	60D		60D	
Resistência aos cloretos [%]	Cloretos retidos [%]	Méd 30c	5,20	11,13
	Varição de massa [%]	Méd 30c	-0,40	-0,04



## **5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **5.1. Conclusões**

Esta dissertação iniciou-se com uma breve exposição teórica sobre paredes de alvenaria de pedra, técnicas de reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra tradicional, principais anomalias em construções de alvenaria de pedra tradicional, reabilitação estrutural, produção e oxidação do ferro e aço. Posteriormente realizou-se uma breve análise sobre os ensaios realizados para definir o comportamento mecânico, avaliar o comportamento face a água e a resistência aos sais solúveis (cloretos).

O trabalho experimental realizado no DEC-FCT/UNL baseou-se em algumas normas europeias, documentos ou especificações utilizados sempre que necessário ao desenvolvimento do mesmo.

O presente estudo é o seguimento da tese de doutoramento intitulada “Paredes de Alvenaria ordinária- Estudo experimental com modelos simples e reforçados”, com o qual se pretende estudar a durabilidade de fios metálicos, para que futuramente se possa demonstrar a sua viabilidade para aplicação de reboco armado na reabilitação de edifícios.

Finalizada a dissertação, considera-se que os objetivos iniciais foram cumpridos.

No que diz respeito ao comportamento do fio metálico embebido na argamassa verificou-se que a mesma serviu como meio de proteção do fio perante o processo de oxidação.

Observou-se que a partir dos 90 dias de envelhecimento por cloretos se deu início ao processo de oxidação do fio metálico embebido em argamassa. Relativamente aos fios sujeitos a envelhecimento por câmara de nevoeiro salino não se registou oxidação, tendo o ensaio terminado aos 120 dias de idade. Sendo assim, é possível concluir que o envelhecimento por cloretos se revelou mais danoso para os fios do que o envelhecimento por nevoeiro salino.

Ao contrário do que seria expectável os fios livres de argamassa sujeitos a ataque por cloretos apresentaram uma maior secção resistente final do que os embebidos em argamassa, o que se deveu a uma falha no cumprimento do procedimento experimental. Os fios metálicos livres deveriam ter sido submersos em solução de cloretos o que não se verificou. Este lapso fez com que a camada de sais tivesse desaparecido da superfície dos fios, devido aos ciclos de humidade relativa da câmara climática onde os fios se encontravam, o que levou a que aquando o ensaio de resistência à tração estes apresentassem uma maior força de rotura relativamente aos fios embebidos em argamassa sujeitos ao mesmo tipo de ataque.

O facto de se ter verificado uma oxidação dos fios sujeitos a envelhecimento por cloretos aos 90 dias e não nos fios sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino, está relacionado com o procedimento de ensaio, ou seja, enquanto os fios envelhecidos por cloretos foram mergulhados

numa solução de cloretos, os fios envelhecidos por nevoeiro salino apenas foram vaporizados com a mesma, este processo (imersão em solução de cloretos) levou a uma maior absorção do meio (argamassa de cal aérea) de solução de cloretos, provocando assim maior danos no provete e no fio que nele se encontrava inserido. Nos fios sujeitos a envelhecimento por nevoeiro salino não houve uma absorção tão significativa, levando assim à formação de sais no exterior do provete, não atingido o fio tao prontamente no seu interior.

## **5.2. Desenvolvimentos futuros**

Finalizado este trabalho experimental de avaliação da durabilidade de fios metálicos embebidos em argamassa de cal aérea e metacaulino, propõe-se alguns desenvolvimentos futuros no âmbito do estudo de soluções de reforço armado, nomeadamente:

- Repetição do ensaios de envelhecimento artificial, nomeadamente em cloretos e nevoeiro salino para que se possa determinar o valor de referência a partir do qual os fios metálicos deixam de perder secção;
- Substituição da pozolana utilizada como aditivo na argamassa de cal aérea;
- Realização de mais ensaios no Departamento de Ciências de Materiais, tais como SEM ou microscopia de varrimento;
- Realização de mais ensaios de caraterização para este tipo de reboco armado;



## 6. BIBLIOGRAFIA

- 25-PEM, R. T. (1980). *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. test n°II-5-Evaporation curve. Materials and structures, volume 13.* Paris.
- A.GAMEIRO, VELOSA, A., R.VEIGA, SILVA, A., & P.FARIA. (2012). *Evolução das reações das argamassas de cal aérea e metacaulino - projeto metacal.* Lisboa: LNEC.
- ALMEIDA, C., GUEDES, A.ÂREDE, & COSTA, C. (2011). *Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls-Construction and buildings materials.*
- ALVAREZ, J., SEQUEIRA, C., & COSTA, M. (2005). *Ensinamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas. APFAC- 1ª Confrência de argamassas de construção.* Lisboa.
- APPLETON, J. (2003). *Reabilitação de Edifícios Antigos-Patologias e tecnologias de intervenção* (1ª ed.). Amadora: Edições Orion.
- BANDEIRA, A. D. (2012). *Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica com metacaulino.* Caparica: FCT-UNL.
- BARRETO, M. C. (2010). *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face á acção de sais solúveis.* Lisboa: FCT- UNL.
- BRANCO, T. (2013). *Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino.* FCT-UNL.
- C125, A. (s.d.). *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates.* American Society for Testing and materials.
- CEN. (1998/2006). *Methods of test for mortar masonry-part2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars.* Brussels.
- CEN. (1999/2004/2006). *Methods of test of for mortar masonry( by flow table).* Brussels.
- CEN. (1999/2006). *Methods of test for mortar masonry - part 2: Determination of flexural and compressive strenght of hardened mortar .* Brussels: EN 1015-11:1999.
- CEN. (2002). *Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.* Brussels: EN 1015-18:2002.
- CEN. (2009). *Conservation of cultural property. Test ,methods. Determination of water absorption by capilarity.* Brussels: EN 15801.
- COUTINHO, A. S. (1997). *Fabrico e propriedades do betão - Volume I.* Lisboa: Lnecc.
- Estatística, I. N. (2013). *O parque habitacional e a sua reabilitação - Análise e evolução 2001-2011.* LNEC.
- F.S.PINHO, F. (2007). *Paredes de alvenaria ordinária- Estudo experimental com modelos simples e reforçados.* Lisboa: FCT-UNL.
- F.S.PINHO, F., F.C.BAIÃO, M., & J.G.LÚCIO, V. (2008). *Experimental analyses of rubble stone masonry walls strengthened with reinforced lime and cement mortar rendering and transversal ties.* Lisboa: LNEC.
- F.SMITH, w. (1998). *Principios de ciência e engenharia dos materiais.* McGraw-Hill.

- FARIA, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas*. Lisboa: FCT-UNL.
- FARIA, P. (2012). Argamassas sustentáveis. *2º Conferência de Construção e reabilitação Sustentável de edifícios no Espaço Lusófono* (p. 12). Lisboa: FCT-UNL.
- FCT/UNL. (1996). *Fe02 - Pedras naturais e artificiais. Determinação de porosidade aberta*. Caparica.
- FCT/UNL. (1996). *Fe06 - Pedras naturais e artificiais. Determinação de água por capilaridade*. Caparica.
- FCT/UNL. (1996). *Fe08 - Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Caparica.
- FCT/UNL. (1996). *Fe19 - Análise de argamassas. Preparação de provetes*. Caparica: FCT/UNL.
- FCT/UNL. (1999). *Fe 12 - Pedras naturais e artificiais. Determinação de resistência à acção dos cloretos*. Caparica.
- FCT/UNL. (1999). *Fe27 - Análise de argamassas. Determinação de resistência à flexão e compressão*. Caparica: FCT/UNL.
- FELGUEIRAS, N. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferentes humidades relativas*. Caparica: FCT- UNL.
- GRILO, J. P. (2013). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Lisboa: FCT-UNL.
- IPQ. (2000). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - parte 1: análise granulométrica. Método de peneiração*. Caparica, IPQ: NP EN 933-1.
- IPQ. (2002,b). *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Caparica, IPQ.
- IPQ. (2006). *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da medição de frequência de ressonância fundamental*. Caparica: NP EN 14146:2006.
- IPQ. (2008). *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica: NP EN 459-1.
- LNEC. (2006). Os revestimentos antigos e a identidade dos edifícios. *Arquitectura Ibérica nº12*. Porto.
- LÚCIO, V. (2009). *Estruturas de Betão Armado I*. FCT/UNL.
- MARTINS, N. F. (2012). *Reforço de paredes de edifícios antigos com base em soluções que incorporem confinamento transversal*. Lisboa: FCT-UNL.
- MASSENA, R. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino com exposição natural*. Caparica: fct-unl.
- MAURÍCIO, T. (2012). *Rebocos armados aplicados em paredes de edifícios antigos e novos*. Lisboa: FCT- UNL.
- PACHECO, R. P. (2012). *Caracterização de aços para embutimento*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- PINHO, F. F. (2ª edição, 2008). *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. Lisboa: LNEC.
- PUIM, P. (2010). *Controlo e reparação de anomalias devidas à presença de sais solúveis em edifícios antigos*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

RATO, V. M. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento das argamassas*. Lisboa: FCT-UNL.

SOUZA, L. d. (2009). <http://www.ebah.com.br/>.

VEIGA, M. d., & TAVARES, M. (2002). Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. *A indústria das tintas do século XXI. APTETI*. Lisboa.


VELOSA, A., & VEIGA, R. (2007). *lime metakaolin mortars*. Lisboa: LNEC.



# ANEXOS

## Fichas usadas para identificação de componentes no ensaio de DRX

06-0696		Wavelength= 1.5405				*
Fe		2 $\theta$	Int	h	k	l
Iron		44.671	100	1	1	0
		65.018	20	2	0	0
		82.329	30	2	1	1
Iron, syn		98.940	10	2	2	0
		116.378	12	3	1	0
		137.125	6	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:						
Cut off: Int.: Diffract. I/lor.: I/lor.:						
Ref: Swanson et al., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, IV, 3 (1955)						
Sys.: Cubic S.G.: Im $\bar{3}$ m (229)						
a:	2.8664	b:		c:	A:	C:
$\alpha$ :		$\beta$ :		$\gamma$ :	Z: 2	mp:
Ref: Ibid.						
Dx: 7.875 Dm: SS/POM: F $\theta$ = 225(.0044 . 6)						
Color: Gray, light gray metallic						
Pattern taken at 25 C. CAS #: 7439-89-6. The iron used was an exceptionally pure rolled sheet prepared at the NBS, Gaithersburg, Maryland, USA., [Moore, G., J. Met., 5 1443 (1953)]. It was annealed in an H $_2$ atmosphere for 3 days at 1100 C and slowly cooled in a He atmosphere. Total impurities of sample <0.0013% each metals and non-metals. $\gamma$ -Fe (fcc)=(1390 C) $\delta$ -Fe (bcc). Opaque mineral optical data on specimen from Meteorite: RR2Re= 57.7, Disp.=16, VHN=158 (mean at 100, 200, 300), Color values=.311, .316, 57.9.						
Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. W type. Iron SuperGroup, 1C-disordered Group. Also called: ferrite.						
PSC: cl2. See ICSD 64795 (PDF 85-1410). Mwt: 55.85.						
Volume[CD]: 23.55.						

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

19-0629		Wavelength= 1.54056				
Fe+2Fe2+3O4		2 $\theta$	Int	h	k	l
<b>Iron Oxide</b>		18.269	8	1	1	1
		30.095	30	2	2	0
		35.422	100	3	1	1
<b>Magnetite, syn</b>		37.052	8	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54056 Filter: Ni Beta d-sp:		43.052	20	4	0	0
Cut. off: Int.: Diffract. I/ICor.: 4.90		53.391	10	4	2	2
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 5, 31 (1967)		56.942	30	5	1	1
		62.515	40	4	4	0
		65.743	2	5	3	1
		70.924	4	6	2	0
		73.948	10	5	3	3
<b>Sys.: Cubic</b> S.G.: Fd $\bar{3}$ m (227)		74.960	4	6	2	2
a: 8.396 b: c: A: C:		78.929	2	4	4	4
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 8 mp:		86.702	4	6	4	2
Ref: Ibid.		89.617	12	7	3	1
		94.425	6	8	0	0
		102.224	2	6	6	0
		105.219	6	7	5	1
Dx: 5.197 Dm: 5.176 SS/POM: F $_{2\theta}$ = 58(.0132 , 34)		108.205	4	6	6	2
		110.269	4	8	4	0
$\omega$ : $\eta$ $\theta$ $\beta$ : 2.42 $\epsilon$ $\gamma$ : Sign: 2V:		118.736	2	6	6	4
Ref: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I, 698		122.118	6	9	3	1
		128.032	8	8	4	4
		138.651	4	10	2	0
		143.235	6	9	5	1
		144.848	4	10	2	2
Color: Black						
Pattern taken at 25 C. Sample obtained from the Columbian Carbon Co., New York, NY, USA. Spectrographic analysis showed the following major impurities: 0.01 to 0.1% Co, 0.001 to 0.01% Ag, Al, Mg, Mn, Mo, Ni, Si, Ti and Zn. Other data 25-1378. Opaque mineral optical data on specimen from Braastad, Norway: RR2Re=20.1, Disp.=16, VHN100=592, Color values=.311, .314, 20.1, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. a=8.3967 refined in 1975. Al2 Mg O4 type. Spinel SuperGroup, 1C-oxide Group. Tungsten used as an internal stand. PSC: cF56. To replace 11-614. See also 26-1136. See ICSD 20596 (PDF 72-2303); See ICSD 27898 (PDF 74-1909); See ICSD 29129 (PDF 75-449); See ICSD 31157 (PDF 75-1610); See ICSD 36314 (PDF 76-1849); See ICSD 30860 (PDF 75-1372); See ICSD 65338 (PDF 79-418); See ICSD 65340 (PDF 79-418); See ICSD 65341 (PDF 79-419); See ICSD 68181 (PDF 80-389); See ICSD 68182 (PDF 80-390); See ICSD 75627 (PDF 82-1533). Optical data reference: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I, 698. Structural reference: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I, 698. Mwt: 231.54. Volume[CD]: 591.86.						



© 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2