



Águeda Ricardina Figueira Gonçalves
Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação da durabilidade de fitas metálicas
embebidas em argamassa bastarda,
sujeita a envelhecimento artificial**

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

Orientador: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva
Pinho, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadora: Professora Doutora Maria Margarida
Rolim Augusto Lima, Professora Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio
Arguente: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Vogal: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal: Professora Doutora Maria Margarida Rolim Augusto Lima

“Copyright” Águeda Ricardina Figueira Gonçalves, 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.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho representa o desfecho de um longo percurso, durante o qual contei com o apoio e colaboração de diversas pessoas às quais expresso o meu agradecimento.

Ao meu orientador Professor Doutor Fernando Pinho, pela orientação e conhecimento que me transmitiu, e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À minha co-orientadora Professora Doutora Margarida Lima, pelo interesse e motivação, pelo conhecimento partilhado, e pela simpatia constante.

Ao Eng.º Vítor Silva, pela ajuda ao longo de toda a campanha experimental, sugestões e conhecimentos partilhados.

À Mariana Barros pela assistência prestada durante a utilização da câmara de nevoeiro salino.

À Andreia Lopes e Igor Santos, pela ajuda na preparação das amostras, pela amizade e apoio.

Ao Professor Doutor Rui Silva, pelo apoio na realização de ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, pela disponibilidade e simpatia.

Ao Professor João Pedro Veiga pela contribuição neste estudo através da disponibilidade para a realização de ensaios químicos.

Aos colegas e amigos que me acompanharam ao longo do mestrado um muito obrigado pelo apoio, amizade e pelos momentos de convívio: Pedro Pereira, Joana Costa, Catarina Patrício e Ana Gouveia.

Aos meus amigos, pelos momentos maravilhosos, pela amizade incondicional, e por me ajudarem no desenvolvimento enquanto pessoa: Maria Cristina Martins, Pedro Melo, Rodrigo Azevedo, Cátia Oliveira e João Pedro Trindade.

Ao Filipe Martins, pela amizade, companheirismo e encorajamento constante.

Finalmente agradeço à minha família, especialmente aos meus pais José Martinho Gonçalves e Adelina Gonçalves e à minha avó Benvinda Freitas, que foram a minha inspiração e apoio em todos os momentos do meu percurso académico.

RESUMO

Por todo o país, nomeadamente nos centros históricos e urbanos, é cada vez mais notável a existência de edifícios antigos num estado elevado de degradação. Isto deve-se à ausência e/ou abordagens menos apropriadas de reabilitação e de conservação do edificado existente. Atendendo ao alto significado patrimonial, cultural e arquitetónico destes edifícios, torna-se urgente a tomada de ações de reabilitação, que sejam ao mesmo tempo eficazes e economicamente viáveis.

O tema desenvolvido surge na sequência de um trabalho de investigação, em curso no Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL no qual se procuram desenvolver e aprofundar técnicas de reabilitação estrutural de edifícios antigos, analisando experimentalmente diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria de pedra irregular, uma das quais consiste num reboco de argamassa bastarda, armado com fibra de vidro e confinamento transversal contínuo com fios metálicos, designada por solução IV. Mais recentemente, num estudo orientado pelo Professor Fernando Pinho, orientador da presente dissertação, esta mesma solução foi utilizada aplicando fitas metálicas em vez dos fios de aço.

Nesse contexto, no presente estudo pretende-se avaliar a durabilidade das fitas metálicas embebidas em argamassa bastarda, quando expostas à ação de cloretos e de nevoeiro salino. Para tal, realizaram-se provetes de argamassa bastarda armados com fita metálica, que foram depois expostos a dois ambientes de envelhecimento artificial, nomeadamente câmara de cloretos e câmara de nevoeiro salino, tendo sido analisadas amostras das fitas metálicas aos 30, 60 e 120 dias, através de ensaios de caracterização mecânica, física, química e microestrutural.

Palavras-chave: reabilitação estrutural; edifícios de alvenaria de pedra irregular; confinamento transversal contínuo; fitas metálicas; reboco armado; cloretos.

ABSTRACT

Across the country, particularly in urban and historical centers, the number of antique buildings in a high state of degradation is increasing. This is due to the absence or unsuitable rehabilitation and preservation approaches taken place in existing buildings. Given the highly significance of the cultural and architectural heritage from these buildings, it is urgent to act, requalifying the buildings by taking measures that are both effective and economically viable.

The theme developed arises from a research project currently underway in the Department of Civil Engineering, FCT - UNL in which we seek to develop and deepen innovative techniques that aim to rehabilitate the structure of old buildings . This work intends to analyze various experimental solutions of rubble stone masonry walls reinforcement, one of which is the IV solution which consists of a lime and cement mortar rendering, reinforced with glass fiber mesh, transversal ties of steel wires. More recently, in a study directed by Professor Fernando Pinho, supervisor of this study, the same solution was used applying stainless steel metallic ribbons instead of zinc coated steel wires.

In that context, this paper aims to evaluate the durability of metal ribbons embedded in mortar, when exposed to the action of chlorides. For this, small mortar specimens were prepared, armed with metal ribbon on the inside, which were then exposed to two environmental aging, including chamber chlorides and salt mist chamber, having been analyzed samples of mortar and metallic ribbon, through mechanical, physical, chemical and microstructural test.

Keywords: structural rehabilitation; rubble stone masonry buildings; continuous transverse confinement; metallic ribbons; armed plaster; chlorides.

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO	
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Âmbito e objetivos	2
1.3. Estrutura e organização da dissertação.....	3
2. ENQUADRAMENTO DO TEMA	
2.1. Considerações gerais	5
2.2. Aço inoxidável	5
2.3. Construções de alvenaria de pedra	9
2.3.1. Construções de alvenaria de pedra irregular	14
2.4. Anomalias em edifícios antigos	16
2.5. Efeitos dos sais solúveis nas alvenarias dos edifícios antigos.....	19
2.6. Técnicas de reabilitação de paredes de edifícios antigos	21
2.6.1. Confinamento transversal contínuo.....	27
3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA	
3.1. Considerações iniciais	31
3.2. Trabalhos experimentais de referência.....	31
4. CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETOS DE ARGAMASSA BASTARDA ARMADOS COM FITA METÁLICA	
4.1. Considerações iniciais	45
4.2. Matéria-prima.....	46
4.2.1. Agregados	46
4.2.2. Ligantes	47
4.2.3. Água	49
4.2.4. Fitas metálicas em aço inox	50
4.3. Ensaio de caracterização dos constituintes da argamassa e das fitas metálicas.....	51
4.3.1. Análise granulométrica dos agregados.....	51
4.3.2. Determinação da baridade dos agregados e ligantes	53
4.3.3. Análise química por Fluorescência de Raios-X	55
4.3.4. Análise mineralógica por Difração de Raios-X	57
4.3.5. Ensaio de tração às fitas metálicas	61

4.4. Preparação dos provetes de argamassa (fixação das fitas metálicas e amassaduras)	63
4.5. Caraterização da argamassa no seu estado fresco e condições de cura.....	65
4.6. Caracterização da argamassa endurecida	68
4.6.1. Caraterísticas mecânicas	69
4.6.2. Caraterísticas físicas.....	72
4.7. Enquadramento dos resultados.....	79
5. DURABILIDADE DAS FITAS METÁLICAS FACE AOS CLORETOS .	
5.1. Considerações iniciais.....	85
5.2. Ensaio de durabilidade face aos cloretos.....	86
5.2.1. Câmara de Cloretos	86
5.2.2. Câmara Nevoeiro Salino	92
5.3. Ensaio mecânicos e químicos	98
6. CONCLUSÕES	
6.1. Considerações iniciais.....	119
6.2. Conclusões e comentários finais	119
6.3. Desenvolvimentos futuros.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXO I	133
ANEXO II	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de aplicação de confinamento transversal contínuo	2
Figura 2.1 - Microestrutura dos aços inoxidáveis	7
Figura 2.2 - Formas de corrosão no aço	8
Figura 2.3 - «Cruzes de Santo André» utilizadas nas construções Pombalinas	10
Figura 2.4 - Construção de alvenaria de pedra irregular	11
Figura 2.5 - Tabique de madeira com revestimento sobre fasquiado	11
Figura 2.6 - Fundações diretas	12
Figura 2.7 - Representação esquemática de fundação indireta, com estacas de madeira sob poços e arcos de alvenaria, característica dos edifícios da Baixa Pombalina	12
Figura 2.8 - Tipos de construções de alvenaria de pedra	14
Figura 2.9 - Componentes de alvenaria de pedra irregular	15
Figura 2.10 - Reforço dos cunhais e representação esquemática de reforço do vão de janela	15
Figura 2.11 - Vários tipos de seções em paredes de alvenaria de Pedra	16
Figura 2.12 - Tipos de anomalias nas paredes de alvenaria de pedra.....	18
Figura 2.13 - Técnicas de reabilitação de paredes de edifícios antigos.....	26
Figura 2.14 - Esquemas de reforço de fundações.....	27
Figura 2.15 - Representação esquemática dos muretes grandes e pequenos	28
Figura 2.16 - Representação esquemática da caracterização da solução de reforço IV	29
Figura 2.17 - Aspeto dos muretes da solução de reforço IV, antes do início da aplicação da segunda camada de argamassa	30
Figura 2.18 - Foto ilustrativa de confinamento transversal contínuo.....	30
Figura 3.1 - Comparação do i_{corr} entre os diferentes tipos aços embebidos em argamassa com concentração de 5% de cloretos	36
Figura 3.2 - Potencial corrosivo dos aços dependendo da concentração de cloretos, para superfície lisa e escamada	37
Figura 3.3 – Avaliação do I_{corr} e R_{ohm} da argamassa de cimento em câmara de cloretos	38
Figura 3.4 - Imagens SEM e espectrus EDS de argamassa simples	39
Figura 3.5 - Imagens SEM e espectrus EDS na face entre o aço e a argamassa reforçada	40
Figura 3.6 - Mapeamento na interface da argamassa com o aço sugerindo a presença e distribuição de sal de Friedel c) e produtos de corrosão d).....	41
Figura 3.7 - Difração de raio-X da superfície corroída de uma barra de aço	42
Figura 3.8 - Imagens SEM da argamassa na interface em contato com o aço após ataque de cloretos.....	42
Figura 3.9 - Formação de sal de Friedel na argamassa e análise EDS correspondente	43
Figura 3.10 - Análise SEM dos produtos de corrosão na superfície do aço após ação de cloretos	43
Figura 3.11 - Análises SEM e EDS à superfície do aço na amostra de referência	44

Figura 4.1 - Areias de rio e de areeiro utilizadas na amassadura da argamassa	46
Figura 4.2 - Cal aérea hidratada e cimento utilizados na amassadura da argamassa.....	47
Figura 4.3 - Esquema do Ciclo da cal	48
Figura 4.4 - Relação entre resistência mecânica, resistência à corrosão e custo nos diferentes tipos de aço inox	50
Figura 4.5 - Fitas metálicas utilizadas para reforço da argamassa	50
Figura 4.6 - Ensaio de análise granulométrica das areias.....	52
Figura 4.7 - Curvas granulométricas das areias de rio e de areeiro.....	53
Figura 4.8 - Ensaio de determinação da baridade	54
Figura 4.9 - Baridade dos agregados e ligantes utilizados na preparação das argamassas.....	55
Figura 4.10 - Espectrómetro de FRX e representação esquemática da fluorescência de raios X.....	55
Figura 4.11 - Preparação da amostra para análise por fluorescência de raios X	56
Figura 4.12 - Difractómetro de pós Rigaku para análise DRX	57
Figura 4.13 - Preparação das amostras em pastilha para análise por DRX.....	58
Figura 4.14 - Espectro de DRX da Areia de Areeiro	59
Figura 4.15 - Espectro de DRX da Areia de Rio.....	60
Figura 4.16 - Espectro de DRX da Cal Aérea	60
Figura 4.17 - Espectro de DRX do Cimento	61
Figura 4.18 - Espectro de DRX da Fita de Aço-Inox	61
Figura 4.19 - Exemplo do aspeto das fitas metálicas depois de cortadas e aparadas	62
Figura 4.20 - Equipamento de ensaio à tração (ZWICK Z050) e pormenor de rotura da fita metálica	62
Figura 4.21 - Resultado do ensaio de tração às fitas metálicas	63
Figura 4.22 - Preparação dos moldes, colocação das fitas metálicas com a ajuda de espaçadores	64
Figura 4.23 - Preparação das argamassas em pasta em misturador mecânico.....	65
Figura 4.24 - Ensaio de consistência por espalhamento da argamassa fresca	67
Figura 4.25 - Moldagem e compactação mecânica dos provetes de 16cm x 4cm x 4cm.....	67
Figura 4.26 - Provetes de referência desmoldados utilizados nos ensaios de caracterização.....	68
Figura 4.27 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	70
Figura 4.28 - Ensaio para determinação das tensões de resistência à tração por flexão e à compressão.....	72
Figura 4.29 - Resultados médios das resistências mecânicas.....	72
Figura 4.30 - Ensaio de determinação da massa volúmica.....	74
Figura 4.31 - Valores médios da massa volúmica real e aparente.....	74
Figura 4.32 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	76
Figura 4.33 - Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade	77
Figura 4.34 - Ensaio de secagem dos provetes de argamassa	78
Figura 4.35 - Resultado médio do ensaio de secagem dos provetes de argamassa	78
Figura 5.1 - Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos cloretos - câmara de cloretos	87
Figura 5.2 - Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa AF e AR.....	87
Figura 5.3 - Câmara de cloretos e pormenor do painel de configurações na fase seca	88

Figura 5.4 - Ciclo da câmara de cloretos (CC).....	88
Figura 5.5- Resistência dos provetes de argamassa face aos cloretos – variação da massa	89
Figura 5.6 - Evolução dos provetes de argamassa ao longo de 60 ciclos de ataque por cloretos na câmara de cloretos	90
Figura 5.7 - Aspeto da argamassa em contato com a fita metálica após ensaio de cloretos na câmara de cloretos	91
Figura 5.8 - Aspeto das fitas metálicas após 30 e 60 dias na câmara de cloretos.....	92
Figura 5.9 - Ciclo da câmara de nevoeiro salino (CNS) e esquema ilustrativo da distribuição dos provetes no interior da câmara.....	93
Figura 5.10 - Provetes no interior da câmara de nevoeiro salino (CNS)	93
Figura 5.11 - Evolução dos provetes de argamassa ao longo de 120 ciclos de ataque por cloretos na câmara de nevoeiro salino	95
Figura 5.12 - Corte do provete AF8 e selagem do topo com fita à vista	95
Figura 5.13 - Aspeto da zona circundante da fita do provete AF8 após ataque de cloretos na CNS.....	96
Figura 5.14 - Aspeto da argamassa em contato com a fita metálica após 120 dias de ensaio de cloretos na câmara de nevoeiro salino.....	97
Figura 5.15 - Aspeto da fitas metálicas após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino	98
Figura 5.16 - Equipamento de microscopia electrónica de varrimento (SEM) e EDS	99
Figura 5.17 - Montagem das amostras de argamassa em resina para análise SEM.....	100
Figura 5.18 - Montagem das amostras de argamassa em suporte metálico para análise SEM.....	100
Figura 5.19 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência 232 após amassadura (AR_232).....	101
Figura 5.20 - Mapeamento da argamassa de referência, 232 após amassadura (AR_232)	102
Figura 5.21 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência após 60 dias na câmara de cloretos (AR_60_CC)	103
Figura 5.22 - Mapeamento da argamassa após 60 dias na câmara de cloretos (AR_60_CC)	104
Figura 5.23 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 60 dias na câmara de cloretos (A_60_CC)	105
Figura 5.24 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 60 dias na câmara de nevoeiro salino (A_60_CNS).....	106
Figura 5.25 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 120 dias na câmara de nevoeiro salino (A_120_CNS).....	106
Figura 5.26 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência após 120 dias na câmara de nevoeiro salino (AR_120_CNS).....	107
Figura 5.27 - Espectro de DRX da argamassa de referência aos 232 dias	109
Figura 5.28 - Espectro de DRX das argamassas após 30 e 60 dias no interior da câmara de cloretos	109
Figura 5.29 - Espectro de DRX das argamassas após 30, 60 e 120 dias no interior da câmara de nevoeiro salino	110
Figura 5.30 - Espectro de DRX das fitas metálicas após 30 e 60 dias no interior da câmara de cloretos	112

Figura 5.31 - Espectro de DRX das fitas metálicas após 30, 60 e 120 dias no interior da câmara de nevoeiro salino	112
Figura 5.32 – Aspeto da superfície da fita metálica de referência sujeita às condições normais de laboratório .	114
Figura 5.33 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas proveniente dos provetes armados (AF),após 30 e 60 dias na câmara de cloretos	114
Figura 5.34 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas não envolvidas em argamassa (F) ,após 30 e 60 dias na câmara de cloretos	114
Figura 5.35 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas proveniente dos provetes armados (AF),após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino	115
Figura 5.36 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas não envolvidas em argamassa (F) ,após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino	115
Figura 5.37 - Resistências à tração das fitas metálicas após ensaio de cloretos	117
Figura 5.38 – Comparação da resistências à tração de referência, com os valores obtidos nas fitas metálicas provenientes da câmara de cloretos, com a fita de referência	117
Figura 5.39 - Comparação da resistências à tração de referência, com os valores obtidos nas fitas metálicas provenientes da câmara de nevoeiro salino	118

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Evolução construtiva por época, do edificado de Lisboa	10
Tabela 3.1 - Resultados de ensaios de caracterização das areias utilizadas na argamassa de reboco da solução de reforço IV	32
Tabela 3.2 - Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida utilizada na solução de reforço IV	32
Tabela 3.3 - Resultados do ensaio de baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria..	32
Tabela 3.4 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por P. Faria.....	33
Tabela 3.5 - Resultados de ensaios de resistência aos cloretos das argamassas obtidos por P. Faria.....	33
Tabela 3.6 - Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas obtidos por P. Faria.....	33
Tabela 3.7 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas obtidos por V. Rato	34
Tabela 3.8 - Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida estudada por F. Henriques e V. Rato	35
Tabela 3.9 - Composição química e estrutural dos aço inoxidável AISI 304.....	35
Tabela 3.10 - Composição química e estrutural dos aços inoxidáveis FeCr18Ni10 e FeCr18Ni10Mo2	37
Tabela 4.1 - Características físicas dos agregados	53
Tabela 4.2 - Análise química dos ligantes e agregados obtida por FRX.....	56
Tabela 4.3 - Análise química da fita metálica obtida por FRX	57
Tabela 4.4 - Valores do peso e pressão aplicada das amostras das matérias-primas (pastilhas)	58
Tabela 4.5 - Fazes cristalinas nas matérias-primas detetadas pela análise FRX	59
Tabela 4.6 - Resultados obtidos nos ensaios de tração realizados à fita Bandimex	63
Tabela 4.7 - Massa de cada material utilizada na amassadura da argamassa bastarda de cal aérea, cimento, e areias	65
Tabela 4.8 - Características estudadas nas argamassas endurecidas	68
Tabela 4.9 - Comparação das características dos provetes de argamassa	80
Tabela 4.10 - Comparação dos valores da composição química das fitas metálicas [%] com vários autores	83
Tabela 5.1 - Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos cloretos.....	85
Tabela 5.2 - Datas em que foram retirados os provetes da câmara de cloretos	89
Tabela 5.3 - Datas em que foram retirados os provetes da câmara de nevoeiro salino	94
Tabela 5.4 - Principais fases cristalinas detetadas nas amostras de argamassa após ataque de cloretos	108
Tabela 5.5 - Principais fases cristalinas detetadas nas amostras das fitas metálicas após ataque de cloretos	111
Tabela 5.6 - Resistências à tração das fitas metálicas após ataque dos cloretos	116

SIMBOLOGIA

Siglas

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

UNL – Universidade Nova de Lisboa

ASTM – American Society for Testing and Materials

AISI – American Iron and Steel Institute

Argamassa, fita metálica e ambientes de envelhecimento

AC – ambiente condicionado

AF – fita metálica no interior do provete de argamassa

AF_30_CC – fita metálica no interior do provete de argamassa; câmara de cloretos – 30 dias

AF_60_CC – idem – 60 dias

AF_30_CNS – fita metálica no interior do provete de argamassa; câmara de nevoeiro salino – 30 dias

AF_60_CNS – idem – 60 dias

AF_120_CNS – idem – 120 dias

AR – argamassa de referência

CC – câmara de cloretos

CNS – câmara de nevoeiro salino

F – fita metálica não envolvida por argamassa

F_30_CC – fita metálica; câmara de cloretos – 30 dias

F_60_CC – idem – 60 dias

F_30_CNS – fita metálica; câmara de nevoeiro salino – 30 dias

F_60_CNS – idem – 60 dias

F_120_CNS – idem – 120 dias

FR – fita de referência

Ensaaios e determinações

D – máxima dimensão do agregado

DP – desvio padrão

d – mínima dimensão do agregado

Edin – módulo de elasticidade dinâmico

EDS – espectroscopia por dispersão de energia de raio-X

IS – índice de secagem

Mf – módulo de finura

MVA – massa volúmica aparente

MVR – massa volúmica real

PA – porosidade aberta

Rc – resistência à compressão

Rt – resistência à tração por flexão

SEM – microscopia eletrónica de varrimento

VA – valor assintótico da absorção capilar

DRX – difração de raios-X

FRX – fluorescência de raios-X

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Por todo o país, nomeadamente em centros históricos e urbanos, existem edifícios antigos¹ num estado de avançada degradação. Este facto deve-se à falta de manutenção e a possíveis ações de reabilitação a que estiveram sujeitos ao longo dos anos. O estado pouco aprazível dos edifícios e o risco elevado para a segurança das pessoas, leva a que tipicamente estas zonas sejam deixadas ao abandono.

A reabilitação de edifícios antigos é hoje uma tarefa de grande importância por vários motivos, dos quais se podem sublinhar: a preservação de valores culturais, uma vez que os edifícios antigos são o suporte físico de diversos movimentos estéticos, da arquitetura e da arte, ao longo do tempo; a proteção ambiental, pois reabilitar representa preservar e aproveitar uma grande parte dos elementos construídos, reduzindo as demolições e as construções necessárias, baixando as emissões de CO₂, sendo que, tanto quanto possível são utilizados materiais tradicionais e naturais (madeira, pedra, areia e cal); e por fim, as vantagens económicas, reduzindo os custos associados a demolição, estaleiro, quantidades de novos materiais, etc. [1].

Segundo o Recenseamento Geral da População e da Habitação feito pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em 2011, cerca de 65% dos edifícios construídos antes da 2ª metade do séc. XX careciam de obras de restauro, dos quais 47,1% necessitavam de reparações nas paredes [38].

As vantagens da reabilitação acima referidas e a necessidade de obras de restauro, aliadas à atual estagnação do mercado de construção nova - cerca de 7,9% em Janeiro de 2011 de acordo com o censo de 2011 do INE [38] - levam a que Portugal acompanhe a tendência de reabilitar os edifícios antigos, que de resto se tem vindo a instalar por toda a Europa ao longo dos últimos anos.

Têm sido feitos alguns estudos para obter a percentagem de edifícios antigos em Portugal. Com base no Recenseamento Geral da População e da Habitação de 2011, apresenta-se na Tabela 1.1 a distribuição destes em Portugal por época de construção [104].

Tabela 1.1 - Distribuição de edifícios em Portugal por época de Construção [104]

Edifícios em Portugal por época de construção								
Total	Anterior a 1919	1919 - 1945	1946 - 1960	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1990	1991 - 2000	2001 - 2011
3.544.389	206.343	305.696	387.340	408.831	588.858	578.845	558.471	510.005

¹ Considera-se edifício antigo, todo aquele que foi edificado antes da utilização do betão como principal material de construção na estrutura do edifício, ou seja uma construção baseada em tecnologias e materiais tradicionais [3]

Segundo o estudo realizado pelo INE, em 2011 existiam cerca de 5.9 milhões de alojamentos, e 4.043.726 famílias em Portugal, isto é, mais de 1.8 milhões de alojamentos do que famílias residentes. Passou-se de uma situação relativamente equilibrada no Recenseamento de 1981, em que o número de alojamentos era 16% superior ao número de famílias, para um contexto em que, no ano de 2011 o número de fogos superou em 45% o total de famílias residentes, evidenciando o excedente habitacional em Portugal [37, 38, 104]. Como tal, faz todo o sentido apostar na reabilitação do edificado existente, mantendo a população residente nos centros históricos e reduzindo as grandes concentrações populacionais em redor das cidades [83].

1.2. Âmbito e objetivos

O tema desta dissertação surge no seguimento de um trabalho de investigação em curso no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC-FCT/UNL), que consiste na análise experimental de diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria de pedra tradicional [65]. Uma das soluções propostas no referido estudo é o confinamento transversal contínuo. Este baseia-se no conceito de «reboco armado», ou seja, reboco de argamassa bastarda armado com malha de fibra de vidro, com confinamento transversal (fios ou fitas) que «cosem» o elemento a reforçar, Figura 1.1.

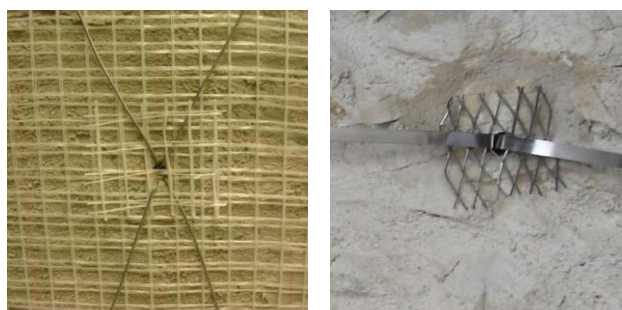


Figura 1.1 - Exemplo de aplicação de confinamento transversal contínuo [24, 65]

A solução acima indicada foi continuada noutros trabalhos de tese de mestrado, orientada também pelo Professor Fernando Pinho, orientador da presente dissertação. Num dos quais, efetuaram a avaliação do comportamento da alvenaria de pedra tradicional sujeita ao confinamento transversal contínuo com fitas metálicas, de onde surge o tema da presente dissertação: «Avaliação da durabilidade de fitas metálicas embebidas em argamassa sujeita a envelhecimento artificial». De salientar que existem diversos trabalhos a decorrer no DEC, que tal como a presente dissertação pretendem avaliar a durabilidade de elementos metálicos (fitas ou fios) face ação de cloretos utilizando vários tipos de argamassas.

No presente estudo pretende-se averiguar a existência de corrosão nas fitas metálicas, quando expostas

à ação de cloretos. Para tal recorreram-se a técnicas de observação: Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM) e Microscopia Ótica, e ainda de análise química: Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio-X (EDS), Difração de Raio -X (DRX). Pretende-se ainda conhecer o nível de proteção contra a corrosão que a argamassa promove às fitas no seu interior.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A dissertação consta de seis capítulos, incluindo o presente, e dois anexos, estruturados da seguinte forma:

Capítulo II - Faz-se uma síntese da revisão bibliográfica, começando pelos aços mencionando o processo de fabrico, tipos de aços que existem, e formas de corrosão deste material.

Seguidamente aborda-se o tema das construções antigas, de onde destacam as construções de alvenaria de pedra irregular referindo-se o enquadramento histórico, principais características e anomalias, e técnicas de reforço.

Capítulo III – Sintetiza-se algumas investigações desenvolvidas em torno do tema desta dissertação. Este capítulo serviu essencialmente de comparação de resultados obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Capítulo IV - Descreve-se o processo da amassadura dos provetes de argamassa utilizados no trabalho experimental e os procedimentos de ensaio para a caracterização da matéria-prima e dos provetes de argamassa utilizados. Apresentam-se ainda, todos os resultados obtidos pela caracterização física e química dos materiais utilizados, bem como dos ensaios de caracterização mecânica, física e química dos provetes e no fim é feita uma análise aos resultados obtidos. Comparam-se ainda, os principais resultados obtidos pelos autores referidos no Capítulo III, com os obtidos na campanha experimental do presente estudo (Capítulo IV)

Capítulo V – Refere-se os procedimentos de ensaio na caracterização dos provetes de argamassa e das fitas metálicas quanto à resistência à ação dos cloretos, e apresenta-se os resultados obtidos fazendo análise aos mesmos.

Capítulos VI – Apresentam-se as principais conclusões obtidas no trabalho, confrontam-se os objetivos propostos e os que foram efetivamente alcançados e indicam-se possíveis desenvolvimentos futuros.

Anexo I – Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física das matérias-primas, da argamassa e das fitas metálicas.

Anexo II – Apresentam-se as fichas utilizadas na identificação por Difração de Raio - X, para caracterização química das matérias-primas, da argamassa e das fitas metálicas.

2. ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1. Considerações gerais

Neste capítulo, é feita uma breve descrição do método de fabrico dos aços inoxidáveis, dos tipos de metais existentes, particularizando o aço inoxidável que será utilizado neste estudo. De seguida, com o objetivo de contextualizar o estudo experimental desenvolvido no presente trabalho, é feita uma pequena abordagem às construções de alvenaria de pedra, em particular das construções de alvenaria de pedra irregular, referindo o seu enquadramento histórico, principais anomalias e técnicas para reabilitação estrutural.

2.2. Aço inoxidável

O aço inox foi descoberto pelo inglês Harry Brearly em 1913, denominando-o de «stainless steel» que no sentido literal significa «aço que não mancha». Este material é conhecido, quando comparado com os aços comuns, por ter uma elevada resistência à corrosão e à oxidação [23, 102].

A resistência à oxidação e corrosão do aço inoxidável deve-se principalmente à presença do crómio (Cr), que a partir de um determinado valor e em contato com o oxigênio (O), se oxida formando sobre a superfície do aço uma película muito fina e estável de óxido de crómio (Cr_2O_3) denominada de camada passiva. Esta tem como função, proteger a superfície do aço contra processos corrosivos, e caracteriza-se por ser aderente, impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais [20].

Para que as ligas ferro-crómio sejam resistentes à corrosão atmosférica, é necessário que a sua composição apresente 10,5% ou mais de crómio (Cr) e mais do que 50% de ferro (Fe). O aço inox é feito a partir de elementos básicos encontrados na natureza, sendo a hematite a mais utilizada. Esta é composta por 65% de ferro, 28% de oxigênio e o restante por impurezas, não tendo assim as propriedades físicas do ferro [97]. O processo de transformação da matéria-prima acontece em fábricas de siderurgia, onde para extrair o metal (Fe) da hematite (Fe_2O_3), esta é levada ao alto-forno, e utilizando o carvão vegetal como agente redutor (coque) dá-se a redução do óxido de ferro, produzindo o ferro gusa e a escória, sendo o primeiro utilizado como matéria-prima do aço. O ferro gusa é composto por [97]:

- carbono (C): 3 a 4,5%;
- silício (Si): 0,5 a 4%
- fósforo (P): 0,05 a 2%
- manganês (Mn): 0,5 a 2,5%

O aço é uma variante do ferro que tem na sua composição uma concentração levemente menor de carbono, até 2,1%. A concentração de carbono gera uma liga de ferro com uma flexibilidade e dureza maiores do que o ferro puro. A transformação do ferro gusa em aço é feita na aciaria (unidade siderúrgica), e divide-se em refinamento primário e refinamento secundário. O refinamento primário consiste em tirar o carbono em excesso e as impurezas, assim como aumentar a temperatura do metal líquido que passa a ter baixo teor em carbono (0,06%), baixo teor de impurezas (P e S), e teor de ferro acima dos 99%. O refinamento secundário consiste no ajuste final relativamente à composição química com a adição de ferro-ligas, acerto da temperatura, e ainda na limpeza e eliminação do gás do aço através de vácuo. Os aços de alto grau de pureza passam ainda por processos de desgaseificação em vácuo e de tratamento superficial [97].

Finalmente a maior parte do aço líquido é solidificado através de equipamentos de lingotamento contínuo e transformado em lingotes com secção circular ou retangular, ou em blocos, e depois processados por laminadores transformando-os em uma grande variedade de produtos siderúrgicos [97].

Os elementos de liga que podem ser adicionados ao aço são o níquel (Ni), molibdénio (Mo), cobre (Cu), nióbio (Nb), titânio (Ti), crómio (Cr), silício (Si) e o alumínio (Al), em proporções que irão caracterizar os mesmos estruturalmente, mecanicamente e quimicamente. O níquel provoca uma alteração na estrutura do material, e à medida que se aumenta a sua proporção, aumentam também a ductilidade, resistência mecânica a quente e resistência à corrosão do material. O molibdénio e o cobre representam uma melhoria na resistência à corrosão por via húmida. O silício e o alumínio melhoram a resistência à oxidação a altas temperaturas, enquanto o titânio e o nióbio são elementos estabilizadores nos aços austeníticos, impedindo o empobrecimento de crómio via precipitação em forma de carbonetos durante aquecimento e/ou arrefecimento lento em torno de 700 °C, que provocaria uma diminuição da resistência local à corrosão. O crómio aumenta as resistências mecânicas e ao calor, assim como incrementa a dureza e proteção anti corrosão do aço [23, 97].

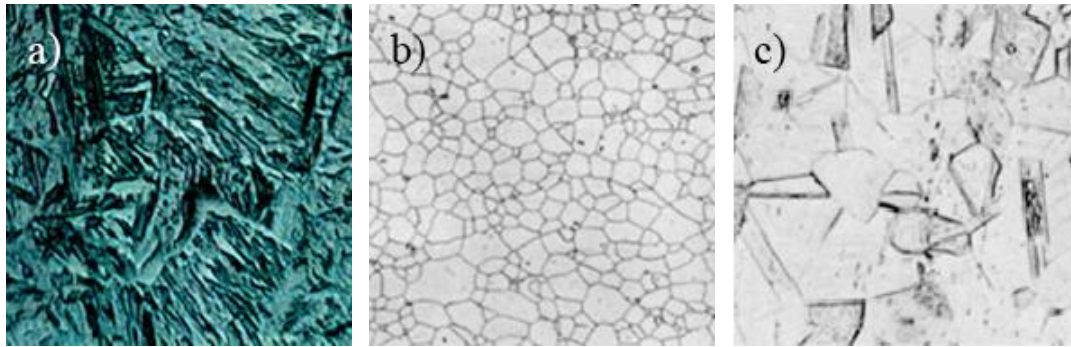
As principais famílias de aços inoxidáveis, classificados segundo a sua microestrutura, são: martensíticos, ferríticos e austeníticos [23, 97, 102, 106]. Existem mais dois grupos de aços, o aço duplo (ferrítico-austenítico) e aço endurecido por precipitação, mas que não vão ser abordados neste estudo.

O aço martensítico, Figura 2. 2.a), é formado quando ligas de ferro-carbono são arrefecidas rapidamente ou bruscamente (tratamento térmico de têmpera) sem formação de austenite. Caracteriza-se por ser magnético, e pela elevada dureza proporcional ao teor de carbono, por isso é usado em ferramentas e máquinas de todos os tipos. Na sua composição química contém 12 a 17% de crómio e 0,1 a 1% de carbono [97].

O aço ferrítico, Figura 2. 2 b), caracteriza-se por ter uma estrutura macia e maior resistência à corrosão que os aços martensíticos devido a terem um maior teor de crómio (16 a 30%). É aplicado quando

existem requisitos de boa resistência à corrosão, ótima aparência superficial e requisitos mecânicos moderados.

O aço austenítico, utilizado na campanha experimental do presente estudo, Figura 2. 2 c), tem origem na adição de ligas de níquel (Ni) ao aço ferrítico. É caracterizado por excelente comportamento à corrosão em muitos meios agressivos, e também por uma boa resistência à tração e grande ductilidade, oferecendo as melhores propriedades para trabalho a frio [97].



a) Aço inoxidável martensítico AISI 420 [95]; b) Aço inoxidável ferrítico AISI 409 [106]; c) Aço inoxidável austenítico AISI 304 [106]

Figura 2. 2 - Microestrutura dos aços inoxidáveis

A corrosão significa a destruição parcial ou total de um metal ou liga metálica, por via química ou eletroquímica [102]. Dependendo da concentração de cloretos no meio, da temperatura e do pH, existem várias formas de corrosão que podem ocorrer no aço [23, 25]:

1) corrosão por picadas, causada pela quebra localizada da camada passiva do aço promovida por uma atmosfera rica em cloretos e /ou sulfatos, Figura 2. 3 a). Quando o aço inoxidável está em contato com uma solução de cloretos, instala-se no interior das picadas uma atmosfera ácida de hidrocloretos, causando uma descida significativa do pH e uma subida na concentração dos iões de cloreto, o que resulta numa evolução do diâmetro das picadas.

2) corrosão por fendas, para ocorrer é necessário que exista um abertura na superfície do aço criada no momento da sua aplicação ou por consequência do próprio processo, como, por exemplo, uma incrustação ou um depósito nas paredes do aço, Figura 2. 3, b);

3) corrosão sob tensão, definida pela formação de fissuras podendo se propagar rapidamente. As fissuras podem surgir devido a temperaturas superiores a 50°C, pela aplicação de tensões residuais, ou ainda pelo grau de agressividade do meio (presença de Cl⁻, H₂S e NaOH), Figura 2. 3, c);

4) corrosão intergranular, quando o aço é sujeito a temperaturas entre 425 e 815°C (caso da soldadura) o carbono precipita-se e combinado com o crómio dá origem ao carbonato de crómio, empobrecendo as zonas adjacentes do crómio necessário para a proteção contra a corrosão.



a) corrosão por picadas; b) corrosão por fendas; c) corrosão sob tensão

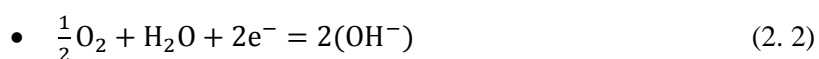
Figura 2. 3 - Formas de corrosão no aço [25]

As reações químicas que ocorrem na argamassa também podem proporcionar a oxidação do aço. A hidratação do cimento origina, genericamente, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) que conferem resistência ao material, e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) principal responsável pela criação de um ambiente alcalino no interior dos poros ($\text{pH} = 12,5-13,5$). A elevada alcalinidade gera uma camada passiva ao longo do aço, que os protege do fenômeno da corrosão [55]. Quando a argamassa é exposta a cloretos ou dióxido de carbono presente na atmosfera, estes reagem com os produtos da hidratação do cimento o hidróxido de cálcio, causando a descida do pH da argamassa para níveis entre 9 e 8, reduzindo a alcalinidade do meio, o que contribui para a destruição da camada protetora em redor do aço proporcionando a oxidação [54].

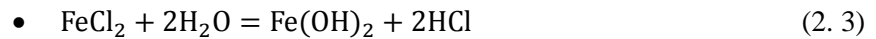
No presente estudo, o principal meio de corrosão suscetível de acontecer é a corrosão por picadas. Isto porque, durante a campanha experimental, o aço esteve exposto a uma atmosfera com cloretos, que como foi mencionado anteriormente, é o principal catalisador da corrosão por picadas. Esta tem origem num processo eletroquímico de oxidação-redução, que ocorre no interior das aberturas na superfície dos metais cobertos por uma camada passiva [23]. A reação anódica que ocorre no interior das picadas é [23]:



Os elétrons fornecidos pelo fluxo do ânodo para o cátodo, onde são descarregadas na reação catódica da seguinte forma [23]:



Como resultado dessas reações, o eletrólito² no interior da picada ganha carga elétrica positiva, em contraste com o eletrólito em torno da mesma, que está carregado negativamente. A carga positiva no interior da picada atrai íons negativos do cloro (Cl), aumentando a acidez do eletrólito de acordo com a reação [23]:



O pH do eletrólito dentro da picada diminui de 6 para 2-3, o que provoca uma maior aceleração do processo de corrosão. Com a evolução das picadas, podem-se desenvolver fendas no aço, devido à tensão provocada pela corrosão [23].

Acontecimentos tais como riscos na camada passiva, partículas da camada interior imergirem para a camada superficial passiva, tensão localizada ou ainda ambientes não homogêneos, podem estar na origem das picadas [23].

O crómio presente no aço junta-se com o oxigénio na atmosfera formando a camada passiva rica em óxido de crómio. Sempre que esta é danificada mais óxido se forma, regenerando a superfície e protegendo o aço de oxidar. Para que este processo aconteça, é necessário uma atmosfera rica em oxigénio. Na água do mar os cloretos presentes no sal atacam a camada passiva mais rapidamente do que esta pode ser reparada num ambiente de baixo oxigénio [23].

2.3. Construções de alvenaria de pedra

Como forma de enquadramento do trabalho de investigação [65] anteriormente realizado, considera-se relevante fazer uma curta introdução às construções de alvenaria de pedra, mais em particular das construções de alvenaria de pedra irregular, Figura 2.5, dado que é neste tipo de parede que o presente estudo incide.

A escolha dos materiais utilizados na construção dos edifícios depende da proximidade e facilidade com que as pessoas o conseguem arranjar, como tal, na zona norte do país predominam as construções em alvenaria de pedra aparelhada (em granito) ou de pedra seca, mas no sul e centro litoral as construções em taipa e adobe são as mais encontradas. Na zona centro interior as paredes de alvenaria eram feitas com blocos de pedra irregular e tijolos inteiros ou fragmentados, ligados entre si por argamassas de cal e areia [29].

A reconstrução de Lisboa, necessária devido ao sismo de 1755, tornou-se exemplo para todo o país, tendo como principal referência as estruturas de alvenaria da época Pombalina, onde foi aplicado o conceito de gaiola com o claro objetivo de melhorar o comportamento sísmico do edifício. Este novo conceito consiste na incorporação de uma estrutura de madeira formando diagonais cruzadas (cruzes

² Eletrólito é toda a substância que, dissociada ou ionizada, origina íons positivos (catiões) e íons negativos (aniões), através da adição de um solvente [107]

de Santo André) preenchidas por alvenaria de pedra. O conjunto destes elementos forma a parede de «frontal», Figura 2.4.



Figura 2.4 - «Cruzes de Santo André» utilizadas nas construções Pombalinas [68]

Pouco mais de um século depois, a construção sofre um declínio de qualidade devido ao objetivo de se construir de forma mais rápida e económica, e é neste contexto que surgem os edifícios «gaioleiros», seguidos pelos edifícios mistos de alvenaria e betão armado em 1930. Em meados dos anos 60 generalizaram-se as estruturas em betão armado [29, 57, 75].

Ao longo do tempo, verificam-se assim períodos distintos com processos construtivos diferenciados no parque habitacional de Lisboa, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Evolução construtiva por época, do edificado de Lisboa [57]

Época de Construção	Características Construtivas
Anterior a 1755	Alvenaria de pedra
Entre 1755 e 1870	Alvenaria da época Pombalina
Entre 1870 e 1930	Alvenaria tipo gaioleiro
Entre 1930 e 1940	Estrutura mista de alvenaria e betão armado
Entre 1940 e 1960	Betão armado e alvenaria de tijolo
Depois de 1960	Betão armado

Os edifícios antigos de alvenaria de pedra são constituídos por paredes resistentes, paredes divisórias e fundações.

As paredes resistentes dos edifícios antigos, Figura 2.5, definem-se como sendo maciços ou elementos construtivos, de alvenaria ou cantaria, cujo comprimento e altura excedem em muito a espessura. Estas podem ser interiores ou exteriores, e estão divididas em fachada principal, posterior e lateral. Apresentam um papel crucial para a estabilidade do edifício quando este é solicitado por cargas verticais devido à ação da gravidade, e cargas horizontais devidas às ações do vento e dos sismos [64, 67, 68, 69].

As paredes exteriores desempenhavam funções de proteção do exterior e das condições climatéricas, assim como funções resistentes [19], tendo como principais características a fraca resistência à tração

e ao corte e boa resistência à compressão, sendo este último dependente do volume de vazios [77] e do grau de confinamento lateral a que os paramentos estão sujeitos [70]. Estas características contribuíam para a fragilidade e vulnerabilidade das alvenarias face à ação sísmica [36].



Figura 2.5 - Construção de alvenaria de pedra irregular [7]

As paredes divisórias, para além de dividirem os espaços entre as paredes resistentes, contribuem igualmente para a estabilidade geral do edifício, pois ainda que não recebam cargas verticais diretamente, colaboram para o travamento geral da estrutura devido à ligação entre paredes, pavimentos e cobertura. A interligação entre os vários elementos estruturais revela ser muito importante durante a ocorrência de um sismo, por contribuir na dissipação da energia. Um tipo de solução para este tipo de parede é o tabique característico da época Pombalina que, apesar da função principal para a qual foi concebida (separação de espaços interiores do edifício), acaba muitas vezes também por desempenhar um papel estrutural [4, 64, 67, 68], Figura 2. 6.



Figura 2. 6 - Tabique de madeira com revestimento sobre fasquiado

As fundações de edifícios antigos são normalmente compostas por sapatas isoladas (para pilares) e por sapatas contínuas (para paredes), e têm uma constituição de alvenaria de pedra ou tijolo, semelhantes às paredes resistentes [4]. Frequentemente eram utilizados enrocamentos de pedra irregular, com ou sem argamassa, lançados contra o terreno em valas ou poços, mas nas construções mais pesadas e de maior relevância, as fundações eram executadas em alvenaria de pedra trabalhada à mão, ou de tijolo cerâmico. Segundo a sua profundidade, as fundações podem ser diretas (ou superficiais) e indiretas (ou

profundas), nas versões contínuas ou descontínuas. Nas fundações diretas, era feito um prolongamento dos elementos estruturais verticais que servia de transição para o solo de fundação, que no caso de solos de melhor qualidade podia ser com a mesma espessura das paredes que nascem sobre estas, ou com largura de envasamento nos outros casos [76], Figura 2.7.

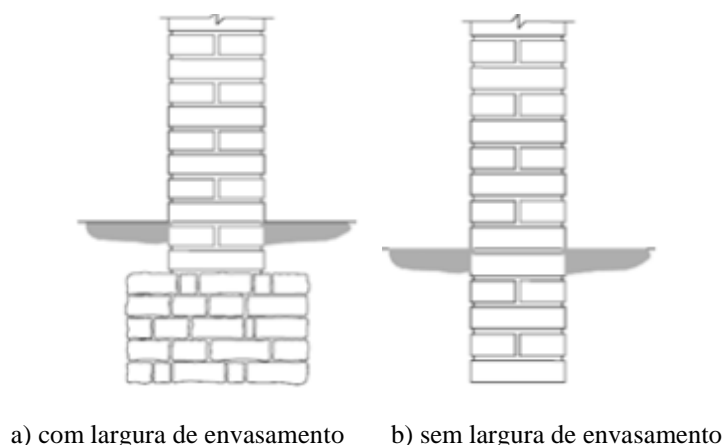
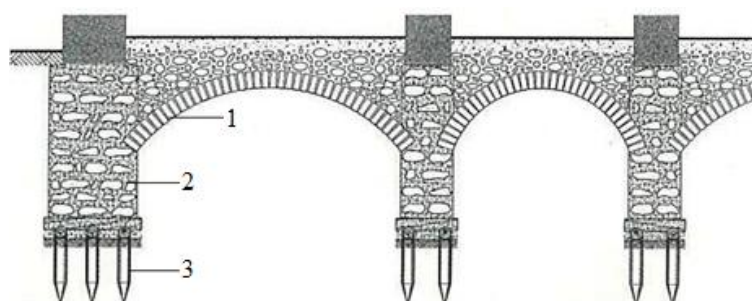


Figura 2.7 - Fundações diretas [76]

As fundações indiretas eram utilizadas em edifícios com dois ou mais pisos, pois tornava-se imperativo mobilizar uma maior capacidade resistente dos solos recorrendo a estratos mais profundos, Figura 2.8.



1 – arco de alvenaria; 2 – poço de fundação; 3 – estacas de madeira

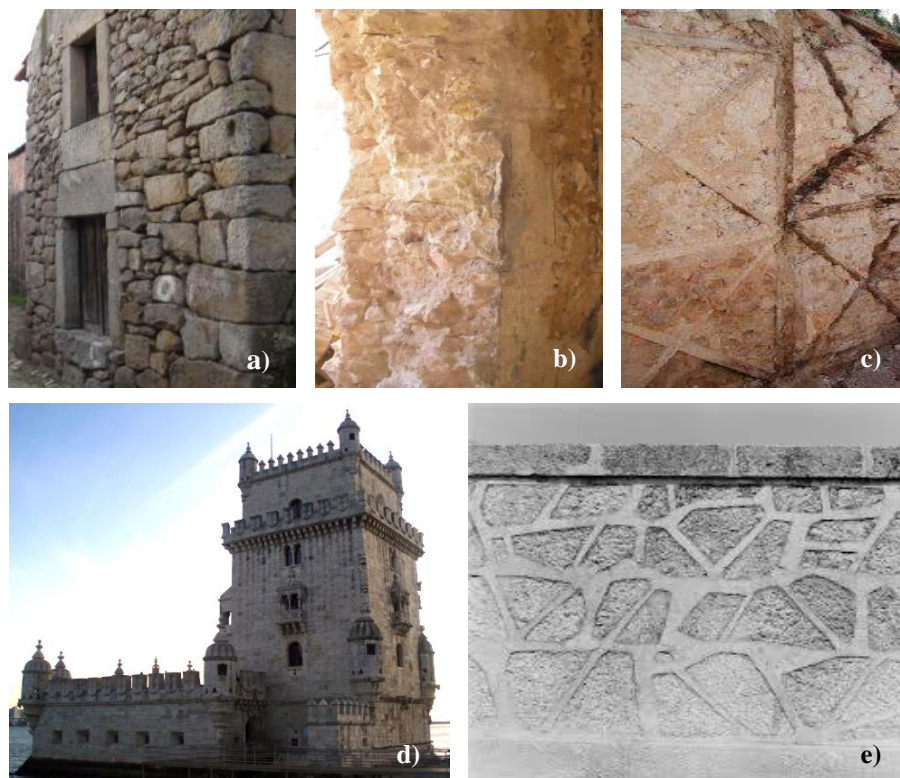
Figura 2.8 - Representação esquemática de fundação indireta, com estacas de madeira sob poços e arcos de alvenaria, característica dos edifícios da Baixa Pombalina (adaptado de [82])

As paredes dos edifícios antigos diferenciam-se das atuais estruturas de betão armado em alguns aspetos, tais como na constituição, modelo de funcionamento e ainda na proteção contra a humidade. As paredes dos edifícios atuais são construídas de forma a tentar impedir a entrada da humidade, por exemplo através de cortes de capilaridade junto às fundações ou ainda pelo uso de revestimentos de estanquidade ou de impermeabilização [62, 94]. As paredes dos edifícios antigos, sendo mais porosas, com maior espessura e sem cortes de capilaridade, permitiam a entrada de água, mas esta era rapidamente expulsa por secagem graças às características das paredes [94].

A classificação das paredes de alvenaria de pedra baseia-se em quatro parâmetros base: as pedras, o assentamento, a argamassa e a secção transversal. Assim, a alvenaria é caracterizada pelos materiais que a compõe (pedras, tijolos e argamassa), as características físicas, químicas e mecânicas desses mesmos componentes, e ainda pela morfologia da secção e aspetos construtivos [10, 76]. Os tipos de construções de alvenaria de pedra subdividem-se essencialmente nas seguintes categorias:

- construções de alvenaria de pedra seca ou mal argamassada: típicas do Alto Minho e alguns locais em Trás-os-Montes e nas Beiras e Alentejo; são caracterizadas pelo assentamento das pedras com pouca ou nenhuma argamassa, em que nas paredes resistentes utilizavam normalmente xisto ou granito; as paredes tinham até dois pisos devido à limitada resistência mecânica, e espessura média de 0,60 m e 0,80 m; os vazios entre os blocos possibilitavam a acumulação da humidade ascendente, impedindo que esta entrasse no interior da habitação através de ascensão por capilaridade [67, 68, 76], Figura 2.9 a);
- construções de alvenaria de pedra irregular: constituídas por pedras (normalmente pedra calcária) de formas e dimensões irregulares, juntas por argamassa de cal e areia, em geral ao traço 1:3; representam uma grande parte da construção antiga de alvenaria de pedra do nosso país, na secção 2.2.6 faz-se uma caracterização mais pormenorizada deste tipo de construção, Figura 2.9 b);
- construções de alvenaria mista, tipicamente compostas por dois ou mais materiais, sendo estes: pedra de diferentes origens (granito, calcário e xisto), elementos cerâmicos de barro vermelho (tijoleiras e tijolos), argamassa (normalmente com base em cal aérea) madeira e ferro; a Baixa Pombalina, cujos edifícios foram construídos após o terramoto de 1755, é o principal exemplo de construções de alvenaria mista no nosso país e constituídos por alvenaria e madeira; as paredes interiores podem ser de tabique ou de frontal, sendo que as últimas são constituídas por uma armação designada por «Cruz de Santo André», preenchidas com detritos de tijolo ou de pedra argamassada [4, 59, 65, 67, 68, 72], Figura 2.9 c).
- construções de cantaria: constituídas por pedras aparelhadas de grandes dimensões e com forma de paralelepípedos, estas construções são típicas de edifícios monumentais ou de grande valor histórico; a cantaria era apenas utilizada nos paramentos superficiais e em elementos singulares, sendo que o interior era de alvenaria de pedra; eram utilizados perpianhos (pedras de forma regular e comprimento igual à espessura da parede) alternados com pedras de dimensões mais pequenas (placas), para travamento vertical das paredes; utilizavam ainda gatos de ferro ou cavilhas de pedra, madeira ou de metal, para reforçar as ligações entre as pedras de cantaria e impedir as deformações das paredes; as juntas verticais tinham de ser alternadas [65, 67, 68], Figura 2.9 d);

- construções de enxilharia ou silharia: caracterizam-se por pedras grosseiramente desbastadas, designadas por enxilhares ou silhares (geralmente com forma de prismas retangulares), aparelhadas de forma muito pouco cuidada e que normalmente eram rebocadas; a enxilharia diferencia-se da cantaria, por apresentar paredes mais toscas e maior irregularidade nas dimensões e no assentamento das pedras nas fiadas [67, 68], Figura 2.9 e).



a) construção em alvenaria de pedra seca; b) parede de alvenaria de pedra irregular [7]; c) «Cruzes de Santo André» de edifício pombalino; d) construção de cantaria – Torre de Belém; e) parede de silharia [107]

Figura 2.9 - Tipos de construções de alvenaria de pedra

2.3.1. Construções de alvenaria de pedra irregular

Como foi dito no início deste capítulo, no presente trabalho é dada uma maior atenção à construção de alvenaria irregular, por esta ter sido a solução construtiva adotada no principal trabalho de investigação de referência, ao qual este trabalho pretende dar continuidade, em aspetos relativos à durabilidade face aos sais solúveis. Por este motivo, faz-se em seguida uma caracterização mais pormenorizada deste tipo de construção.

As paredes de alvenaria irregular, como o próprio nome indica, eram construídas com pedra irregular em forma e dimensão, ligadas entre si por argamassa de cal aérea e areia muitas vezes ao traço volumétrico médio de 1:3, Figura 2.10.

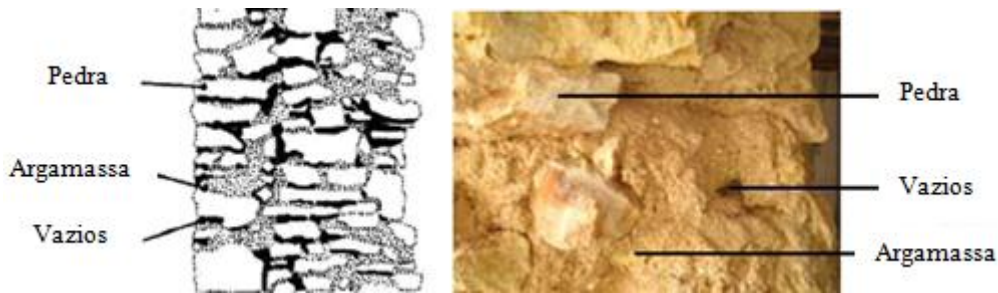


Figura 2.10 - Componentes de alvenaria de pedra irregular [77]

Quando os cabocos eram abertos e as fundações terminadas, dava-se início à construção da parede, tomando sempre o cuidado de limpar e molhar muito bem as pedras antes de se proceder ao assentamento com a ajuda da argamassa. Esta podia ser aplicada no leito das pedras, antes de proceder ao seu assentamento, ou de forma inversa, onde as pedras eram primeiro colocadas em posição, sem argamassa, de forma a definir a sua melhor disposição e só depois argamassada. Para uma construção de boa qualidade, em algumas fiadas horizontais das zonas correntes (zona entre os vãos), deveriam ser intercalados perpianhos com pedras de menores dimensões (placas) de forma a preencher os espaços entre estes, aumentando a resistência das paredes face aos sismos, evitando a fendilhação vertical e melhorando a ligação das paredes resistentes ortogonais (fachadas com empenas). Para complementar o reforço da ligação entre as paredes exteriores, também se utilizavam ferrolhos metálicos. Nos cunhais por vezes utilizavam pedras mais ou menos emparelhadas, proporcionando maior estabilidade à estrutura [4, 65, 67, 68, 76], Figura 2.11.

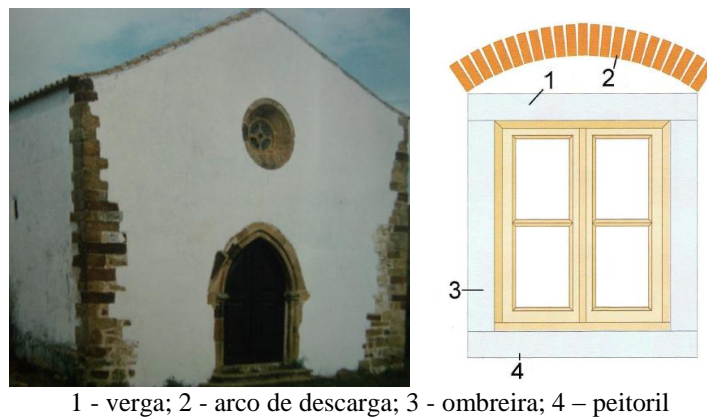
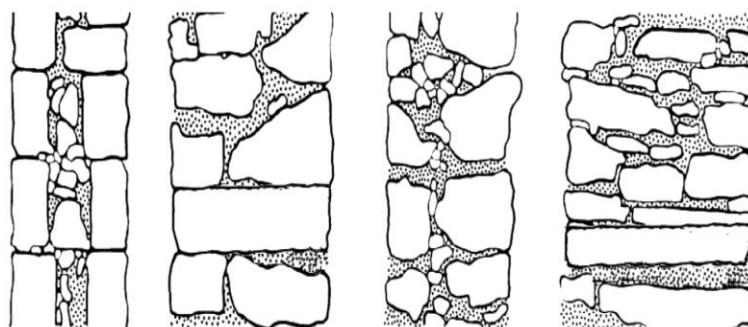


Figura 2.11 - Reforço dos cunhais e representação esquemática de reforço do vão de janela [4, 107]

Os vãos de portas e janelas eram igualmente reforçados, isto devido à interrupção da estrutura resistente e às elevadas tensões nessas áreas durante acontecimentos como sismos ou assentamentos de fundações. Para reforçar estas zonas executavam sobre os vãos, lintéis (vergas ou padieiras) de pedra apoiados nas paredes ou então arcos de descarga em tijolo maciço, que apoiavam na alvenaria dos nembos [4, 65, 67, 68, 76], Figura 2.11.

As paredes de alvenaria irregular podiam ser constituídas por um pano, dois panos com ou sem ligação

parcial e três panos [4, 65, 67, 68, 76], Figura 2.12.



a) Três panos; b) Dois panos com ligação; c) Dois panos sem ligação; d) Um pano

Figura 2.12 - Vários tipos de seções em paredes de alvenaria de Pedra [68]

No caso das paredes de pano único, estas encontravam-se imbricadas entre si, com perpianhos para travamento vertical. Nas paredes que continham três panos, o núcleo central era preenchido com material de pequenas dimensões e mais frágil. Tratava-se de uma solução construtiva de menor qualidade muito propícia a roturas, facilitadas pela separação das camadas e perda de material, como tal, os perpianhos eram muito importantes para reduzir fenómenos de fendilhação vertical e abaulamento [4, 65, 67, 68, 76].

2.4. Anomalias em edifícios antigos

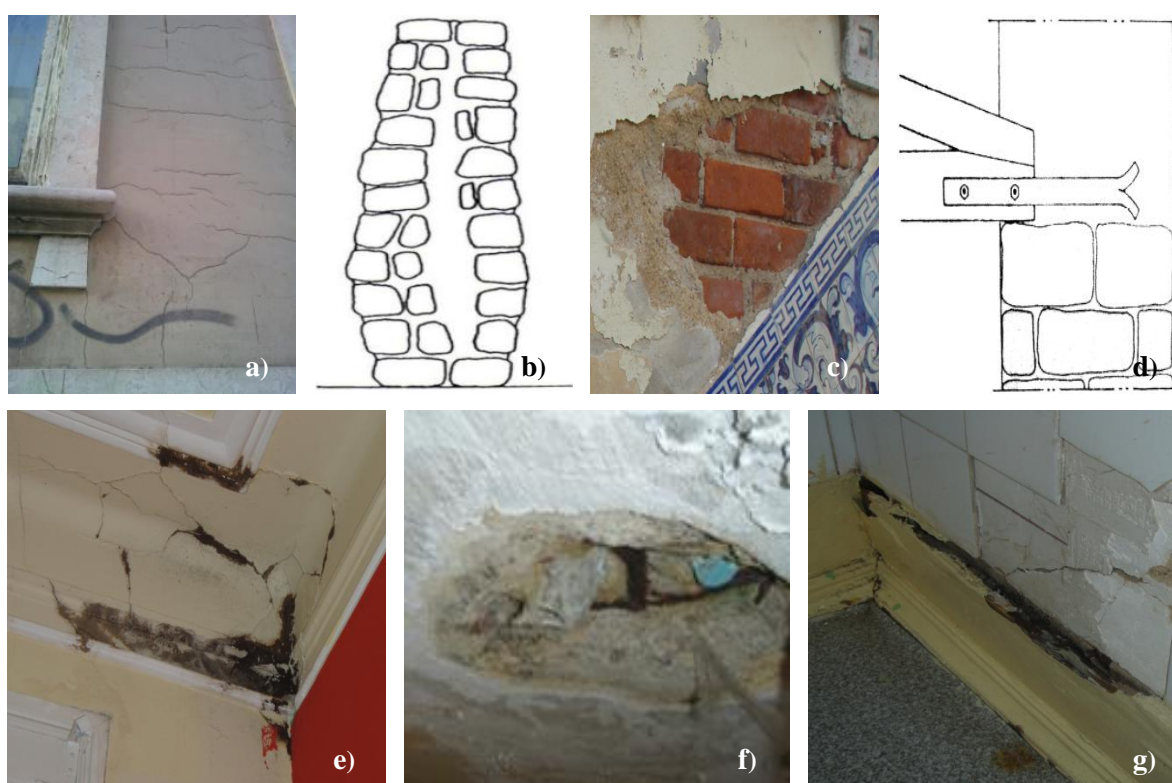
As construções antigas necessitam de comportar ações periódicas de conservação e manutenção, e quando estas não ocorrem ou por outro lado foram sujeitas a intervenções de reabilitação inadequadas, surgem patologias. Estas podem surgir devido às tenções aplicadas pelas ações superarem a capacidade resistente dos materiais em zonas significativas, por aumento das ações ou diminuição da capacidade resistente, em consequência do envelhecimento dos materiais ou da baixa qualidade da construção [4, 65]. Outra situação que conduz a anomalias é a presença de humidade nas paredes originada nos fenómenos de condensação, capilaridade ou infiltração, provocando separadamente ou em conjunto a deterioração dos materiais e originando condições insalubres [33, 58]. As anomalias estruturais mais frequentes nas construções de alvenaria irregular são:

- Fendilhação, caracterizada pelo aparecimento de fendas, pode resultar de movimentos provocados por assentamentos diferenciais das fundações, ação sísmica, vibrações resultantes do tráfego rodoviário de veículos pesados e/ou obras nas proximidades ou ainda devido a efeitos de remodelações interiores mal concebidas ex.: remoção de elementos resistentes; pode ocorrer nas zonas correntes das paredes, nas zonas mais frágeis, como vãos de portas e janelas devido à elevada concentração de tensões, Figura 2. 13 a), e ainda na ligação de paredes ortogonais. A

colocação indevida dos perpianos poderá causar a fendilhação vertical na parede, resultando em abaulamentos significativos na existência de compressões elevadas, Figura 2. 13 b) [4, 64, 65, 66, 68].

- Desagregação, tem origem no agravamento das fendas existentes e do envelhecimento natural do edifício, na ação dos agentes climáticos, (a alternância entre calor e frio, provoca sucessivas expansões e contrações), na erosão devido às águas de diferentes origens que fomentam a remoção dos finos da argamassa de assentamento, assim como a ação do vento que arrasta partículas de areia e poeira em suspensão contribuindo para o desgaste da superfície das paredes. Esta anomalia incide principalmente nas paredes do piso térreo, o que evidencia que ações mecânicas como choques de veículos, vandalismo, entre outras, contribuem também para o agravamento desta patologia, Figura 2. 13 c) [4, 64, 65, 66, 68].
- Esmagamento das paredes, surge geralmente em zonas localizadas, como pontos de aplicação de cargas concentradas excessivas, por exemplo, a descarga de vigas em paredes sem a presença de apoios adequados ou reforços locais que ajudem a baixar as tensões nestes pontos, ou quando as cargas aplicadas são superiores ao previsto, Figura 2. 13 d); nos edifícios antigos, contíguos a construções novas que tenham caves com muros de suporte ancorados, poderão ocorrer esmagamentos ao nível do piso térreo, devido à pressão das injeções das ancoragens, podendo criar tensões ascendentes no solo, estendendo às fundações e por sua vez às paredes, originando os esmagamentos [4, 64, 66, 68].
- Ação da água, que pode ter origens na precipitação, no terreno, e na condensação; a penetração da água na parede é proporcional ao grau de fendilhação ou desagregação da mesma, agravando as anomalias já existentes, e por sua vez a capacidade de isolamento térmico da parede fica reduzida devido à elevada condutibilidade térmica da água face à do ar, para além do aparecimento de manchas de humidade nos paramentos interiores das paredes exteriores; a humidade do terreno que ascende por capilaridade nas fundações e paredes, vai dissolvendo os sais solúveis da alvenaria e do solo, e com a evaporação da humidade do interior da parede, dá-se a deposição provocando eflorescências (cristalização dos sais à superfície da parede), ou criptoflorescências, (cristalização dos sais sob os revestimentos), originando desagregações, empolamento do reboco e degradação da alvenaria, Figura 2. 13 c); a humidade de condensação resulta do vapor de água que se condensa nos paramentos interiores da envolvente, isto pode-se dever à temperatura interior baixa, deficiente isolamento térmico ou fraca ventilação (atrás dos móveis, por exemplo), provocando manchas de bolor, nas zonas correntes de alvenaria, ou mesmo de cogumelos, no caso de elementos de madeira [4, 16, 30, 33, 64, 65, 66, 68], Figura 2. 13 e).

- Oxidação dos elementos metálicos, quando em contato com o oxigênio presente na água e no ar, oxidam e enferrujam; pode ocorrer em escadas ou varandas, quando não têm a proteção adequada e ainda nos elementos de travamento das paredes (ferrolhos metálicos), aumentando o seu volume levando à fendilhação dos revestimentos [4, 64, 66, 68, 69], Figura 2. 13 f).
- Degradação de elementos de madeira por agentes biológicos, sendo que os agentes biológicos que atacam os elementos de madeira são os fungos de podridão, os insetos, as térmitas e os carunchos. Esta anomalia se deve à infiltração sazonal da humidade nas paredes, que acontece tanto pelas paredes resistentes ou pela junta entre dois edifícios, o que diminui significativamente a resistência mecânica da madeira, Figura 2. 13 g). [4, 64, 66, 68].



- a) fendilhação na zona do vão; b) esquema do abaulamento de parede por fendilhação vertical [4];
c) desagregação da alvenaria; d) Pormenor do apoio das asnas numa parede [4, 68]; e) mancha de bolor no teto;
f) degradação de elemento metálico; g) degradação dos elementos de madeira numa parede

Figura 2. 13 - Tipos de anomalias nas paredes de alvenaria de pedra

Por outro lado as anomalias em fundações de edifícios antigos podem estar relacionadas com o terreno de fundação, com a própria fundação ou com a estrutura do edifício, quando as cargas são muito elevadas para as fundações existentes. Relativamente ao terreno de fundação, a elevada presença de água ou a descompressão por alteração do equilíbrio pré-existente, por exemplo devido a escavações nas imediações ou a sobrecargas, podem conduzir a assentamentos ou rotações diferenciais, seguidos de fendilhação nas paredes.

Quando ocorrem alterações do nível freático, por efeito de bombagens de água, o espaço ocupado por esta vai ser preenchido por partículas de solo, provocando movimentos de assentamento. Este caso é frequente quando se faz o rebaixamento do nível freático para construção de edifícios novos, provocando assentamentos nos edifícios vizinhos.

A ocorrência de infiltrações de água da chuva ou proveniente de roturas de canalizações de água e esgoto, revela-se igualmente estar na origem de possíveis anomalias, pois a água procura caminhos de escoamento, através de meios mais porosos e os regimes criados podem conduzir ao arrastamento dos finos do solo, criando-se assim situações favoráveis à ocorrência de assentamentos.

Em relação às anomalias na própria fundação, no caso das fundações diretas (sapatas), ou semi-diretas (poços), as mais frequentes são a redução da secção de contacto entre a fundação e o solo e a degradação das características mecânicas das alvenarias, incitando movimentação diferencial nas fundações. Entre as causas mais comuns desta anomalia estão o envelhecimento dos materiais ou alterações na sua constituição, provocadas pelo arrastamento dos finos da alvenaria da fundação pelas águas subterrâneas ou pela exposição após escavações periféricas, superficiais ou em profundidade.

No caso das fundações indiretas por estacas de madeira, o apodrecimento deste material está na origem das anomalias mais comuns [4].

2.5. Efeitos dos sais solúveis nas alvenarias dos edifícios antigos

As alvenarias dos edifícios antigos podem conter uma elevada quantidade de sais solúveis, devido a terem sido expostas ao longo do tempo à sua deposição por transporte, por capilaridade a partir do terreno, pelo efeito da poluição atmosférica, pela ação atmosférica (no caso de ambientes marítimos) ou ainda devido a sais existentes nos próprios materiais de construção (argamassas, tijolos cerâmicos, por exemplo).

As ações mecânicas e químicas que ocorrem devido à presença dos sais, provocam danos na superfície e no interior dos elementos estruturais. Originam também problemas estéticos, diminuem as condições de habitabilidade, levam a reparações de elevados custos e por vezes podem afetar a segurança do edifício a nível estrutural [5, 21, 28, 34, 35].

A existência de sais pode condicionar algumas soluções empregues na reabilitação, por exemplo na utilização de uma nova argamassa ou calda de injeção, pois esta liberta sais que depois migram para a superfície, quando em contacto com água. É um dos tipos de anomalias de correção mais difícil, ou mesmo impraticável, pois é fisicamente impossível remover esses sais do interior dos materiais porosos [21, 32].

O processo de degradação dos materiais de construção pode ser agravado, de acordo com a natureza e porosidade dos mesmos (isto é, da distribuição e da dimensão dos poros), as condições ambientais,

assim como do tipo de sal³ e sua concentração no material poroso, (mediante a sua solubilidade pode originar deteriorações diferentes) [13, 61].

O comportamento de secagem dos materiais é largamente influenciado pelas condições ambientais, e consequentemente também influencia na taxa de cristalização dos sais [13, 21, 32].

Para que os sais solúveis sejam transportados para o interior do material poroso, é necessário que a água esteja no estado líquido, bastando haver alterações na humidade relativa do ar para lhe induzir danos, pois tanto os fenómenos de cristalização como hidratação podem introduzir tensões internas nos materiais [13, 21, 32].

Os fenómenos de cristalização e hidratação dos sais estão relacionados com a sua higroscopicidade, ou seja, a capacidade dos sais de absorverem a humidade presente no ar. Dissolvem-se quando a humidade relativa está acima dos 65-75% e para valores abaixo cristalizam-se, aumentando de volume. O valor da humidade relativa para o qual se faz a transição entre as fases de dissolução e cristalização, varia em função do tipo de sal, do seu grau de pureza e da combinação com outros tipos de sal, fazendo baixar o nível de humidade relativa necessário para ocorrer a dissolução [21, 32, 33, 34, 35].

Os sulfatos, carbonatos, cloretos, nitritos e nitratos são os sais solúveis que normalmente se associam à ocorrência de manifestações patológicas, em que os três últimos são muito higroscópicas [33].

Cada tipo de sal tem o seu próprio comportamento, gerando taxas de degradação distintas quando testados em diferentes substratos [13].

Dos muitos sais solúveis existentes nas alvenarias, um dos mais relevantes é o cloreto de sódio [13]. A presença de cloretos está geralmente associada à proximidade com ambientes marítimos ou com à utilização de materiais que contenham estes sais (areia de praia mal lavada, por exemplo) [32].

O cloreto de sódio, ou halite como também é denominado, é muito solúvel e higroscópico, e quando em solução tem muita mobilidade, penetrando nos materiais e levando à degradação dos mesmos através dos ciclos sucessivos de dissolução/cristalização [21].

O ataque dos cloretos baseia-se numa ação mecânica que ocorre quando existe a formação dos cristais no interior do material poroso, induzindo tensões nas paredes do poro, capazes de provocar desintegração do material [21].

³ Sais diferentes têm condições de cristalização e dissolução distintos, como por exemplo, uns só se dissolvem com teores de humidade que podem ser muito superiores nalguns [21]

2.6. Técnicas de reabilitação de paredes de edifícios antigos

A prevenção é o caminho mais económico e promove uma plena utilização dos edifícios. Para diminuir o número de ações de reabilitação é importante fazer uma correta manutenção e conservação dos edifícios ao longo da sua vida, tais como ações de limpeza, pequenas inspeções, reparações e pinturas, dessa forma é possível manter os edifícios sãos por um maior espaço de tempo.

Quando isto não acontece torna-se necessário levar a cabo ações de reabilitação, o que vai solucionar as anomalias construtivas, ao mesmo tempo que melhora o desempenho do edifício, aumentando o nível de qualidade, atingindo-se por vezes exigências funcionais muito acima às quais o edifício foi projetado [3, 4].

Antes de ser levada a cabo uma reabilitação, deve ser feito: [74]:

- um exame preliminar onde é realizada uma análise histórica do edificado assim como um levantamento geométrico;
- caracterização da construção e seu funcionamento estrutural, recorrendo a modelos computacionais tipo elementos finitos ou ensaios dinâmicos;
- identificação das anomalias e devidas causas, para uma apreciação mais fidedigna da estrutura (diagnóstico);
- uma escolha criteriosa e adequada aplicação (terapia).

Após a escolha do tipo de intervenção a realizar, é necessário ter em atenção alguns aspetos tais como [3, 9, 14, 65, 70, 76]:

- durabilidade dos materiais;
- eficácia dos materiais, assegurando a compatibilidade física, química e mecânica dos mesmos, satisfazendo as exigências funcionais para que se destina para além de ser a mais adequada;
- garantir a reversibilidade dos materiais, para que, no caso de não serem os mais adequados, possam ser removidos sem que seja danificada a estrutura;
- realizar a mínima intervenção possível, no menor prazo de execução técnica exequível, de forma a diminuir o período de maior vulnerabilidade da estrutura.

Durante e após as intervenções é necessário fazer a monitorização da eficácia da intervenção (controlo).

As técnicas de reforço devem ter como objetivo a manutenção do esqueleto estrutural de origem e não aumentarem significativamente a massa nem a rigidez dos componentes [65].

Apresentam-se de seguida algumas das principais técnicas de reforço em paredes:

- injeções de caldas e resinas, introduzidas em furos previamente feitos no paramento exterior da alvenaria, num padrão de furacão dispostos em quincôncio (quatro furos dispostos em quadrado e um furo no meio); são utilizadas para preencher vazios e fissuras no interior da alvenaria, assim como para consolidar e melhorar as características resistentes da parede [3, 70, 76]; são injetadas por gravidade, pressão ou por vácuo, e podem ser de silicatos de sódio ou de potássio, cimentos estabilizados por cal ou bentonite, cimentos especiais ou então de materiais nobres tais como resinas epoxídicas e resinas de poliésteres [3, 74]; de modo a permitir a penetração nas cavidades existentes, as caldas devem ser pouco retrácteis e possuir fluidez suficiente para preencherem os vazios e/ou fendas existentes; quando as cavidades têm grandes dimensões, é injetada argamassa ou betão de baixa viscosidade [70, 74], Figura 2. 14 a).
- gateamento de fendas é uma técnica utilizada para garantir uma boa ligação entre as pedras, e é aplicada em conjunto com a injeção de fendas, para mitigar a concentração de tensões elevadas nos grampos; é realizada com a ajuda de grampos de latão ou aço inox, ou «gatos» como é conhecido, estes atravessam as fendas em ambas as faces da alvenaria, a ancoragem é realizada por meio de uma resina epoxídica ou calda de cimento; esta técnica também pode ser aplicada no reforço das ligações de canto entre paredes exteriores (cunhais) e ortogonais, Figura 2. 14 b); o procedimento passa pela remoção da argamassa e limpeza do suporte com jato de água ou ar, depois a calda é injetada em locais com afastamento aproximado de 0,5 m e por último são colocados os grampos metálicos com um diâmetro igual ou superior a 6 mm [3, 68, 74, 76].
- substituição do material degradado, baseia-se na substituição parcial do material degradado que possa existir na alvenaria por materiais novos, são aplicados em elementos cerâmicos (tijolos) e pedras, garantido a compatibilidade dos materiais, [3, 76]; é recomendável o uso de argamassas correntes de cimento e areia à qual são adicionados aditivos anti-expansão ou anti-retração, argamassas de cal e areia ou argamassas tradicionais de cimento, cal e areia para melhorar a compatibilidade mecânica e física dos materiais [3, 70]; tais procedimentos como a limpeza da superfície antiga, o escoramento da zona total a ser tratada, e ainda, no caso da alvenaria irregular, a numeração dos blocos, são alguns cuidados que devem ser tomados antes de se proceder à aplicação desta técnica [65].
- tirantes passivos, trata-se de elementos de ferro ou de aço macio (0,15 a 0,25% de carbono) embebidos nas alvenarias fixados por ancoragens, e estão sujeitos a esforços axiais, Figura 2. 14 c); são denominados de tirantes passivos porque não alteram as condições de equilíbrio da

estrutura, têm como função mobilizar ações que contrariem as forças contraproducentes ao equilíbrio na estrutura [3]; este tipo de reforço oferece o inconveniente de poder sofrer alongamentos relativamente grandes por efeitos de relaxação do aço, desta forma, são tomadas medidas preventivas tais como a utilização de aço com elevada resistência à tração ou varões de FRP (Fiber Reinforced Polymer, polímeros reforçados com fibra), sobredimensionar os varões aumentando a sua secção, ou ainda aplicar uma força axial que seja o suficiente para a sua fixação mas que possibilite atenuar o efeito de relaxação [26].

- pré-esforço, trata-se de uma técnica reversível que promove uma melhor resistência mecânica assim como a ductilidade da alvenaria e, aplicada com tensões relativamente baixas permite compensar em zonas críticas, a deficiência das estruturas de alvenaria a esforços de tração, sendo possível um maior controlo da deformabilidade e da fendilhação, Figura 2. 14 d); consiste na aplicação de varões metálicos tracionados, com proteção anti corrosão, que vão introduzir na estrutura um novo sistema de forças [65, 76]; regra geral é aplicada quando há eliminação de elementos estruturais, tais como pilares ou paredes [70].
- refechamento de juntas, consiste na remoção de parte da argamassa danificada (na profundidade de 5 a 7 cm e altura de 1 cm aproximadamente), seguida de uma lavagem da junta com um jato de água a baixa pressão, e posterior substituição do material por um de melhores característica mecânicas e durabilidade [65, 76]; em paredes com dois paramentos, a argamassa das juntas de um paramento só deve ser removida após a conclusão dos trabalhos do paramento oposto, para não ser prejudicada a estabilidade da parede, assim como se deve deixar pelo menos um terço da argamassa central no núcleo [1], Figura 2.13 e); com a aplicação deste método são melhoradas as condições de impermeabilidade do edifício, as resistências mecânicas são incrementadas para além de existir um maior controlo da fendilhação da alvenaria [76, 78].
- reboco armado, consiste na colocação de uma armadura na parede, num pano ou em ambos, fixada por meio de pregagens (1,5 a 2,5 mm de diâmetro) ou preferencialmente por conectores, para prevenir a desagregação da parede; esta pode ser em fibra de vidro com proteção anti-alcálica, chapa de metal distendido, em malha de aço eletrossoldada com proteção anti-corrosiva ou ainda em aço inox; posteriormente é colocada uma argamassa de cal e areia ou micro-betão com uma espessura entre os 5 e 30 cm [3, 15, 65, 74, 76], Figura 2. 14 f); aplica-se em caso de danos nas paredes, muitas vezes sob a forma de fissuras, controlando a fendilhação, melhorando a ductilidade da estrutura e a ligação das paredes, aumentando também a resistência ao corte; a sua principal desvantagem assenta na sua irreversibilidade, assim como nas alterações a nível arquitetónico provocado pelo aumento da secção transversal [3, 15, 65, 76].

- cintagem global dos edifícios, consiste na cintagem das paredes periféricas e tem como objetivo melhorar o comportamento da alvenaria face a forças ortogonais ao plano [65], Figura 2. 14 g); trata-se de uma prática parcialmente reversível e é aplicada geralmente em zonas de fraca ligação entre pavimentos, paredes e coberturas, melhorando o seu comportamento sísmico; tradicionalmente têm sido aplicados com materiais como o aço e o ferro [14]; o processo de aplicação passa pela remoção da camada de reboco, seguido da reparação de anomalias existentes e remoção do material solto, depois da superfície ser limpa são colocados os elementos de cintagem fixados por conetores [74].
- encamisamento, também conhecido por *Jacketing*, é uma técnica irreversível que consiste na aplicação de uma camada de recobrimento em betão armado com uma espessura superior ao reboco (entre os 5 e 10 cm) reforçada com malha de aço, fixa à parede através de pregagens, num processo semelhante ao dos rebocos armados, Figura 2. 14 h); a sua aplicação é adequada para alvenarias com materiais muito heterogéneos, e ainda argamassas em elevado estado de degradação; obtém-se um revestimento de maior espessura que um reboco convencional e com características mecânicas superiores às que se verificam nos rebocos armados, sobretudo ao corte [65, 76].
- materiais compósitos FRP, trata-se de uma técnica reversível e de simples aplicação, subsiste na colocação de polímeros reforçados com fibras (FRP - fibre-reinforced polymer), que podem ser de carbono ou de vidro, fixadas ao suporte através de resinas de poliéster, epoxy ou acrílica; os materiais compósitos são comercializados em forma de fitas, mantas, em laminados, Figura 2. 14 i), ou em barras [76]; a sua aplicação em alvenarias é muito invulgar, porque a irregularidade da parede dificulta a sua aplicação [70, 74]; as vantagens associadas a esta técnica são a elevada resistência à tração, peso reduzido e reversibilidade; por outro lado, os aspetos menos positivos são o custo elevado, a baixa resistência aos raios UV e ao fogo, o comportamento frágil e pouca durabilidade face aos ciclos gelo-degelo [74].
- desmonte e reconstrução, consiste substituição de parte dos elementos que estiverem em pior estado de conservação por outras de melhor qualidade, Figura 2. 14 j); devem ser utilizadas argamassa com características similares à original tendo em atenção para que seja pouco retrátil para melhor compatibilidade; por norma utilizam-se argamassas bastardas de cimento e areia [1]; trata-se de um processo moroso mas muito eficaz para melhorar a capacidade mecânica das alvenarias, corrigir fendilhações, degradações pontuais, e ainda para melhorar a sua qualidade construtiva [74]; durante a reconstrução, no caso de alvenarias de pedra sã, o desmonte completo

de elementos estruturais, requer um cuidado na sua numeração prévia assim como na sua reposição [74].

- confinamento transversal simples, consiste na utilização de elementos metálicos (geralmente em aço inox ou inoxidável) designados por conectores, no caso de terem comprimento igual à espessura da parede, ou pregagens, no caso de apresentarem comprimento inferior à espessura da parede a reforçar; recorre-se a chapas de ancoragem fixas com o auxílio de porcas, que são colocadas nas extremidades dos conectores ou pregagens e apertadas contra a alvenaria; inseridos em orifícios feitos para o efeito, os conectores ou pregagens são aplicados perpendicularmente ao plano da parede ou inclinados, dependendo de se tratar do primeiro ou segundo caso, e depois selados com caldas de injeção adequadas [65]; quando o confinamento é feito para melhorar a ligação entre paredes perpendiculares, toma a designação de «pregagens-costura», e é normalmente aplicada em conjunto com outras técnicas, como é o caso de rebocos armados, injeção de caldas ou refechamento de juntas; também pode ser realizado com a introdução de um conjunto reticulado de barras de aço inclinadas e depois injetadas com caldas de cimento, denominando-se neste caso de «retículo cimentato», Figura 2. 14 k) [65]; por serem uma solução prática e eficaz no controlo da dilatação transversal das paredes o confinamento transversal é frequentemente combinado com outras técnicas de intervenção [74].
- conectores, aparecem como forma de melhorar a capacidade resistente da parede, aumentando o seu confinamento; são aplicados em toda secção da parede, paralelamente ao plano, em furos previamente abertos para o efeito, Figura 2. 14 l); revela-se uma técnica com maior relevância em paredes com várias folhas, pois é reduzida a possibilidade de instabilização devido a cargas verticais e controla-se o possível abaulamento por compressão; esta técnica de reforço é constituída por elementos metálicos, inseridos em furos e fixos à alvenaria com a ajuda de caldas de injeção; o conector é fixo por meios mecânicos, e as tensões devidas ao aperto são distribuídas através de duas placas metálicas, uma em cada lado da parede [57, 65].
- reforço por pregagens, consiste na introdução de peças metálicas, com tratamento anticorrosivo, em furos previamente executados, podendo ser aplicados na generalidade da estrutura reforçar, ou apenas localmente [81]; são posteriormente aplicadas chapas de ancoragem fixas nas extremidades da ancoragem, através de porcas que apertam as chapas contra a alvenaria, produzindo o efeito de confinamento da alvenaria [65]; para a selagem dos furos, recorre-se à injeção de caldas apropriadas para o efeito, o que vai promover a proteção da armadura assim como a transmissão das tensões da parede para os varões através do atrito.

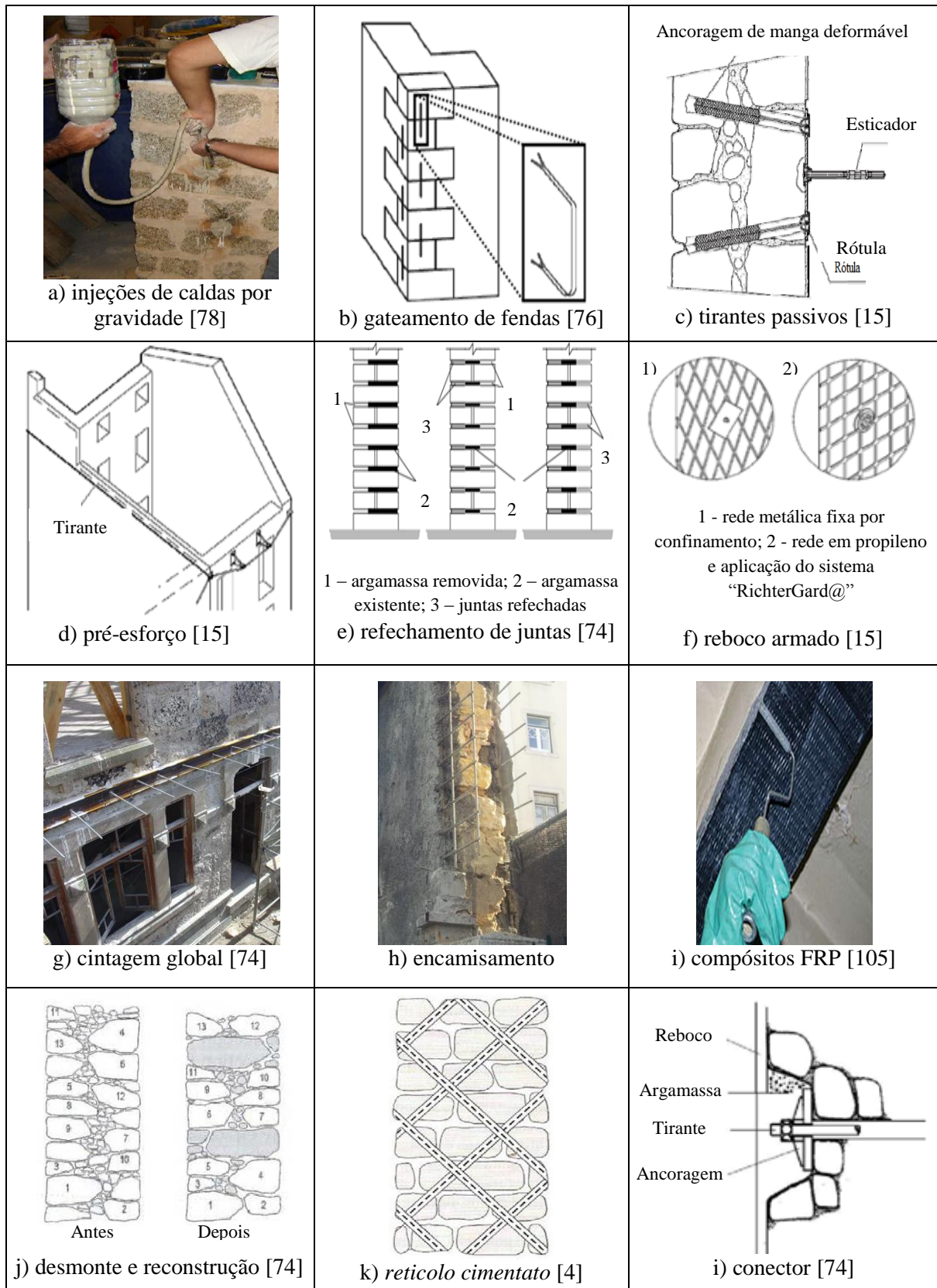
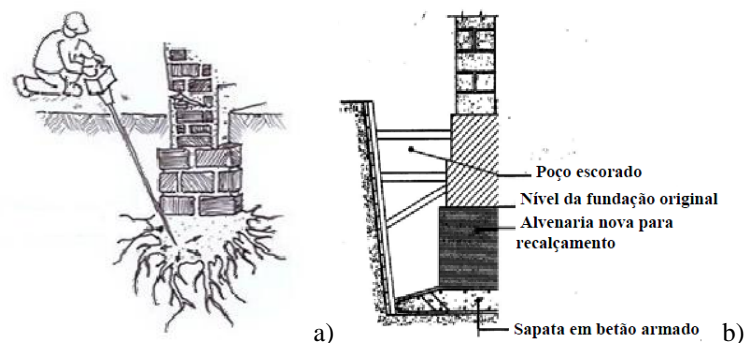


Figura 2. 14 - Técnicas de reabilitação de paredes de edifícios antigos

Torna-se necessário fazer intervenções a nível da consolidação e reforço de fundações quando normalmente acontecem [4]: alterações nas condições do terreno de fundação, causada por arrastamento de finos, abaixamento do nível freático, descompressão do solo de fundação devido a escavações nas imediações, etc., ocorrendo assentamentos diferenciais e consequentemente a fendilhação das paredes; aumento das solicitações dos edifícios, motivada pela alteração do uso do edifício, e consequente aumento de cargas e ainda pela intervenção em fundações na periferia; capacidade resistente das fundações insuficiente, associada normalmente à pouca espessura desta ou à profundidade em que está fundada revela-se muito superficial, resultando em assentamentos e consequente fendilhação no edifício.

Existem várias formas de atuar sobre os problemas relacionados com as fundações de um edifício, sendo possível intervir em três níveis distintos [4]: sobre o terreno de fundação, melhorando as suas características e eliminando as causas dos assentamentos, através de injeção de caldas de cimento por exemplo, Figura 2.15 a); sobre as fundações, reduzindo as pressões transmitidas ao solo através do alargamento da superfície de contacto sapata-solo, através do recalçamento, Figura 2.15 b), ou procurando camadas mais profundas do terreno, melhorando assim as suas características resistentes; sobre o edifício, diminuindo ou redirecionando cargas, aumentando a rigidez de determinadas zonas, criando novas ligações estruturais, etc.



a) Injeção de caldas de cimento no terreno [100]; b) Recalçamento de uma fundação [74]

Figura 2.15 - Esquemas de reforço de fundações

2.6.1. Confinamento transversal contínuo

Este tipo de reforço foi uma das soluções estudadas pelo Professor Fernando Pinho na sua tese de Doutoramento, realizada no DEC-FCT/UNL de 2002 a 2007, que intitula-se «Paredes de alvenaria ordinária - estudo experimental com modelos simples e reforçados» [65]. Este trabalho teve como objetivo a análise comparativa de diferentes soluções de reforço de paredes de alvenaria de pedra irregular. As soluções de reforço tinham como objetivo prevenir ou reparar anomalias, como as resultantes da ação sísmica, assentamentos diferenciais de fundações ou a desagregação da alvenaria.

Para este estudo foram construídos sessenta e dois modelos experimentais de alvenaria irregular (muretes), assentes sobre bases individuais de betão armado com altura de 0,20 m, e foram ensaiados aproximadamente dois terços do número total de muretes.

Construíram-se quarenta e dois muretes com dimensões de 0,40m x 0,80m x 1,20m, para ensaios de compressão axial (designados por muretes pequenos), e vinte com 0,40m x 1,20m x 1,20m, para ensaios de compressão-corte (designados por muretes grandes), Figura 2.16. Sobre os muretes foram construídos lintéis em betão armado com uma altura de 0,15 m e área igual à dos muretes, que servem para a distribuição das cargas verticais a aplicar e suporte dos vários equipamentos durante os ensaios mecânicos [65, 71]. Os muretes foram construídos com pedra calcária de máxima dimensão na ordem dos $D = 25$ cm, assente com argamassa de cal aérea hidratada e areias de rio e de areeiro, ao traço volumétrico de 1:3 (ligante: agregado), utilizando partes iguais de areia de rio e de areeiro e com um coeficiente água/ligante igual a 1,2. Foi utilizada uma proporção de 25% de argamassa e 75% de pedra, por unidade de volume de alvenaria [65, 71].

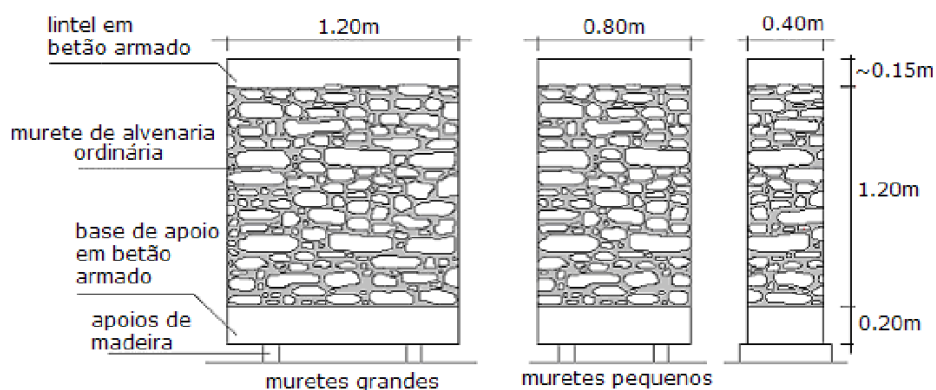


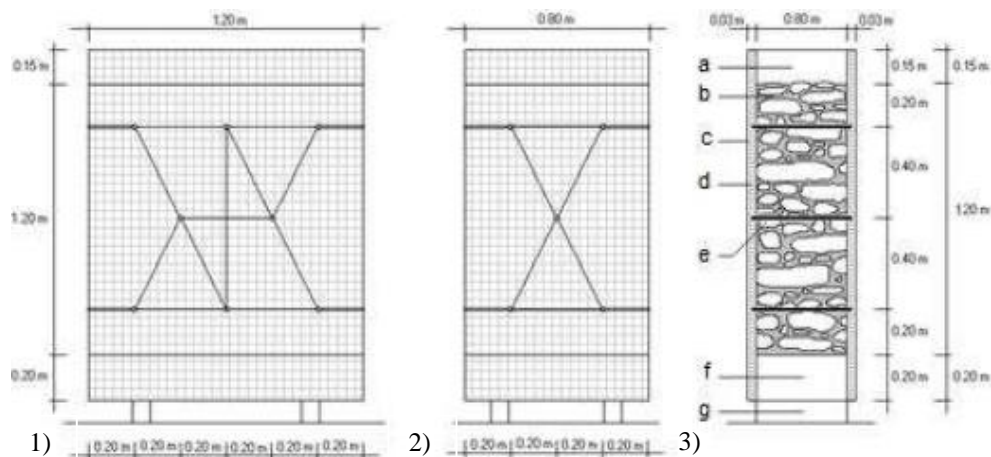
Figura 2.16 - Representação esquemática dos muretes grandes e pequenos [65]

Durante a campanha experimental, foram realizados ensaios de compressão axial e de compressão-corte sobre os muretes, não reforçados e reforçados com quatro técnicas de reforço, denominadas *soluções de reforço I, IIB, III, IV*. De seguida faz-se uma breve apresentação das soluções de reforço, dando enfoque à solução IV, por se tratar da solução à qual o presente trabalho procura dar desenvolvimento numa vertente de durabilidade dos materiais utilizados.

- *Solução de reforço I - Muretes reforçados com confinamento transversal por conectores:* consistiu no reforço dos muretes, recorrendo à aplicação de confinamento transversal simples, por conectores metálicos, distribuídos em quincôncio e selados com calda e com chapas de ancoragem individuais.
- *Solução de reforço IIB - Muretes reforçados com reboco armado e confinamento transversal, sem apoio na base de ensaio:* neste caso os muretes foram reforçados com lâminas de micro-betão armados com malha de metal distendido, sem apoio na base de ensaio. Foi aplicado

confinamento transversal distribuídos em quincôncio, com pregagens aplicadas numa ou em ambas as faces dos muretes ou conectores metálicos a ligar as duas faces.

- *Solução de reforço III - Muretes reforçados com reboco armado sem confinamento transversal, com apoio na base de ensaio:* esta solução englobou o reforço dos muretes, com lâminas de micro-betão projetado e malha de metal distendido, com apoio na base de ensaio e sem confinamento transversal.
- *Solução IV – Muretes reforçados com reboco armado e confinamento transversal, com apoio na base de ensaio:* baseou-se na aplicação de reboco de argamassa bastarda, armado com rede de fibra de vidro, com, com apoio na base e confinamento transversal contínuo por fios de aço zincado. Consistiu na aplicação dum reboco de argamassa bastarda ao traço volumétrico de 1:1:6 (cimento: cal aérea: areia, sendo areia do rio e de areeiro em partes iguais), com uma espessura média de 3 cm, aplicado manualmente em duas camadas com 1,5 cm cada. Este reboco, foi armado com fibra de vidro (com proteção anti-alkalina), com confinamento transversal feito por quatro fios contínuos de aço zincado de 4 mm de diâmetro, que «cose» a alvenaria passando quatro vezes em cada furo [65, 71], Figura 2.17 e Figura 2.18.



- 1) alçado do murete grande; 2) alçado do murete pequeno; 3) corte do murete grande e pequeno: a) lintel de betão armado; b) murete de alvenaria irregular; c) reboco de argamassa bastarda ($e \cong 3$ cm); d) malha de fibra de vidro (dupla); e) quatro fios de aço zincado, com $\phi=4$ mm, em cada furo transversal (confinamento transversal); f) base de apoio em betão armado; g) apoios de madeira (10×7 cm²)

Figura 2.17 - Representação esquemática da caracterização da solução de reforço IV [65]

Os fios foram dobrados à saída de cada furo voltando imediatamente a entrar num dos furos mais próximos, num processo contínuo, dando origem à «cosedura» da alvenaria. À saída dos orifícios os fios eram dobrados sem arestas vivas e em ângulos de 90° aproximadamente, totalizando uma área de 50,24 mm² de fio de aço por orifício. A malha dupla de vidro foi afixada nas duas faces do murete, com a ajuda da passagem dos fios zincados, sendo que nas zonas de entrada/saída, a malha foi reforçada com pequenos «painéis» de malha igualmente dupla. Depois de concluídos os trabalhos de aplicação de rede e passagem dos fios, foi aplicada a segunda camada de reboco. No método de

aplicação do material, houve a preocupação de que fosse feita de forma muito similar à tradicional, de modo que a última camada teve acabamento «à talocha», ficando pronto a receber acabamento. Após o reboco e deixando os respectivos negativos, os furos foram injetados com calda de cimento com uma relação água/cimento = 0,4 [65, 71].



Figura 2.18 - Aspeto dos muretes da solução de reforço IV, antes do início da aplicação da segunda camada de argamassa [24, 75]

A solução IV, baseada no conceito do reboco armado, teve como objetivo responder a algumas problemáticas relacionadas com a grande espessura exigida pelas soluções do tipo II e III., isto deve-se em grande parte ao tipo de confinamento utilizado nestas soluções, ou seja devido às extremidades dos varões roscados, porcas e chapas de ancoragem metálicas, e ainda pela espessura do respetivo recobrimento. As suas principais características são a possibilidade de ser aplicada manualmente, o facto de se tratar de um sistema de confinamento transversal contínuo, confere um incremento de resistência mecânica ao elemento a reforçar, tem espessura semelhante à dos rebocos a substituir pois o sistema de fios ocupa 4 a 5 mm, e finalmente oferece a possibilidade de poder receber diretamente a camada de acabamento [65, 71]. Posteriormente, num estudo também orientado por F. Pinho intitulado «Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional reforçado com confinamento transversal contínuo» [24], esta mesma solução foi testada com a aplicação de fitas metálicas (Figura 2.18), fitas estas que servem de objeto de estudo no presente trabalho numa vertente da sua durabilidade perante a ação de cloretos.

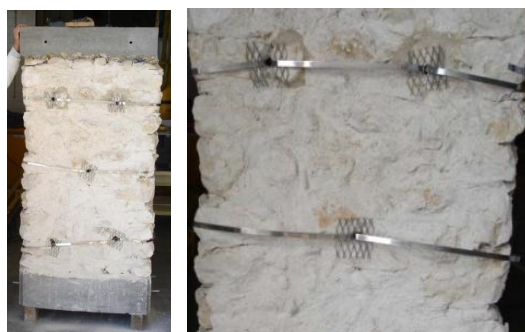


Figura 2.19 - Foto ilustrativa de confinamento transversal contínuo [24, 65]

3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo referem-se os trabalhos de investigação sobre o comportamento de argamassas bastardas e de fitas metálicas face à ação de sais solúveis, assim como trabalhos cujo estudo incidiu em argamassas com as composições semelhantes às utilizadas nesta dissertação.

A pesquisa bibliográfica realizada tem como objetivo, enquadrar o procedimento experimental adotado neste trabalho, e também servir de referência aos valores obtidos na presente campanha experimental. É de salientar que, apesar, da extensa pesquisa, não foi possível encontrar trabalhos de investigação que fizessem a avaliação da durabilidade de fitas de aço inoxidável embebidas em argamassa bastarda face à ação de cloretos.

3.2. Trabalhos experimentais de referência

O principal trabalho de investigação que serviu de referência para este estudo foi realizado no DEC-FCT/UNL por F. Pinho e é intitulado «Paredes de alvenaria «ordinária» – Estudo experimental com modelos simples e reforçados» [65]. Um dos tópicos deste estudo consistiu na análise experimental de diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria irregular, sendo a solução de reforço IV a de maior relevância para o presente estudo, pois nela foi analisada a utilização de reboco de argamassa bastarda armado com rede de fibra de vidro e confinamento transversal contínuo por fios de aço zincado, aplicada a muretes.

A argamassa bastarda utilizada foi produzida ao traço volumétrico 1:1:3:3 (cimento: cal aérea: areia de rio: areia de areiro) e aplicada em duas camadas de espessura média de 1,5 cm. Para o reforço do reboco, foi utilizada malha dupla de fibra de vidro e um sistema de cosedura (confinamento) com fio de aço zincado passando quatro vezes em cada um dos cinco ou oito furos transversais dos muretes pequenos e grandes, respetivamente [65].

Para fins de ensaios de caracterização da argamassa, foram retiradas amostras dos materiais utilizados, durante a preparação das duas camadas de reboco de argamassa bastarda. Os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das areias e da argamassa endurecida estão nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respetivamente. Estes resultados servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 3.1 - Resultados de ensaios de caracterização das areias utilizadas na argamassa de reboco da solução de reforço IV [65]

Característica	Areia de rio	Areia de areeiro
Máxima dimensão do agregado, D [mm]	2,38	0,595
Mínima dimensão do agregado, d [mm]	0,149	0,149
Módulo de finura, Mf	2,6	1,8
Baridade [kg/m ³]	1541,7	1553,0

Tabela 3.2 - Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida utilizada na solução de reforço IV [65]

Característica		Idade [dias]	Argamassa bastarda
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	146 a 154	5637
	Resistência à tração por flexão [MPa]		1,22
	Resistência à compressão [MPa]		4,55
Física	Massa volúmica real [kg/m ³]	181 a 210	2768
	Massa volúmica aparente [kg/m ³]		1875
	Porosidade aberta [%]		32,2
	Absorção de água por capilaridade ¹⁾	181 a 210	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]
	Valor assintótico [kg/m ²]		40,3

¹⁾ O ensaio decorreu com provetes inteiros.

O trabalho realizado por P. Faria [21], intitulado «Influência dos ligantes em argamassas de revestimento para alvenarias antigas» e desenvolvido no DEC-FCT/UNL, serviu igualmente de referência a este estudo. Para esse estudo foram moldados provetes de vários tipos de argamassa sobre os quais se procedeu à determinação das suas características. Contudo, para o presente trabalho, apenas a argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6 serviu de referência. Os materiais utilizados foram a areia de rio, a cal aérea hidratada da marca Lusical, a cal hidráulica da Secil Martingança e o cimento do tipo II e da classe 32,5 N da marca Secil.

Através do ensaio de análise granulométrica à areia de rio, realizado no início deste estudo [13], obtiveram-se uma máxima dimensão de 2,38 mm, mínima dimensão de 0,297 mm e um módulo de finura de 2,7. Os resultados médios obtidos no ensaio de baridade, efetuado a cada constituinte utilizado nas argamassas, apresentam-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resultados do ensaio de baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria [21]

Material	Baridade [kg/m³]
Areia de rio	1590
Cal aérea	570
Cimento	1280

Antes da moldagem mecânica dos provetes em moldes de 16cmx4cmx4cm foi efetuado o ensaio de caracterização das argamassas em pasta (ensaio de espalhamento), cujo resultado foi de 67% para a argamassa de cimento, cal aérea e areia. Posteriormente à exposição dos provetes a uma cura em

ambiente seco, com $T=23\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $Hr=50\pm 5\%$, procederam à caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados se apresentam na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por P. Faria [21]

Característica		Idade [dias]	Argamassa bastarda
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	60	7340
	Resistência à tração por flexão [MPa]		1,23
	Resistência à compressão [MPa]		4,08
Física	Massa volúmica aparente [kg/m^3]		1841
	Porosidade aberta [%]		31
	Absorção de água por capilaridade		Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$]
		Valor assintótico [kg/m^2]	20,9

Após ter sido feita a caracterização dos provetes de argamassa endurecida, realizaram-se ensaios de resistência aos sais, nomeadamente cloretos e sulfatos. Previamente a serem submetidos ao ensaio de resistência aos sais, todos os provetes foram sujeitos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, isto porque, esta ação pode levar à formação de bicarbonatos de cálcio, que se dissolvem na água e são transportados, alterando a percentagem de ligante da argamassa e a sua consequente microestrutura interna [21]. Apresentam-se os resultados nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Resultados de ensaios de resistência aos cloretos das argamassas obtidos por P. Faria [21]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos cloretos		
		Cloretos retidos [%]	Variação de massa [%]	
			Ciclo 30	Ciclo 50
Cal aérea, cimento e areia	¹⁾	4,0	2,0	-1,5

¹⁾ Os ensaios decorreram aos 75 dias de idade (após a secagem até massa constante dos provetes que tinham sido submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade). Como a cura dos provetes só decorreu nas condições definidas até aos 60 dias de idade, considerou-se o ensaio como efetuado aos 60 dias [21]

Tabela 3.6 - Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas obtidos por P. Faria [21]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos sulfatos ¹⁾		
		Variação de massa [%]		
		Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Cal aérea, cimento e areia	365	-5,3	-97,0	-100,0

¹⁾ O ensaio de resistência aos sulfatos decorreu com a utilização de solução saturada de sulfato de sódio

O trabalho de investigação realizado por V. Rato intitulado «Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas» [73], teve como objetivo avaliar a relação entre a granulometria das areias e os tipos de ligantes utilizados nas argamassas, as propriedades da sua microestrutura e o seu comportamento. Neste sentido, foram preparadas várias composições de argamassas envolvendo quatro tipos de ligante (cal aérea, cal hidráulica, cimento branco e um ligante misto composto por cal aérea e cimento Portland corrente) e dezasseis areias com diferentes granulometrias.

A composição que serviu de referência para este trabalho, foi a argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6, onde a utilizaram-se cal aérea hidratada em pó da marca Lusical e cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N da marca Secil. Nesta composição foram usados mais do que dois tipos de areias, pois a influência destas na argamassa era um dos parâmetros sob avaliação, contudo, não encontrando uma areia com máxima e mínima dimensão semelhantes às obtidas na presente campanha experimental, considerou-se para referência a areia cuja máxima dimensão fosse mais próxima da areia de rio aqui utilizada (por ser este o parâmetro que muitas vezes condiciona o cálculo da composição das argamassas e betões). Os valores obtidos na análise granulométrica da areia considerada como referência para este trabalho foram de 2,36 mm e 0,500 mm para a máxima e mínima dimensão do agregado, respetivamente.

Antes de serem compactadas mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm, as argamassas foram sujeitas ao ensaio de caracterização (ensaio de espalhamento), cujo resultado foi de 70% para as argamassas de cimento, cal aérea e areia. Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco, com $T=23\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $Hr=50\pm 5\%$, efetuou-se a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na Tabela 3.7, e servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo [73].

Tabela 3.7 - Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas obtidos por V. Rato [73]

Característica		Idade [dias]	Argamassa bastarda
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	60	5905
	Resistência à tração por flexão [MPa]		0,96
	Resistência à compressão [MPa]		3,02
Física	Massa volúmica aparente [kg/m^3]		1801
	Porosidade aberta [%]		30
	Absorção de água por capilaridade ¹⁾		Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$]
		Valor assintótico [kg/m^2]	22,577

¹⁾ O ensaio decorreu com provetes inteiros

O trabalho de investigação realizado por F. Henriques e V. Rato intitulado «Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade» [34], serviu igualmente de referência para confrontação com os valores obtidos na campanha experimental do presente estudo. Nesta campanha experimental pretendeu-se avaliar o comportamento de determinados produtos disponíveis no mercado, que têm como objetivo otimizar o comportamento de argamassas face aos fenómenos de higroscopicidade dos sais. Utilizaram-se como referência, duas composições de argamassas comuns e de características conhecidas:

- argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia ao traço volumétrico de 1:1:6;
- argamassa de cimento e areia ao traço volumétrico de 1:4.

A areia utilizada em todas as composições foi a areia de rio, com baridade de 1480 kg/m^3 . Todas as argamassas foram misturadas e compactadas mecanicamente em moldes de $16\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$. A porção de água usada na amassadura das argamassas foi doseada de forma a obter um valor de espalhamento na ordem dos 65-70% [34].

A cura dos provetes efetuou-se em ambiente seco com $T=20^\circ$ e $Hr=60\%$. Posteriormente fez-se a caracterização das argamassas endurecidas e ensaio aos sulfatos. Neste estudo são apenas relevantes os valores obtidos na caracterização da argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia. Na Tabela 3. 8 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 3. 8 - Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida estudada por F. Henriques e V. Rato [34]

Característica		Argamassa bastarda	
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	5600	
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1,06	
	Resistência à compressão [MPa]	3,79	
Física	Massa volúmica aparente [kg/m^3]	1843	
	Porosidade aberta [%]	29,5	
	Absorção de água por capilaridade ¹⁾	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$]	15,78
		Valor assíptótico [kg/m^2]	18,802

Outro trabalho de referência foi o realizado por M. C. García-Alonso et al., intitulado de «Comportamento corrosivo de aço inoxidável inovador em argamassas» [27]. Este teve como intuito, no âmbito do reforço de estruturas de betão, comparar o comportamento corrosivo de diferentes tipos de aço entre os quais o AISI 304 (o aço utilizado no presente estudo), face a presença de cloretos. Para tal, foram preparados provetes de argamassa de cimento, areia e água com o traço de 1:3 e aos quais foram adicionados 2 e 5% de cloretos relativamente ao peso do cimento.

Estes foram expostos a ciclos de humidade onde, a humidade relativa na fase húmida era de 95% e de 40% na fase seca. O objetivo do ciclo de humidade é averiguar se com a elevação do potencial da corrosão, que tem lugar quando a argamassa seca consegue atingir o limite de rotura das ligas de proteção do aço inoxidável, facilitando que a corrosão ocorra durante o ambiente húmido.

Foram utilizados barras de 8 mm de diâmetro de cada tipo de aço como condutores elétricos, e foi avaliada a densidade corrente de corrosão i_{corr} [27]. Na Tabela 3. 9 apresentam-se a composição química em peso percentual para o aço AISI 304.

Tabela 3. 9 - Composição química e estrutural dos aço inoxidável AISI 304 [27]

Material	Concentração dos elementos [%]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
AISI 304	0,06	1,14	0,35	0,02	0,01	17,4	8,3	0,12	0,4

Na Figura 3. 1 apresenta-se o i_{corr} dos diferentes aços embebidos em argamassa com 5% de cloretos, ao longo do tempo. Neste podemos observar que entre o início do teste e o ponto A onde a HR é de 95%, a corrosão no aço de carbono é cerca de 100 vezes maior que nos aços inoxidáveis. Entre o ponto A e B, quando a HR cai para os 40%, no caso do aço de carbono dá-se uma grande quebra no i_{corr} sendo comparável aos outros aços, o que não é observado nos restantes aços.

Finalmente quando a HR é novamente aumentada, a corrosão do aço de carbono é reativada tomando valores de i_{corr} ainda maiores. Por fim é de salientar que o i_{corr} do aço AISI 304 é o que apresenta menores valores ao longo das três fases de HR, para além de também não mostrar muita variação ao longo do ensaio [27].

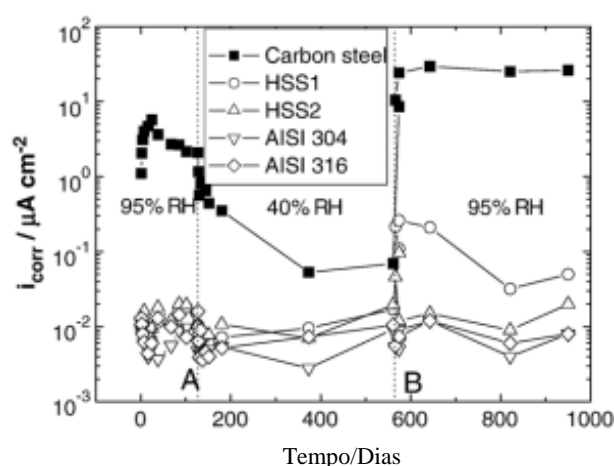


Figura 3. 1 - Comparação do i_{corr} entre os diferentes tipos aços embebidos em argamassa com concentração de 5% de cloretos [27]

O trabalho levado a cabo por M. Kouril et al. intitulado de «Limite da concentração de cloretos nos poros de betão para a ativação dos aços inoxidáveis» [56], pretende avaliar a resistência à corrosão de vários tipos de aços inoxidáveis, quando expostos à solução de betão fresco com alta concentração de cloretos nos poros e diferentes tipos de pH. Para isso foram testados em laboratório durante três dias, o potencial corrosivo de diferentes tipos aços inoxidáveis com superfície lisa e escamada, quando expostos a soluções que a nível alcalino simulam os poros de betão fresco com dois níveis de alcalinidade, pH 12,5 e pH 13,5. Nestas soluções foram adicionados quantidades até 150 g/l de cloretos (NaCl). Com a HR de 90% e uma vez em equilíbrio, as quantidades de 15g/l e 80 g/l correspondem a 0,4% e 3% de concentração de cloretos respetivamente [56].

O tipo de aço relevante para este estudo é o austenítico, como tal toma-se como referência os dois aços designados de FeCr18Ni10 e FeCr18Ni10Mo2 expostos a soluções com pH 13,5, por simular o caso da presença de grandes níveis de óxidos de metais alcalinos. Na Tabela 3. 10, mostra-se a composição química e estrutural destes aços [56].

Tabela 3. 10 - Composição química e estrutural dos aços inoxidáveis FeCr18Ni10 e FeCr18Ni10Mo2 [56]

Material	Concentração dos elementos [%]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
FeCr18Ni10	0,08	1,40	0,64	0,023	0,020	18,06	10,20	0,16	0,12
FeCr18Ni10Mo2	0,07	0,98	0,25	0,025	0,014	17,84	9,86	2,06	0,12

Na Figura 3. 2 a), mostra o potencial corrosivo dos aços com superfície lisa no último dia de ensaio, e podemos observar que as espécies FeCr18Ni10 e FeCr18Ni10Mo2 se mantêm completamente resistentes à corrosão independentemente da concentração de cloretos. Já na Figura 3. 2 b), para estes dois aços, no caso de superfície escamada existe uma quebra na resistência à corrosão a partir de concentrações de cloretos na ordem dos 80 g/l, devido à supressão das ligas de crômio da camada superficial dos aços [56].

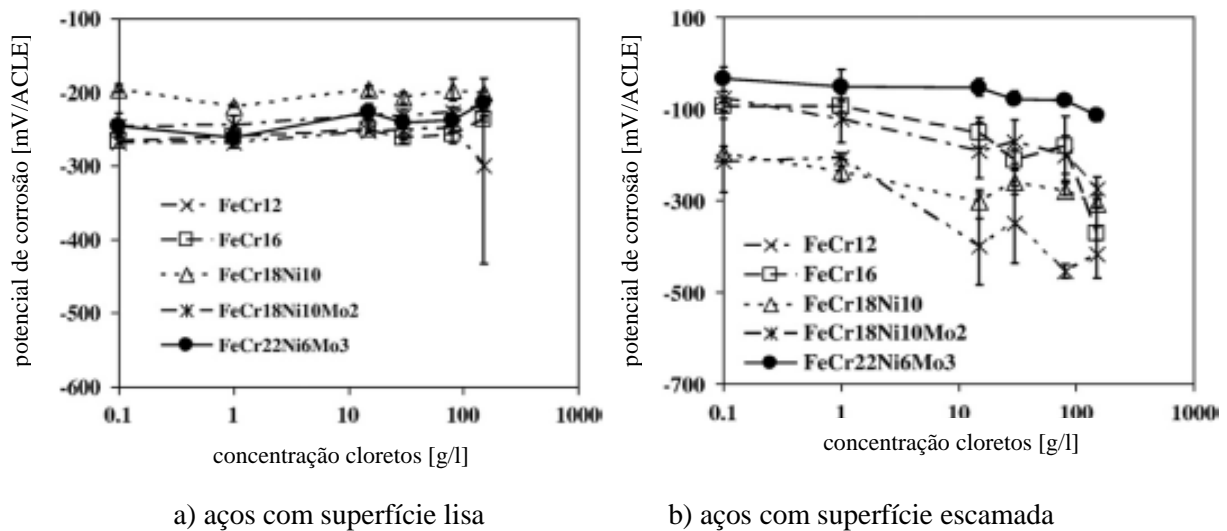


Figura 3. 2 - Potencial corrosivo dos aços dependendo da concentração de cloretos, para superfície lisa e escamada [56]

O ensaio desenvolvido por A. A. Nepomuceno e C. Andare intitulado de «A capacidade de proteção do aço de argamassas poliméricas à base de cimento, contra ataques de cloreto e carbono utilizando a resistência de polarização eletroquímica» [60], serve igualmente de referência para o presente estudo. Neste analisou-se a capacidade de proteção de diferentes tipos de argamassas de cimento Portland modificadas com polímeros, e utilizou-se a técnica de resistência de polarização eletroquímica para monitorizar o comportamento corrosivo de barras de aço quando embebidas nas argamassas e expostas a ambientes com CO₂ e cloretos [60]. A campanha experimental começou com a preparação de provetes de argamassa com diferentes constituintes, após o desmolde a cura deu-se numa câmara com T=20 ± 2 °C, de seguida estes foram colocados em dois ambientes distintos, um com CO₂ e o outro com cloretos. Toma-se como referência apenas a argamassa de cimento Portland, areia e água (1:3:0,5) exposta ao ambiente com cloretos. Ao longo do ensaio os provetes eram colocados no interior da câmara de cloretos durante seis dias, a uma temperatura de 35°C e concentração de 3-7% de

NaCl na aspersão, depois estes eram retirados e secos a temperaturas de 40 °C durante 24h, por fim eram novamente colocados no interior da câmara de cloretos para repetir o procedimento [60].

Na Figura 3. 3, está representado o índice de corrosão I_{corr} e a resistência à corrosão R_{ohm} ao longo dos dias do ensaio. Observa-se que o valor do I_{corr} vai aumentando ao longo do ensaio, isto é atribuído ao crescente contacto do cloreto com as barras o que indica que o período seco è suficientemente curto para não permitir um declínio no I_{corr} , o R_{ohm} mostra-se estável ao longo do ensaio [60].

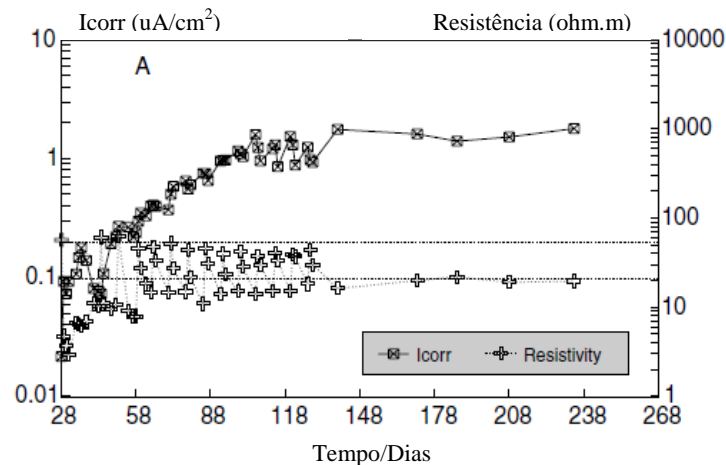


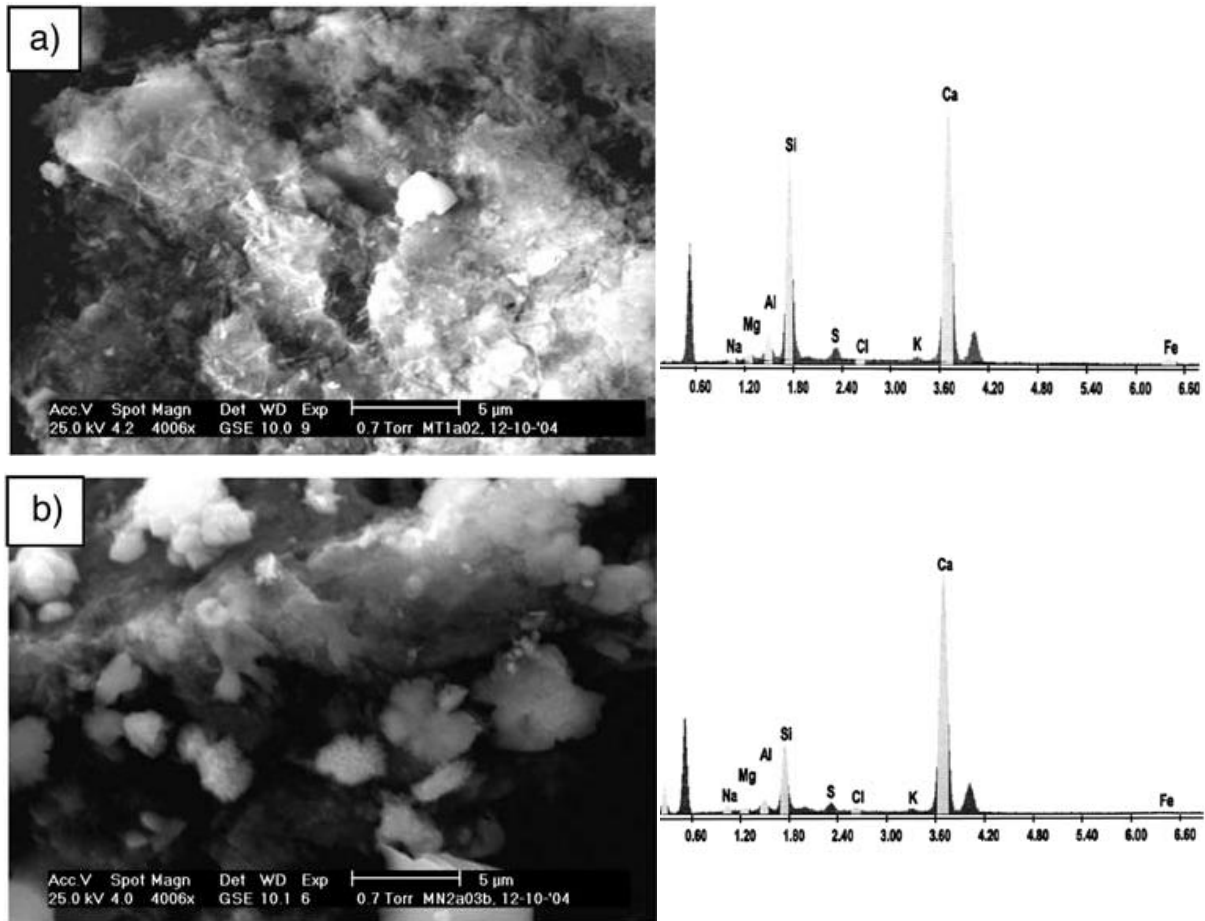
Figura 3. 3 – Avaliação do I_{corr} e R_{ohm} da argamassa de cimento em câmara de cloretos [60]

Outro trabalho de referência foi realizado por D. A. Koleva et al. de nome «Análise microestrutural de argamassas simples e reforçadas sob deterioração induzida por cloretos» [54], que avalia a deterioração de argamassa simples e reforçada com aço na presença de cloretos. Foram preparados prismas de 4 x 4 x 16 cm de argamassa simples e cilindros de argamassa de 4 cm de diâmetro por 10 cm de altura, reforçados com barras de aço com 6 mm de diâmetro. A argamassa é composta por cimento Portland CEM I 32,5R, areia e água com um traço de 1:3:0,5 para os prismas e 1:3:0,6 para os cilindros. Em relação à água, a um grupo de prismas foi adicionada água da torneira – grupo T, a outro grupo água com 3% de concentração de cloretos – grupo N, e finalmente uma mistura de metades iguais de água da torneira e da solução com cloretos, grupo – TN [54].

A cura deu-se numa sala de nevoeiro a temperaturas de 20°C e HR de 98% durante 65 dias no caso dos prismas e 14 dias no caso dos cilindros, sendo os últimos colocados posteriormente numa sala com temperatura de 20° C e imersos até 1/3 da sua altura, alguns foram embebidos em água sendo esta a amostra – grupo R, e outros numa solução com 7% de NaCl – grupo N.

Foram obtidas uma série de imagens SEM (resolução 500x) assim como análises EDS. Nos prismas simples foram escolhidas zonas ao acaso e no caso dos cilindros com uma distância radial crescente em relação ao aço [54]. Na Figura 3. 4 e Figura 3. 5, estão representadas as imagens SEM para a argamassa simples onde se podem observar uma clara diferença na porosidade e na morfologia dos

produtos hidratados devido à presença de íons de cloreto. Na Figura 3. 5, estão representadas imagens correspondentes à argamassa reforçada, onde se pode verificar a diferença tanto a nível morfológico tal como químico nos produtos hidratados, tanto para a amostra de referência como para a amostra exposta a cloretos. Na Figura 3. 5 a) é possível ver a hidratação C-S-H⁴ (A) e a formação de etringite⁵ (B) na amostra R, enquanto a Figura 3. 5 b) mostra a reação C-S-H assim como cristais cúbicos de NaCl [54].



a) sem admissão de cloretos (amostra T); b) com admissão de cloretos (amostra N)

Figura 3. 4 - Imagens SEM e espectrus EDS de argamassa simples [54]

Foi feito um mapeamento à zona de interface da argamassa com o aço a uma distância de 100µm da superfície da zona reforçada. A Figura 3. 6 a) mostra uma imagem SEM da interface revelando produtos de corrosão na amostra N e a falta dela no grupo R, Figura 3. 6e). A Figura 3. 6 b) e f) indica a distribuição espacial do cálcio (Ca) e da sílica (Si) na vizinhança da barra de aço na amostra N e R,

⁴ A hidratação do silicato tricálcico (C₃S) e silicato dicálcico (C₂S) presentes no cimento Portland, origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H [107].

⁵ Etringite é um mineral de alumínio sulfato cálcio hidratado com fórmula Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O. Esta se forma durante a hidratação do cimento Portland como resultado da reação do aluminato de cálcio com o sulfato de cálcio, ambos presentes neste cimento [107].

respetivamente. A presença da sílica é maioritariamente devida aos agregados enquanto o cálcio é devido a produtos de hidratação. As regiões indicadas na Figura 3. 6 d), mostram a falta de Ca e Si na zona de interface do reforço/argamassa onde estão presentes os produtos de corrosão induzidos pelo cloreto, e a zona A indica a presença de ferro (Fe), cloro (Cl) e óxido (O), enquanto na zona B apenas se encontra O e Fe. A Figura 3. 6c) mostra o mapeamento feito à imagem representada na Figura 3. 6a) relativamente a Al^{3+} , Ca^{2+} , Na^{+} , Cl^{-} , sugerindo uma possível formação de sal de Friedel provocado pela penetração dos cloretos, ou pelo ataque dos cloretos à etringite existente [54].

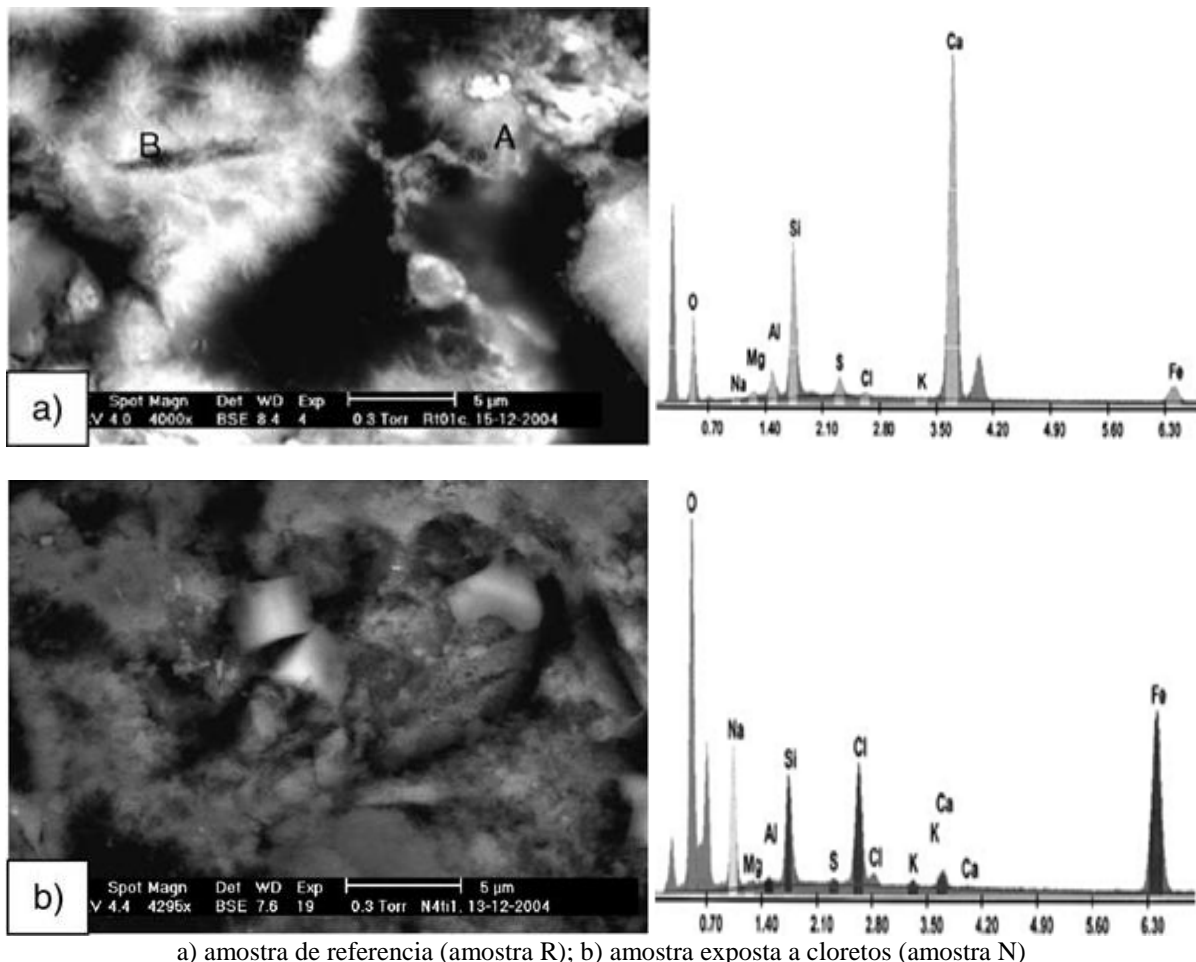


Figura 3. 5 - Imagens SEM e espectrus EDS na face entre o aço e a argamassa reforçada [54]

Finalmente apresenta-se como referência o trabalho de D. A. Koleva et al. intitulado «Caraterização quantitativa da microestrutura e fenómenos de corrosão da interface aço/pasta de cimento em argamassas que sofrem ataque de cloretos» [55]. Este tem como objetivo explorar os aspetos relacionados com as morfologias e composições químicas dos produtos de corrosão depositados na superfície do aço. Para isso foram preparados provetes de 40 mm de diâmetro por 150 mm de altura, utilizando cimento Portland CEM I 32,5 e areia ao traço 1:3, com uma relação cimento/água de 0,6, contendo no núcleo uma barra de aço de construção de 6 mm.

Durante os primeiros 14 dias os provetes foram colocados numa sala de nevoeiro com HR de 95% e a 20°C de temperatura, e de seguida num laboratório com condições típicas onde um conjunto de provetes foi submerso até 1/3 da altura numa solução com 7% de NaCl deixando que a corrosão ocorra livremente durante 120 dias. Posteriormente as barras de aço são retiradas do interior da argamassa e apresentam camadas de cor vermelha e castanho avermelhado com diferentes concentrações e em posições distintas da barra [55].

Foi feita uma análise DRX a uma amostra significativa da superfície do aço, apresentada na Figura 3.7, onde é possível observar dois grandes picos devido à presença de óxido de ferro (FeO) e de hidróxido de ferro (FeOOH). Também estão presentes na amostra contribuições de quartzo (SiO₂) devido à areia da argamassa, e calcite (CaCO₃) atribuída à penetração de pequenas quantidades de CO₂ presente na atmosfera na superfície do aço. O hidróxido de ferro apresenta várias composições químicas e morfologias podendo ser categorizado como goethite, lepidocricite ou akaganeite [55].

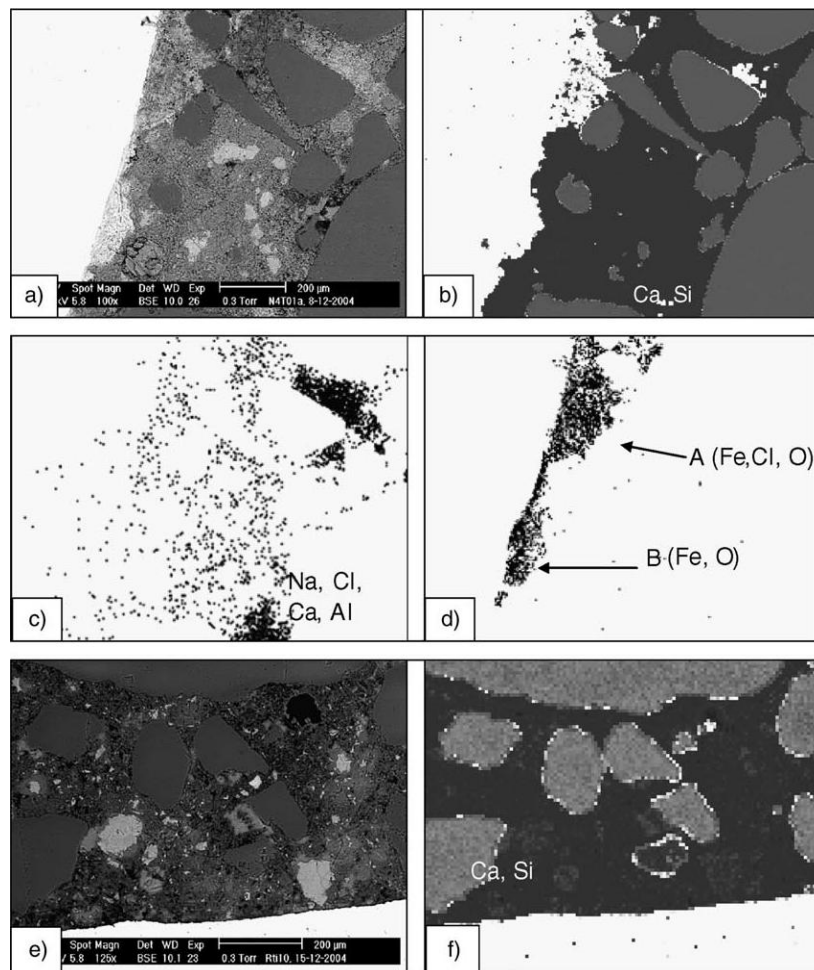
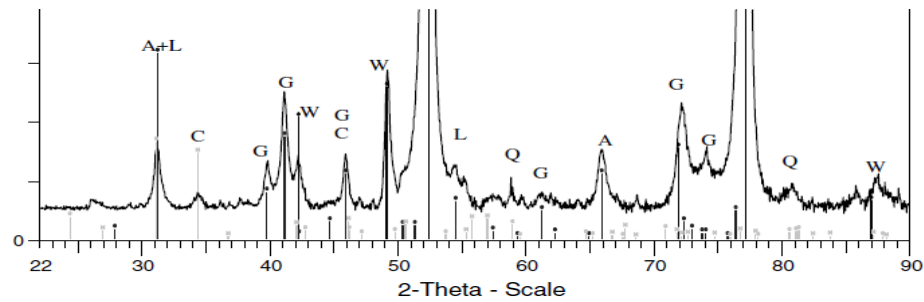


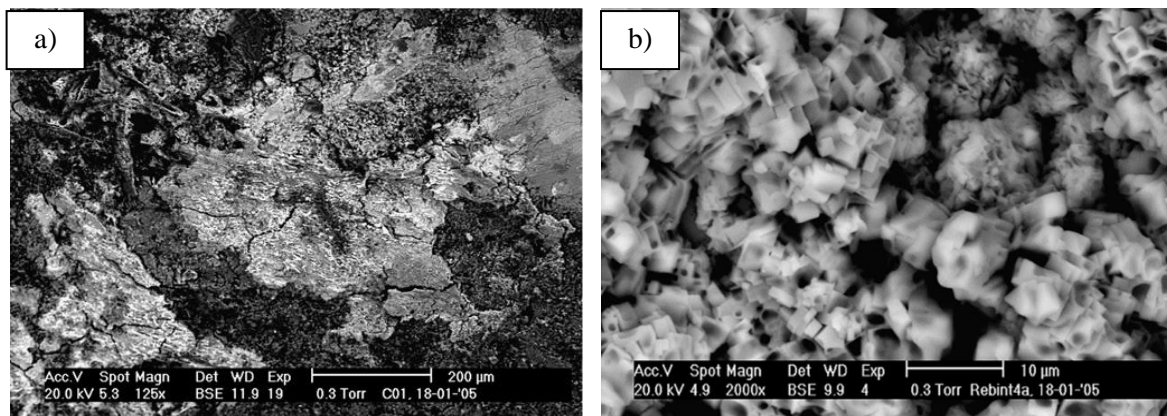
Figura 3. 6 - Mapeamento na interface da argamassa com o aço sugerindo a presença e distribuição de sal de Friedel c) e produtos de corrosão d) [55]



goethite – G; lepidocrocite – L; akaganeite – A; quartzo – Q; Calcite – C; Wustite – W

Figura 3. 7 - Difração de raio-X da superfície corroída de uma barra de aço [55]

A Figura 3.8 a) proporciona uma visão geral dos produtos de corrosão na superfície da argamassa, na interface em contato com o aço. Nesta são visíveis as fissuras devido à retração e expansão dos produtos de corrosão. Na ingressão dos cloretos, parte reage com o cimento e parte continua livre nos poros. Na Figura 3.8 b) é possível ver os cristais cúbicos de NaCl que não reagiram com o cimento, visíveis tanto na argamassa como no aço e na Figura 3. 9 é observa-se a formação de sal de Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), aparente na argamassa da zona de interface argamassa/aço [55].



a) concentração de fissuras; b) cristais cúbicos de NaCl

Figura 3. 8 - Imagens SEM da argamassa na interface em contato com o aço após ataque de cloretos

[55]

A diferença significativa na morfologia dos vários produtos de corrosão na superfície do aço quando exposto à ação de cloretos, é mostrada nas Figuras 3. 9 e 3. 10 a). Na primeira figura notam-se complexos de cloretos de óxido de ferro com forma lamelar (zona A e B) e forma globular (zona C). Na segunda figura é possível observar a formação de carbonato de cálcio na zona circundada [55]. As diferentes morfologias devem-se às proporções de ferro e cloreto, pois entre 3-3,5 apresentam formas laminadas e entre 6-7,5 formas mais arredondadas [55].

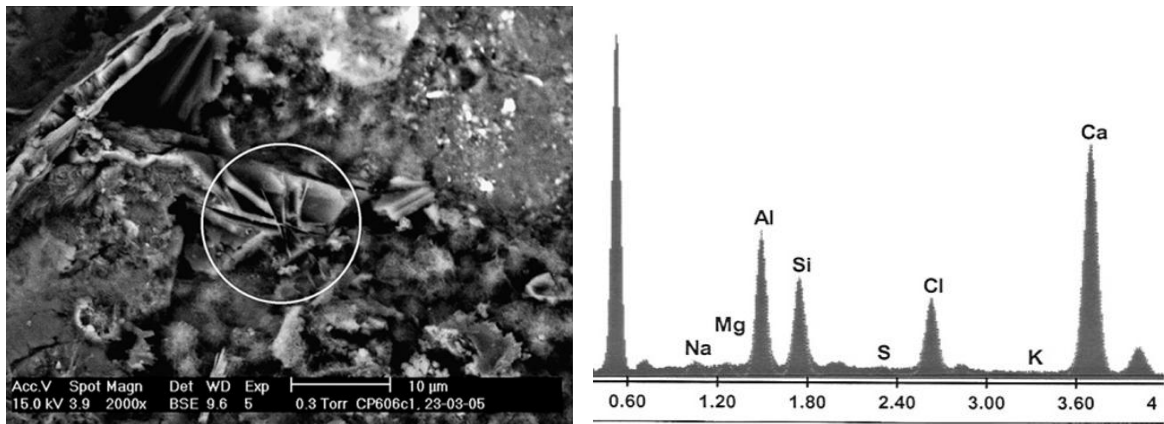
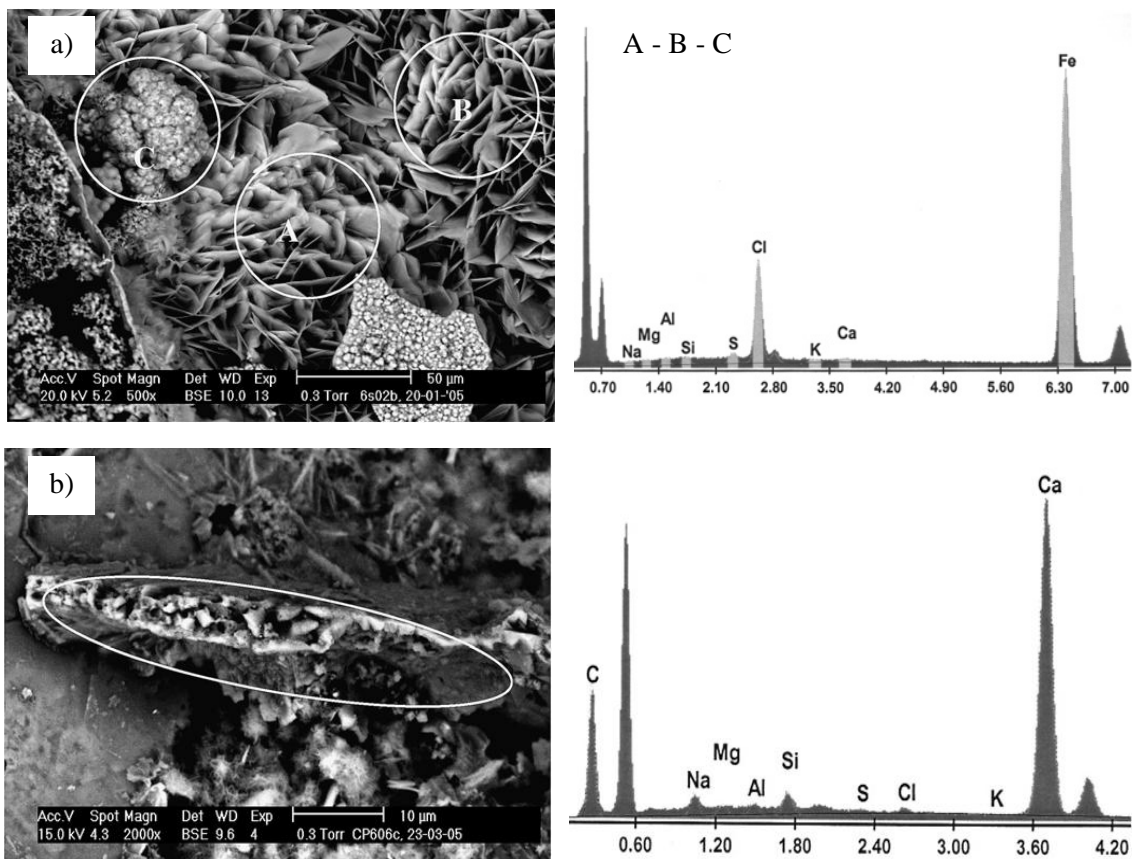


Figura 3. 9 - Formação de sal de Friedel na argamassa e análise EDS correspondente [55]

A amostra de referência foi mantida nas mesmas condições de laboratório, mas, sem o ingresso de cloretos. A superfície do aço foi maioritariamente coberta por placas ricas em cálcio - Figura 3. 11 (esquerda) e pelo gel C-H-S da pasta de cimento - Figura 3. 11 (direita). As observações em SEM indicam a presença de etringite, que não foi encontrada nas amostras corroídas. Isto é atribuído à substituição de FeS na fase de formação de goethite nas argamassas corroídas [55].



a) diferentes morfologias dos produtos de corrosão; b) morfologia do carbonato de cálcio

Figura 3. 10 - Análise SEM dos produtos de corrosão na superfície do aço após ação de cloretos [55]

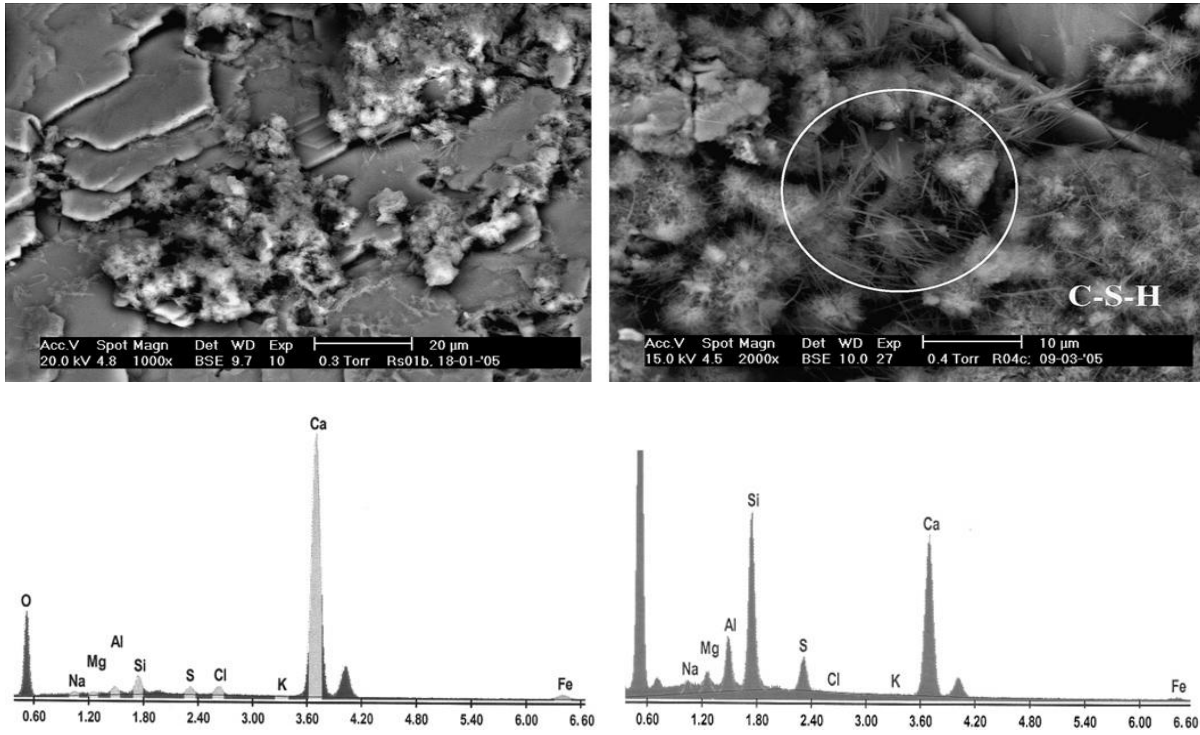


Figura 3. 11 - Análises SEM e EDS à superfície do aço na amostra de referência [55]

4. CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA BASTARDA ARMADOS COM FITA METÁLICA

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma breve descrição das matérias-primas e dos procedimentos de ensaio utilizados durante a campanha experimental do presente estudo. Após a descrição de cada ensaio, são apresentados os resultados obtidos e posteriormente enquadrados e comparados com os obtidos pelos autores referidos no Capítulo III.

Todo o trabalho realizado durante a presente campanha experimental, teve lugar na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, mais propriamente nos laboratórios da Secção de Construção e Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil (DEC), no laboratório de Cerâmica e Vidros, assim como no laboratório de Metalurgia do Departamento de Engenharia dos Materiais (DCM) e no Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT/I3N) associado ao DCM. A primeira parte do trabalho experimental realizou-se em três fases:

- **Preparação e caracterização das matérias-primas**

Agregados e ligantes:

- ensaios de determinação da granulometria e baridade
- fluorescência de raios-X (FRX)
- difração por raios-X (DRX)

Fita metálica:

- ensaio à tração
- difração de raios-X (DRX)
- microscopia ótica.

- **Produção da argamassa, provetes e cura;**

- **Caraterização da argamassa no estado fresco e endurecido:** utilizando o ensaio de espalhamento, resistência à compressão, resistência à tração por flexão, determinação do módulo de elasticidade dinâmico, porosidade aberta, capilaridade, secagem, difração de raios-X (DRX), microscopia ótica e microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

4.2. Matéria-prima

No presente estudo experimental foram realizados provetes armados com fitas metálicas. A argamassa é constituída pelos ligantes: cal aérea hidratada em pó e cimento e pelos agregados areia de rio e areia de areiro. É de salientar que na presente dissertação, foi considerada uma composição de argamassa diferente da utilizada no principal trabalho de referência [65] (argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia), devido ao facto de que a argamassa original necessita de um maior tempo de cura, o que não era possível dado ao curto espaço de tempo disponível para se realizar a presente campanha experimental, pelo qual foi utilizado o ligante cimento que acelera o processo de cura dos provetes.

4.2.1. Agregados

Os agregados utilizados na argamassa foram, as areias de rio e de areiro, Figura 4. 1. As areias são materiais granulados finos, que em conjunto com um ou mais ligantes formam as argamassas. Nas argamassas utilizam-se areias com máxima dimensão⁶ inferior a 4,76 mm, passado no peneiro nº4 da norma ASTM [21].



Figura 4. 1 - Areias de rio e de areiro utilizadas na amassadura da argamassa

As areias têm origem na desagregação das rochas, pelo que quimicamente podem ser distinguidos dois grupos principais: areias siliciosas (quartzosas e graníticas) e areias calcárias. As primeiras são provenientes do rio ou do areiro, enquanto as últimas resultam do desperdício de pedreiras de rocha calcária. As areias podem ter na sua composição muita ou pouca percentagem de argila, sendo que a areia de areiro é geralmente designada por *amarela* devido ao teor de argila.

Devido aos finos da argila, as areias siliciosas conferem à argamassa uma maior trabalhabilidade e resistências mecânicas, mas a sua utilização em grande quantidade pode diminuir a ligação do agregado ao ligante, que resulta numa maior adição de água, o que aumenta os fenómenos de retração [21].

⁶ Conceito definido mais à frente, no ponto 4.3.1

A areia de rio confere menor resistência à argamassa devido ao facto de os grãos serem rolados, enquanto a areia de areeiro apresenta grãos angulosos, mas contém mais impurezas. O tipo de areia e a sua composição granulométrica mostram ser de grande influência no comportamento das argamassas, pelo que a sua escolha e proporção na mistura revelam-se muito importantes na qualidade final da argamassa [21].

4.2.2. Ligantes

Na amassadura dos provetes de argamassa os ligantes utilizados foram a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical e o cimento Portland de calcário CEM II / B-L 32,5 N⁷, da marca Secil, Figura 4. 2.

Os ligantes podem ser divididos em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos. Os ligantes hidráulicos são compostos por pós muito finos, que misturados com água formam uma pasta capaz de endurecer tanto ao ar como submerso, apenas pela reação química entre o pó e a água.

Os ligantes aéreos necessitam do dióxido de carbono presente na atmosfera para atingir a sua forma sólida, não sendo por isso capaz de atingir esta forma quando dentro de água [21].

Os ligantes orgânicos são, por exemplo, o caso dos hidrocarbonetos e das resinas sintéticas. Estes, todavia, não vão ser abordados neste trabalho.



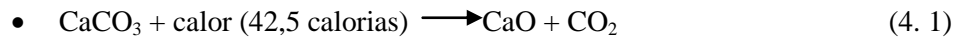
Figura 4. 2 - Cal aérea hidratada e cimento utilizados na amassadura da argamassa

A cal aérea, segundo a NP EN 459-1 [39], é maioritariamente constituída por óxidos ou hidróxidos de cálcio que, amassados com água, endurecem lentamente ao ar, pela reação com o dióxido de carbono da atmosfera, não acontecendo o mesmo debaixo de água por não possuírem capacidades hidráulicas.

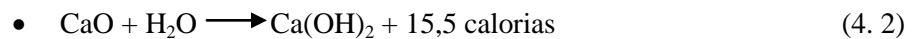
A cal aérea tem origem na decomposição, pela ação da temperatura, de uma rocha com percentagem mínima de 95% de carbono de cálcio, ou de cálcio e magnésio.

⁷ De acordo com NP EN 197-1 [40], a sigla «CEM II / B-L 32,5 N» significa que se trata de um cimento Portland composto (CEM II), de calcário (B - com 21% a 35% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários), com um teor TOC (carbono orgânico total) não excedendo 0,50% em massa (L), da classe de resistência 32,5 MPa (32,5) com uma resistência normal aos primeiros dias (N).

Da cozedura destes calcários a 894°C, obtém-se óxido de cálcio, também designado por «cal viva», devido à reação química denominada de calcinação, como se pode ver na equação 4.1 [18]:

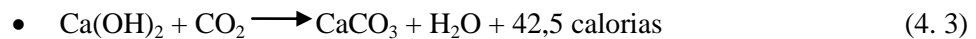


Antes da «cal viva» poder ser aplicada, procede-se à sua extinção através da imersão ou aspersão com água, através de uma reação química exotérmica e expansiva denominada hidratação, que transforma o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, originando a «cal apagada», cal hidratada ou cal, segundo a seguinte reação química presente na equação 4.2 [18]:



A extinção da cal dá-se com uma forte libertação de calor, que pode conduzir a temperaturas superiores a 100°C. Quando a extinção é feita por imersão, obtém-se uma pasta que pode ser conservada sem carbonatar (endurecer), podendo ser utilizada em argamassas.

Quando é utilizada, o hidróxido de cálcio presente na cal reage com o dióxido de carbono da atmosfera, dá-se a carbonatação, transformando-se novamente em carbonato de cálcio ou calcite, segundo a reação química descrita na equação 4.3 [18]:



As argamassas de cal aérea e areia têm baixa resistência mecânica, rigidez (baixo módulo de elasticidade) e aderência ao suporte; contudo apresentam menor tendência a fendilhar. Uma característica particular e muito vantajosa é o fato de depois das argamassas serem aplicadas sobre um suporte e retraírem, poderem ser reapertadas contra este, fechando as fendas desenvolvidas por retração inicial e aumentando a compactação das argamassas [21]. Todo o processo do ciclo da cal acima descrito está esquematizado na Figura 4. 3.

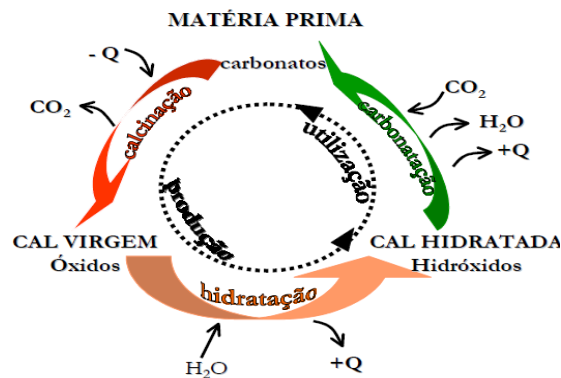


Figura 4. 3 - Esquema do Ciclo da cal [96]

O cimento Portland é obtido através da combinação de calcário (carbonato de cálcio) e margas contendo argila (silicatos de alumínio e ferro) e, possivelmente outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro, que depois são reduzidos a pó muito fino. Esta mistura, depois de sujeita a alguns controlos, é colocada em grandes fornos rotativos a temperaturas na ordem dos 1450°, sendo que a homogeneização e dispersão é realizada atualmente por via seca [18].

A mistura das matérias-primas é doseada, controlada e corrigida para que, depois de perder água e dióxido de carbono, devido à alta temperatura atingida no forno, esta tenha uma composição química dentro dos intervalos seguintes [18]:

- óxido de cálcio (CaO) – 60 a 68%
- dióxido de enxofre (SiO₂) – 17 a 25%
- trióxido de alumínio (Al₂O₃) – 2 a 9%
- trióxido de ferro (Fe₂O₃) – 0,5 a 6%
- Óxido de Magnésio (MgO) - 0 a 2
- K₂O + Na₂O - 0.5 a 1,5

Dentro do forno, as matérias-primas reagem entre si com o apoio da fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima, formando novos compostos. Através destes processos químicos e físicos, os produtos da reação, ao arrefecem rapidamente, aglomeram-se e formam pedaços com vários tamanhos denominado de clínquer. O mesmo deve ser arrefecido rapidamente logo à saída do forno, devido à instabilidade da estrutura do silicato tricálcico a temperaturas abaixo dos 1250°C [18].

Em seguida o clínquer é moído junto com adjuvantes que facilitam o processo de moagem em moinhos de bolas, são adicionados aditivos reguladores do tempo de presa (gesso) e ainda outros que vão compor o produto final, cimento Portland [18]:

- Silicato tricálcico (3CaO.SiO₂) – 20 a 65%
- Silicato bicálcico (2CaO.SiO₂) – 10 a 55%
- Aluminato tricálcico (2CaO.Al₂O₃) – 0 a 15%
- Aluminoferrato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) – 5 a 15%

As argamassas de cimento apresentam elevada resistência mecânica, rigidez (elevado módulo de elasticidade) e aderência ao suporte; no entanto, apresentam uma grande tendência de fendilhação.

4.2.3. Água

A água utilizada na amassadura da argamassa foi retirada da rede pública de abastecimento da FCT (no dia 10 de Outubro de 2012).

4.2.4. Fitas metálicas em aço inox

Na presente dissertação, foi utilizado o tipo de fita metálica previamente aplicada na solução de reforço de muretes, tema de tese desenvolvido por M. Fonseca [24], o qual corresponde a uma das possibilidades de continuação da tese de doutoramento de F. Pinho [65], orientador científico do presente trabalho. Nesse trabalho o aço inox do tipo AISI 304 (aço austenítico) foi o escolhido, uma vez que este apresenta um bom equilíbrio entre resistência à corrosão, capacidade resistente e custo, Figura 4. 4.

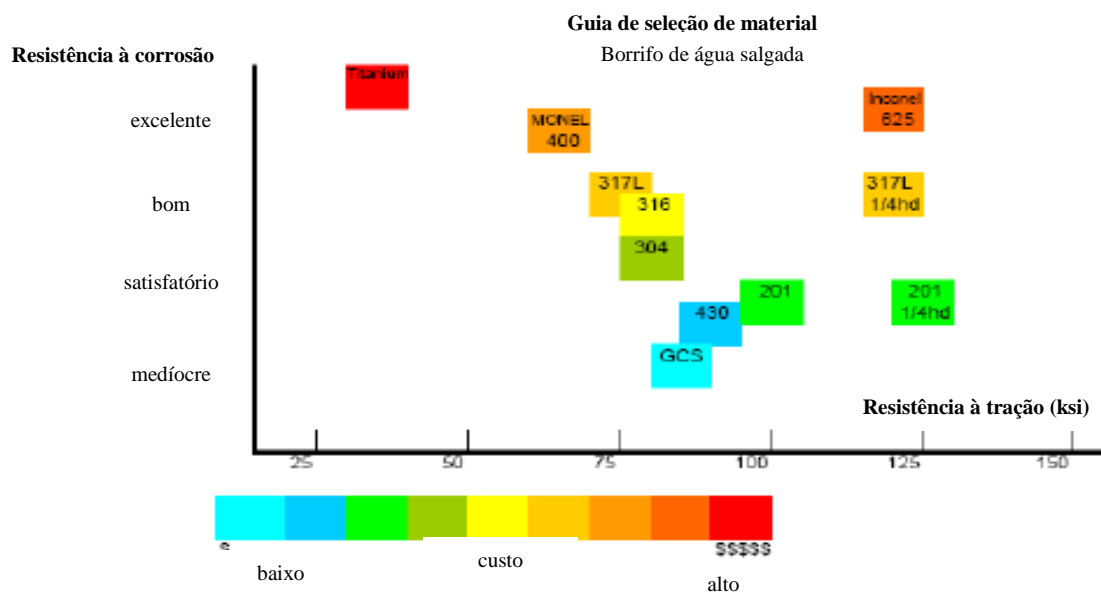


Figura 4. 4 - Relação entre resistência mecânica, resistência à corrosão e custo nos diferentes tipos de aço inox [98]

Nesse contexto, a fita metálica utilizada nesta campanha experimental é da marca Bandimex, Figura 4. 5., tem 12,7 mm de largura e 0,75 mm de espessura, e foi adquirida para o desenvolvimento do trabalho experimental de M. Fonseca [24] e posteriormente do presente trabalho.



Figura 4. 5 - Fitas metálicas utilizadas para reforço da argamassa

4.3. Ensaio de caracterização dos constituintes da argamassa e das fitas metálicas

Foram realizados ensaios de análise granulométrica aos agregados e também de determinação da baridade dos agregados e ligantes.

Dada a repetição de ensaios efetuados sobre as areias e os ligantes, optou-se pela descrição de cada ensaio, seguido dos valores médios obtidos.

No Anexo I da presente dissertação apresentam-se os resultados individuais, médios e os respetivos desvios padrão.

4.3.1. Análise granulométrica dos agregados

O ensaio de determinação da análise granulométrica foi efetuado sobre as duas areias utilizadas na preparação da argamassa. A granulometria corresponde à distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem o agregado [18].

Este ensaio foi realizado, fazendo passar o agregado através de uma série de peneiros da série principal ASTM, posicionados de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão da abertura das malhas, progredindo geometricamente segundo a razão 2, e pesando o material retido em cada peneiro. Neste ensaio obtiveram-se [18]:

- a curva granulométrica do agregado, que corresponde à percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total;
- a máxima dimensão do agregado (D), que corresponde à menor abertura da malha do peneiro do qual passa uma quantidade de agregado superior ou igual a 90%;
- a mínima dimensão do agregado (d), que corresponde à maior abertura da malha do peneiro da série através do qual passa uma quantidade de agregado inferior ou igual a 5%;
- o módulo de finura (MF), que corresponde à soma das %'s retidas acumuladas em cada peneiro da série principal (exceto o peneiro nº200, com abertura 0,075 mm) dividida por 100.

No final do ensaio, a totalidade dos resíduos deverá ser igual à massa inicial da amostra, com uma tolerância de 1%. A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 933:1-2000 [41]. De seguida apresentam-se o procedimento e os equipamentos usados no ensaio de determinação da análise granulométrica dos agregados, Figura 4.6.

Equipamentos:

- pá;
- balança de precisão 0,1 g;
- estufa ventilada;

- peneiros ASTM com aberturas de malha quadrada de 4,76 mm (nº4), 2,38 mm (nº8), 1,19 mm (nº16), 0,595 mm (nº30), 0,297 mm (nº50), 0,149 mm (nº100) e 0,075 mm (nº200);
- agitador mecânico de peneiros.

Procedimento experimental:

- esquarterar o material em quatro partes iguais obtenção das amostras representativas das areias;
- peneiração prévia das duas amostras de areias através do peneiro nº4;
- secar as amostras na estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante⁸;
- pesar 1000g de agregado;
- colocação da amostra no interior do peneiro superior do agrupamento de peneiros, dispostos de forma a que a abertura das malhas diminua de cima para baixo;
- peneirar mecanicamente o agregado durante 10 min para cada amostra;
- pesagem do material retido em cada um dos peneiros, incluindo o peneiro de fundo (refugo), e calcular as percentagens relativas à massa inicial.



a) balança com precisão de 0,01 g; b) agitador mecânico e peneiros ASTM

Figura 4.6 - Ensaio de análise granulométrica das areias

As curvas granulométricas e as características dos dois agregados utilizados na preparação da argamassa encontram-se, respetivamente, na Figura 4.7 e na Tabela 4.1. Os resultados obtidos nas três amostras ensaiadas de cada agregado encontram-se nas Tabela I. 1 e Tabela I. 2 no Anexo I.

⁸ A «massa constante» de um provete é atingida quando a variação entre duas pesagens intervaladas de 24 horas é menor ou igual a 0,1% da massa do provete [87].

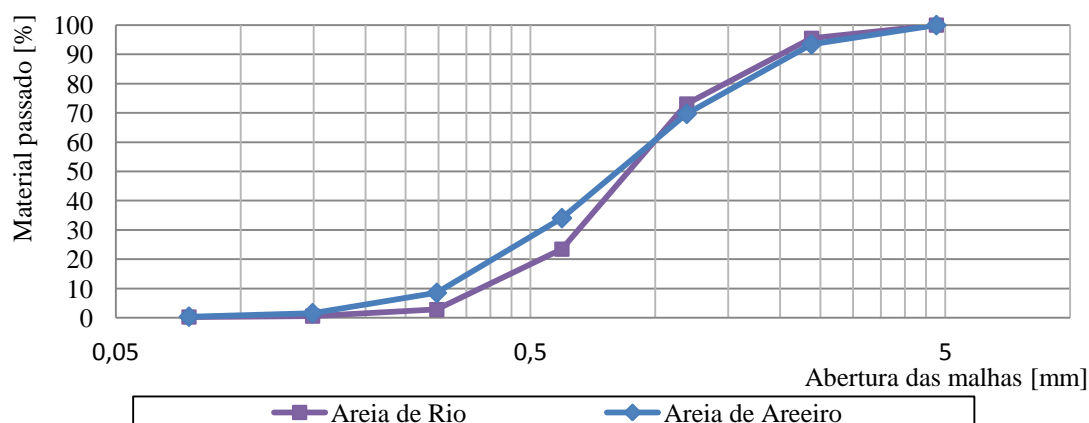


Figura 4.7 - Curvas granulométricas das areias de rio e de areeiro

Tabela 4.1 - Características físicas dos agregados

Material	Módulo de finura	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]
Areia de Rio	0,99	0,595	0,149
Areia de Areeiro	0,98	0,595	0,149

4.3.2. Determinação da baridade dos agregados e ligantes

A baridade é definida como a relação entre a massa e o volume ocupado por uma quantidade de agregado, incluindo os espaços de ar dentro das partículas dos agregados e entre as partículas dos agregados e o recipiente onde estes estão contidos [63]. A baridade (B_a) é determinada através da seguinte expressão:

$$B_a = \frac{M}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.4)$$

onde: M é a massa do recipiente preenchido pelo material menos a massa do recipiente, em kg e V é o volume do recipiente, em m^3 .

A baridade de um agregado depende do volume de vazios, sendo que este varia de acordo com o grau de compactação. A baridade depende ainda do teor de humidade da areia, pois a quantidade absorvida pela superfície das partículas condiciona o grau de compactação [18].

Foram determinadas as baridades de ambos os ligantes e agregados utilizados na preparação das argamassas, tendo como referência a ficha de ensaio Fe 15 [86] e o trabalho de investigação desenvolvido por V. Rato [73] no DEC-FCT/UNL (por sua vez baseada na norma NP EN 1097-3:2002 [42]). Para fazer o balanço da quantidade necessária de ligantes e agregados utilizados, os cálculos dos valores da baridade foram realizados de forma a converter o traço volumétrico (volume) em traço ponderado (peso). Seguidamente faz-se a apresentação do procedimento e os equipamentos utilizados no ensaio de determinação da baridade dos agregados e ligantes [7,41, 86], Figura 4.8.

Equipamentos:

- estufa ventilada;
- balança de precisão de 0,1g;
- recipiente metálico cilíndrico;
- funil em suporte de altura regulável;
- régua metálica.

Procedimento experimental:

- pesagem do recipiente metálico vazio e limpo;
- colocação do material (agregado ou ligante) no recipiente através do funil; o recipiente foi colocado a uma distância de 50 mm, entre o seu aro superior e o bordo inferior do funil, para garantir que a altura de queda do material não seja variável, assegurando uma igual compactação;
- remoção do material em excesso com uma régua metálica;
- pesagem na balança do recipiente preenchido (M), tendo-se inicialmente registado a sua tara.



a) passagem do material para o recipiente através do funil; b) nivelamento da superfície

Figura 4.8 - Ensaio de determinação da baridade

Nota: O procedimento adotado, relativamente à norma NP EN 1097-3:2002 [42], difere essencialmente no equipamento utilizado na determinação da baridade dos ligantes e agregados, pois em alternativa ao funil metálico, foi utilizado um funil de plástico, em altura regulável. É também de notar, que os materiais foram inicialmente submetidos à secagem em estufa ventilada $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$, para não haver segregação das partículas. Antes da passagem para o funil, o material foi esquartelado em quatro partes iguais, para redução do tamanho da amostra.

Os resultados médios das doze amostras dos dois agregados e dois ligantes estão representados na Figura 4.9. Os resultados individuais e desvios padrão estão apresentados nas Tabela I. 3 à Tabela I. 6 do Anexo I.

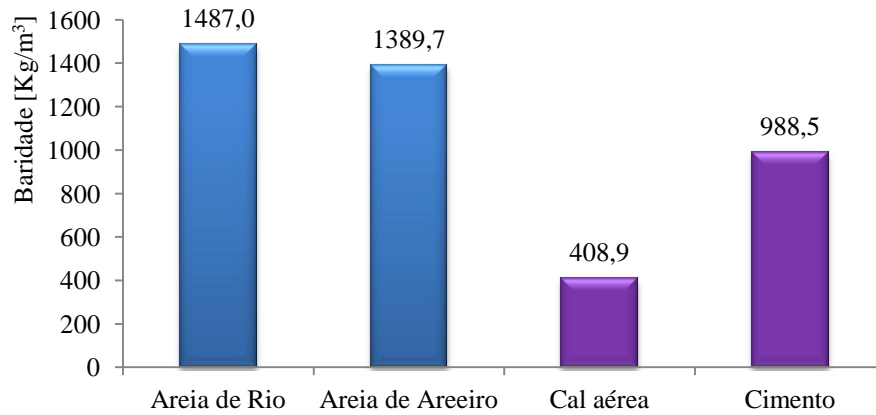


Figura 4.9 - Baridade dos agregados e ligantes utilizados na preparação das argamassas

4.3.3. Análise química por Fluorescência de Raios-X

A fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva, que fornece não só uma análise qualitativa possibilitando a identificação da composição química de elementos presentes na amostra, como também uma análise em termos quantitativos, estabelecendo uma percentagem ponderada de cada elemento [8]. Esta técnica baseia-se na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra quando devidamente excitados, que é detetada pelo equipamento através de sistemas detetores [22].

A análise química foi realizada nas amostras dos ligantes, agregados, e fita de aço inox. Neste ensaio foi utilizado um espectrômetro de raios-X por dispersão em comprimento de onda, *Panalycal Axios*, existente no CENIMAT, Figura 4.10, onde a medição foi feita com a ajuda de um fluxo de hélio (He).

A análise por fluorescência de raios-X está dividida nas seguintes fases: excitação dos elementos que constituem a amostra; dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra; detecção desses raios-X.



Figura 4.10 - Espectrômetro de FRX e representação esquemática da fluorescência de raios X [22]

De seguida apresentam-se os equipamentos e procedimento de ensaio, apresentados na Figura 4.11 e nas Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresenta-se a composição química das matérias-primas.

Equipamentos:

- espectrómetro de raios-X;
- porta amostras de PVC (para sólidos), Figura 4.11 a);
- película Mylar® (6 µm de espessura, especial para análise química porque é livre de contaminantes).

Procedimento experimental:

- coloca-se uma película de poliéster de Mylar® no suporte de PVC;
- insere-se uma amostra do material a analisar no interior do suporte de PVC;
- o suporte é levado ao espectrómetro de raios-X durante 20 min (Figura 4.11 b).



a) suportes de plástico para a amostra; b) colocação da amostra dentro do suporte de plástico no equipamento de análise FRX

Figura 4.11 - Preparação da amostra para análise por fluorescência de raios X

Tabela 4.2 - Análise química dos ligantes e agregados obtida por FRX

Componentes	Concentração (%)			
	Areia de Areeiro	Areia de Rio	Cimento	Cal Aérea
MgO	0,2	0,3	0,8	0,4
Al ₂ O ₃	18	10	2	0,07
SiO ₂	73	82	12	0,2
SO ₃	0,06	0,2	3	0,1
K ₂ O	5	4	0,4	0,07
CaO	0,8	2	78	99
TiO ₂	0,5	0,5	0,3	-
MnO	0,01	0,03	0,04	-
Fe ₂ O ₃	3	1	4	-
Rb ₂ O	0,04	0,04	-	-
CuO	-	-	0,05	-
ZnO	-	-	0,03	-
SrO	0,004	0,007	0,03	0,02

Tabela 4.3 - Análise química da fita metálica obtida por FRX

Material	Concentração dos elementos [%]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Fita metálica	-	1	0,3	-	-	19	9	0,2	0,6

4.3.4. Análise mineralógica por Difração de Raios-X

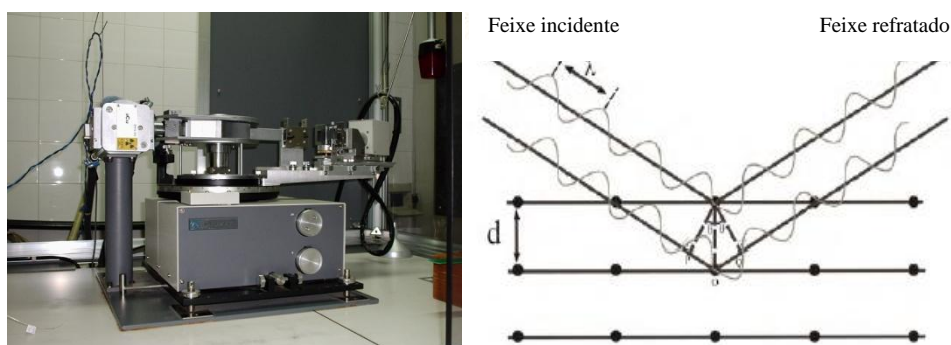
A difração de raios-X (DRX) foi utilizada para identificar as fases minerais presentes nas matérias-primas, assim como, nas amostras dos provetes antes e depois de sujeitos a ambientes de envelhecimento artificial. Esta técnica baseia-se no fenómeno de interação entre um feixe de raios-X e os eletrões dos átomos do material que constitui a amostra, permitindo obter informações acerca das fases cristalinas de um material [20]. As análises DRX foram efetuadas num difractor de pós *Rigaku*, modelo DMAX III-C 3 Kw, Figura 4. 12 a), com a ampola de cobre e condições de operação de 40 kV, 20 mA numa gama angular de 10 a 60°.

Num material onde os átomos estejam orientados periodicamente no espaço (característica das estruturas cristalinas), o fenómeno da difração de raios-X (interferência construtiva) ocorre nas direções que satisfazem a condição de Bragg, Figura 4. 12 b):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4.5)$$

onde: d é a distância interplanar para o conjunto de planos cristalográficos paralelos, θ é o ângulo de incidência dos raios-X medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos, n é a ordem de difração e λ o comprimento de onda da radiação incidente [20].

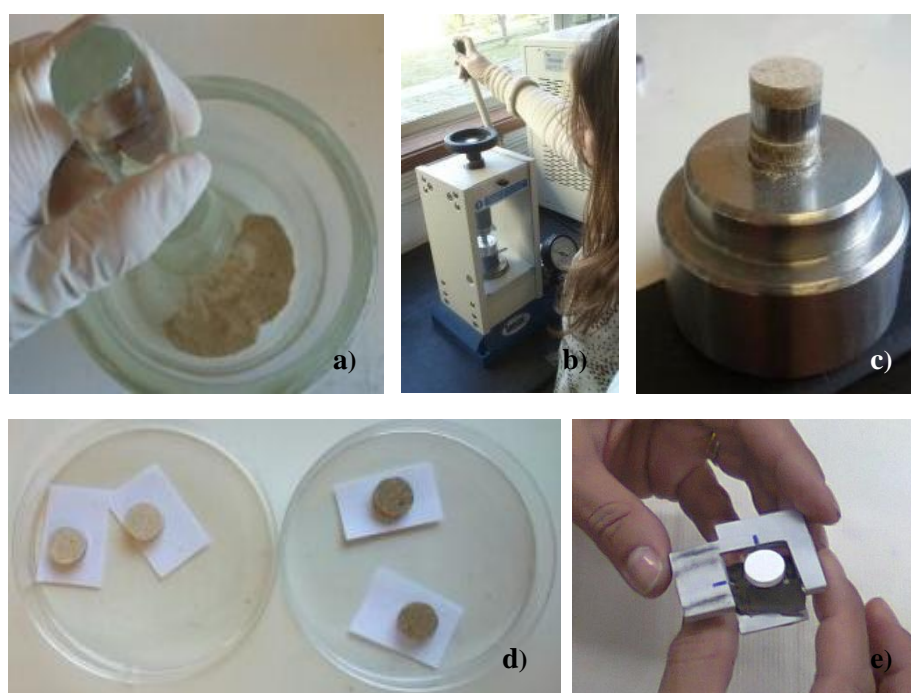
O feixe difratado é normalmente expresso através de picadas que se destacam da linha de base, e são registados num espectro de intensidade em função do ângulo 2θ (ou d), constituindo o padrão difractor ou difractograma.



a) difractor de pós Rigaku para análise DRX; b) esquema do fenómeno de difração de raios-X [53]

Figura 4. 12 - Difractor de pós Rigaku para análise DRX

Para cada matéria-prima, foram elaboradas pastilhas de pó compactado recorrendo a uma prensa hidráulica (SPECAC®), utilizando prensagem uniaxial com uma determinada pressão, aplicada durante 30s. Começou-se por pesar, numa balança de alta precisão, uma porção da amostra em pó e colocou-se no molde da prensa (com 0,013 m de diâmetro), onde se aplicou a carga necessária para que a pastilha mantivesse a forma, Figura 4.13 b) e c). No caso das areias de rio e de areeiro, devido à sua granulometria, foi primeiro necessário moer a amostra com a ajuda de um pilão, e só depois é que se procedeu à prensagem, Figura 4.13 a). As amostras das matérias-primas, em forma de pastilha (à exceção da fita metálica), foram então colocadas num suporte de metal, que por sua vez foi inserido no difratómetro, Figura 4.13 e). Na Tabela 4.4 apresentam-se o peso das amostras [g] e valor da pressão aplicada [t], relativamente a cada matéria-prima.



a) moagem da areia de rio; b) prensagem da amostra; c) pastilhas no molde da prensa; d) pastilhas de areia de rio e de areeiro; e) colocação da pastilha no suporte de metal a ser introduzido no equipamento de análise DRX

Figura 4.13 - Preparação das amostras em pastilha para análise por DRX

Tabela 4.4 - Valores do peso e pressão aplicada das amostras das matérias-primas (pastilhas)

Matéria-Prima	Peso [g]	Pressão [t]
Areia de rio	1,0	5,0
Areia de areeiro	1,0	5,0
Cal aérea	0,5	1,0
Cimento	1,0	1,0

As identificações das fases formadas foram realizadas com auxílio das fichas contidas na base de dados JCPDS – International Centre for Diffraction Data PCPDFWIN V.2.2 (2001) apresentadas no Anexo II. Nas Figura 4.14 à Figura 4.18 são expostos os espectros de DRX das amostras das matérias-primas da argamassa assim como da fita metálica. As fases cristalinas encontradas nas matérias-primas são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Fases cristalinas nas matérias-primas detetadas pela análise FRX

Composto	Fórmula	Notação	Ficha nº
Calcite	CaCO ₃	C	05-0586 [43]
Gesso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	G	33-0311 [47]
Portlandite	Ca(OH) ₂	P	44-1481 [49]
Quartzo	SiO ₂	Q	46-1045 [50]
Silicato de cálcio	Ca ₃ SiO ₅	CS	49-0442 [51]
Silicato de cálcio magnésio alumínio óxido	Ca ₅₄ MgAl ₂ Si ₁₆ O ₉₀ /54CaO 16SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·MgO	M	13-0272 [45]
Silicato de potássio alumínio hidratado	K _{10.32} (Si _{21.7} Al _{10.3} O ₆₄)(H ₂ O) _{24.32}	N	86-1110 [52]
Crómio ferro níquel	Cr _{0.19} Fe _{0.7} Ni _{0.11}	R	33-0397 [48]

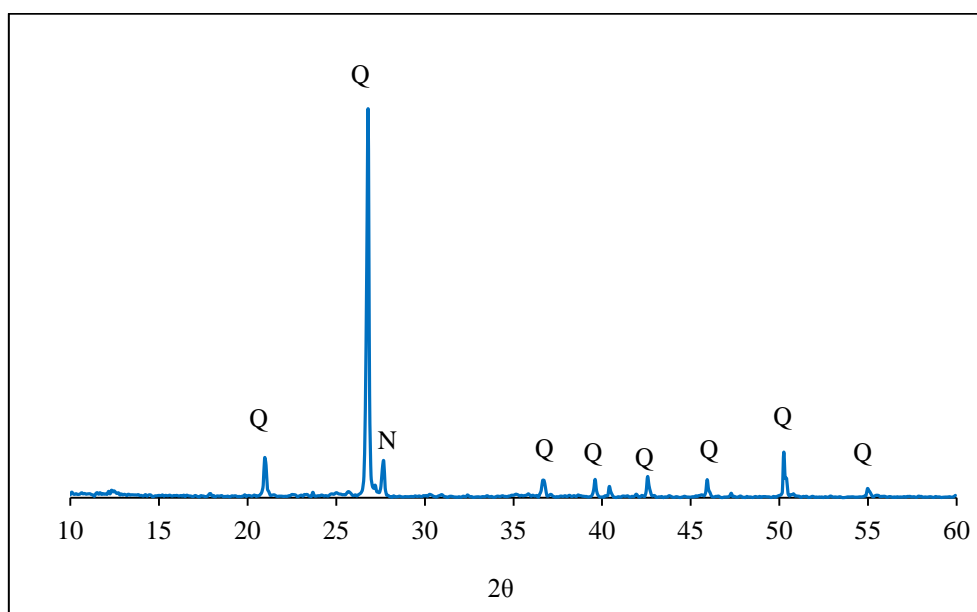


Figura 4.14 - Espectro de DRX da Areia de Areiro

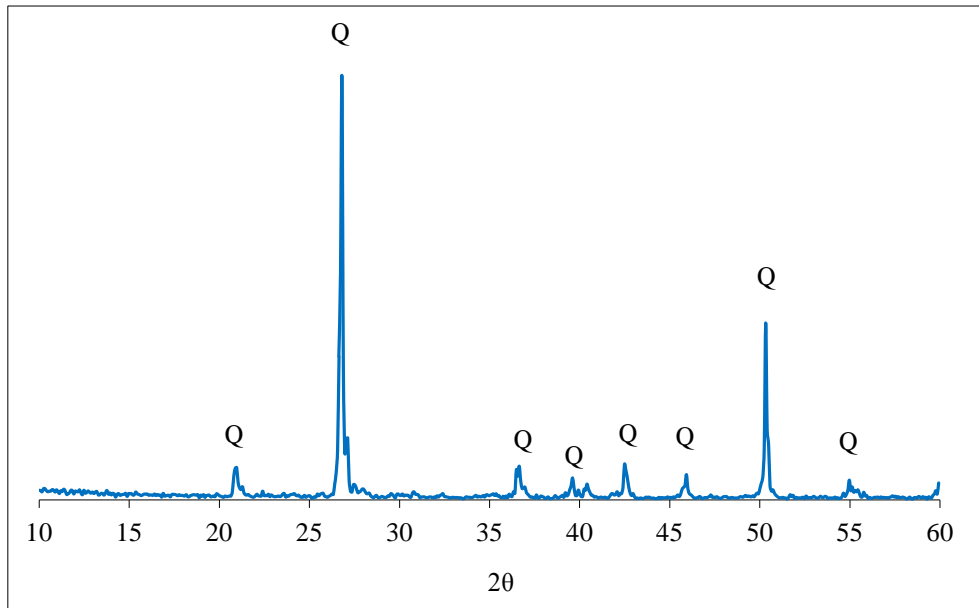


Figura 4.15 - Espectro de DRX da Areia de Rio

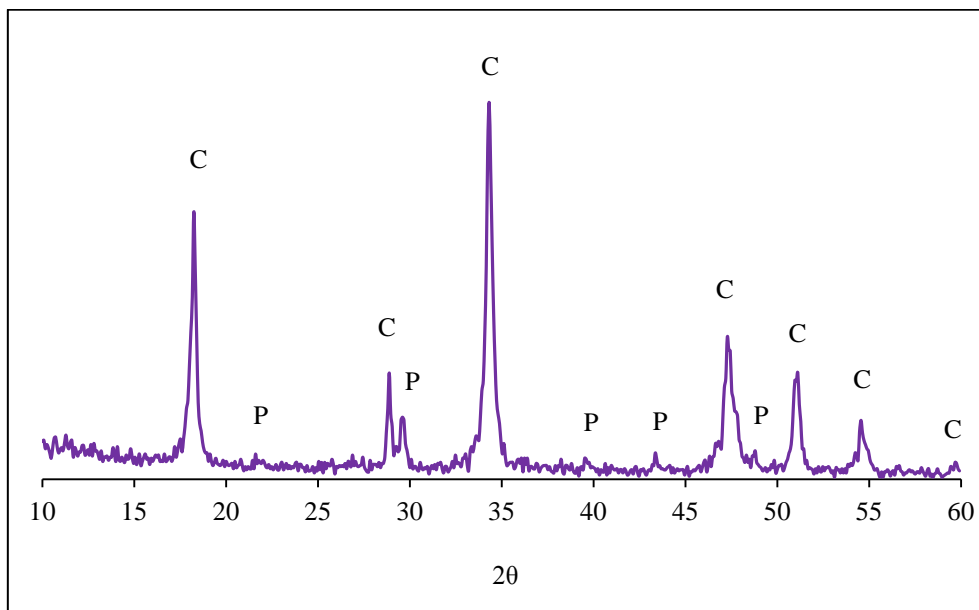


Figura 4.16 - Espectro de DRX da Cal Aérea

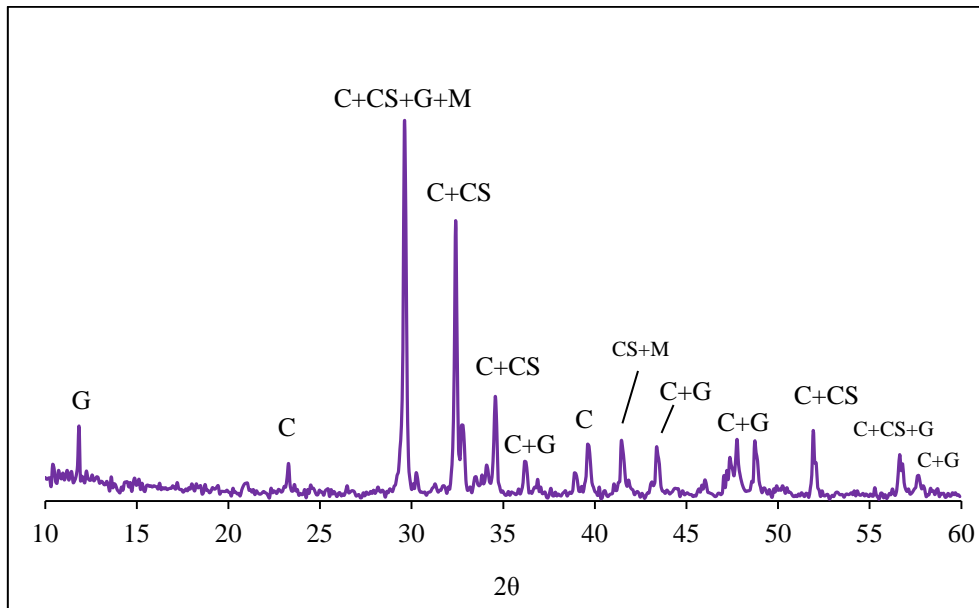


Figura 4.17 - Espectro de DRX do Cimento

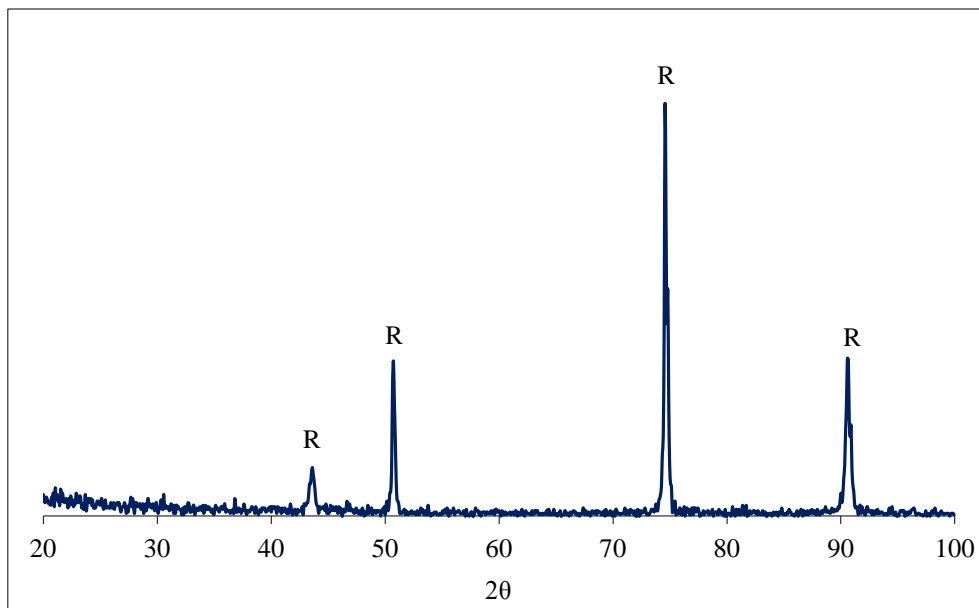


Figura 4.18 - Espectro de DRX da Fita de Aço-Inox

4.3.5. Ensaio de tração às fitas metálicas

Foram realizados ensaios a três amostras de fita metálica, cada uma com 12 cm de comprimento. As fitas estiveram guardadas na sala de ambiente condicionado, que se encontra no 1º piso do DEC, onde a temperatura e a humidade relativa são controladas, e têm valor de 25°C e 60% respetivamente. Dado que as fitas metálicas vão estar sujeitas diferentes a ambientes, denominam-se estas amostras de AC1 a AC3, onde a sigla AC é referente a ambiente condicionado.

A preparação das amostras teve lugar no laboratório de estruturas, onde se procedeu à medição e marcação do rolo de fita recorrendo a uma régua flexível de metal e um marcador. Posteriormente estas foram cortadas com comprimentos de 12 cm, através duma mesa de corte equipada com um disco de metal. Por último utilizou-se uma rebarbadora com disco de metal para aparar as rebarbas nas extremidades das fitas, Figura 4.19. Todas as amostras foram numeradas e medido o seu comprimento com uma craveira analógica, para fins de comparação dos tamanhos antes e depois de sujeitas aos ambientes artificiais. Os comprimentos das fitas encontram-se na Tabela I. 7 no Anexo I.



Figura 4.19 - Exemplo do aspeto das fitas metálicas depois de cortadas e aparadas

O ensaio de tração foi realizado, respeitando a norma ISO 6892, no laboratório de ensaios de tração do DEC recorrendo ao equipamento ZWICK Z050, tendo o tratamento dos dados sido processado no computador anexo ao equipamento através do programa TestXpert v12.1 da Zwick Roell, Figura 4.20 a). Os parâmetros utilizados no ensaio foram de 5 mm/min para a velocidade e 23,5 mm de distância entre pratos. Na Figura 4.20 mostra-se o equipamento de ensaio na Figura 4.20 a), e nas Figura 4.20 a) e b) mostra-se o e um ensaio de tração à fita metálica e o pormenor da rotura, respetivamente.

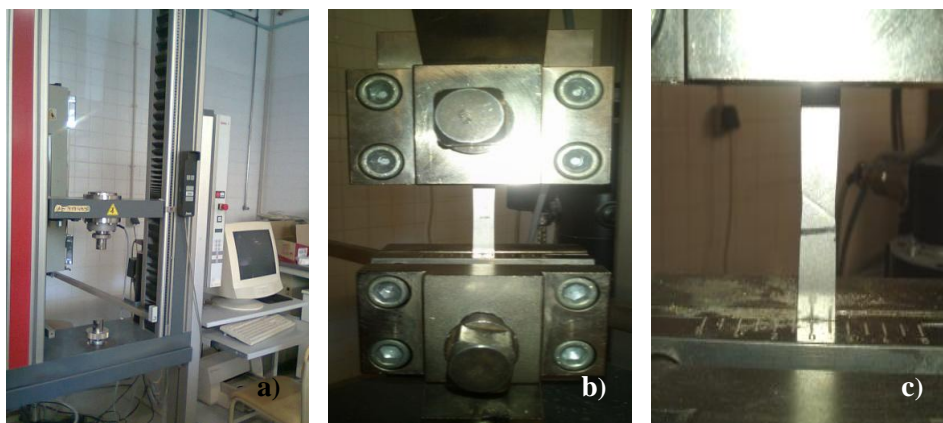


Figura 4.20 - Equipamento de ensaio à tração (ZWICK Z050) e pormenor de rotura da fita metálica

Os resultados obtidos pelo software foram posteriormente exportados para folhas de cálculo e realizados os gráficos força-deslocamento relativos aos ensaios de tração das fitas metálicas. O resultado médio da força última obtido foi de 6,66 kN. Apresenta-se na Figura 4.21 o resultado dos

ensaios feitos às fitas de referência, e na Tabela 4. 6 são apresentados os resultados individuais e desvio padrão ensaiados no âmbito do presente trabalho. A secção da fita é de 12,7 x 0,75 mm².

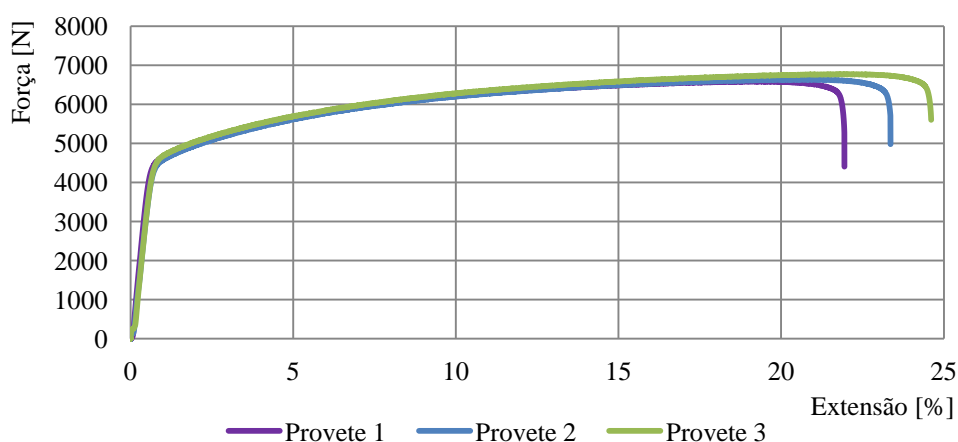


Figura 4.21 - Resultado do ensaio de tração às fitas metálicas

Tabela 4. 6 - Resultados obtidos nos ensaios de tração realizados à fita Bandimex

Provete	Força última [kN]	Força última média [kN]	Desvio padrão [kN]	Tensão última [Mpa]	Tensão última média [Mpa]	Desvio padrão [Mpa]
1	6,58			690,81		
2	6,64	6,66	0,10	697,11	699,56	10,20
3	6,77			710,76		

4.4. Preparação dos provetes de argamassa (fixação das fitas metálicas e amassaduras)

Na presente campanha experimental, tal como referido na secção 4.2, foram moldados provetes de argamassa composta pelos ligantes cal aérea hidratada em pó e cimento, e pelos agregados areia de rio e areia de areiro. A argamassa foi produzida ao traço volumétrico 1:1:3:3 (cal aérea: cimento: areia de areiro: areia de rio). Foram moldados 36 provetes prismáticos de 16cm x 4cm x 4cm, recorrendo a moldes metálicos, como o representado na Figura 4.30. Os provetes distinguem-se da seguinte forma:

- 6 provetes não armados - AR1 a AR6, dos quais os provetes AR1, AR2 e AR3 foram utilizados para a caracterização da argamassa e os provetes AR4, AR5 e AR6 foram sujeitos à ação de cloretos;
- 30 provetes armados com fitas metálicas - AF1 a AF30, dos quais 11 foram sujeitos à ação de cloretos e os restantes deverão ser utilizados em desenvolvimentos futuros da presente campanha experimental.

Antes de se proceder à preparação das amassaduras, houve a necessidade de preparar os moldes dos provetes armados, fixando-se as fitas metálicas no seu interior, o mais central possível, recorrendo a espaçadores previamente preparados para o efeito. A preparação dos espaçadores passou pelo seu corte com a ajuda dum x-ato, tendo em atenção de retirar apenas o suficiente para garantir que estes ficassem bem fixos no interior do molde (na posição vertical) e totalmente cobertos pela argamassa, Figura 4.22.



Figura 4.22 - Preparação dos moldes, colocação das fitas metálicas com a ajuda de espaçadores

A preparação da argamassa realizou-se com base na ficha de ensaio Fe 19 [85]. Tendo em conta diferentes fontes bibliográficas [7, 21], considerou-se para este estudo um espalhamento⁹ entre 60 e 80%. Em seguida apresentam-se os equipamentos e procedimento de ensaio seguido na realização das amassaduras, Figura 4.23.

Equipamentos:

- misturador mecânico de argamassas;
- cronómetro;
- balança de precisão de 0,01g;
- proveta graduada.

Procedimento:

- pesagem de cada constituinte da argamassa¹⁰;
- mistura manual a seco dos constituintes e posterior colocação na cuba;
- medição da quantidade de água necessária a adicionar à mistura, através de uma proveta graduada;

⁹ Na secção 4.5 faz-se a descrição deste ensaio.

¹⁰ As bariedades dos constituintes, previamente determinadas (ponto 4.3.2), permitiram determinar as massas de uma forma rigorosa, e assim respeitar os traços volumétricos definidos.

- entrada em funcionamento do misturador mecânico (com contagem de tempo de 45s), adicionando simultaneamente a quantidade de água previamente determinada no ensaio de espalhamento (fator a/l);
- paragem do aparelho para limpeza dos bordos da cuba durante um intervalo de 30s;
- nova amassadura mecânica, durante mais 60s.



Figura 4.23 - Preparação das argamassas em pasta em misturador mecânico

Sabendo o traço volumétrico (1:3) de ligantes e areias (a que corresponde ao traço 1:1:3:3 de cimento, cal aérea, areia de rio e areia de areeiro) e conhecidos os valores de baridade de cada constituinte, multiplicou-se o traço volumétrico pela baridade respetivamente a cada material, Tabela 4.7, e preparou-se a argamassa a utilizar na moldagem dos provetes. Utilizou-se 850 cm^3 de água em cada amassadura. O fator a/l (água/ligante) encontrado foi de 0,8.

Tabela 4.7 - Massa de cada material utilizada na amassadura da argamassa bastarda de cal aérea, cimento, e areias

	Cal aérea	Cimento	Areia de Rio	Areia de Areeiro
Baridade [Kg/m^3]	408,9	988,5	1487,0	1389,7
Volume [cm^3]	500,0	500,0	1500,0	1500,0
Massa [g]	204,4	494,2	2230,5	2084,5

4.5. Caracterização da argamassa no seu estado fresco e condições de cura

Sobre a argamassa fresca foram realizados ensaios de consistência por espalhamento, de acordo com a ficha de ensaio Fe 25 [90] e com a norma EN 1015-3:1999 [12]. Este ensaio tem como objetivo determinar a trabalhabilidade da argamassa, ou seja, aferir a melhor consistência possível para cada aplicação (argamassa de execução de rebocos, assentamentos de alvenaria, regularização, etc). Para se chegar à consistência desejada, levaram-se a cabo vários ensaios de consistência por espalhamento, com os seguintes equipamentos e segundo o procedimento a seguir apresentado [84], Figura 4.24.

Equipamentos:

- mesa de consistência;
- molde tronco-cônico;
- craveira analógica;
- varão metálico de compactação, com 15mm de diâmetro;
- régua metálica.

Procedimento experimental:

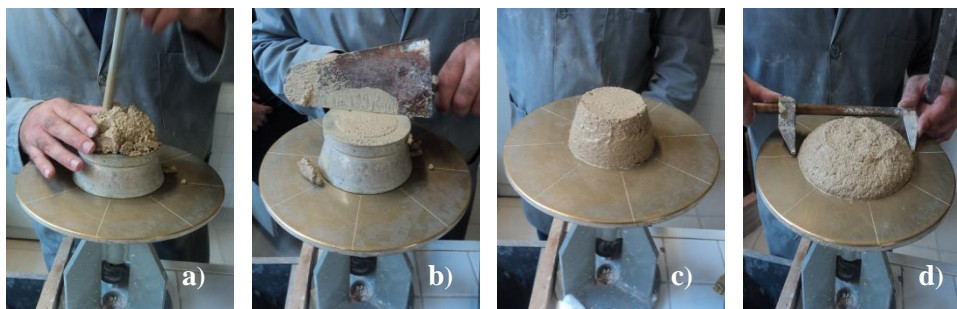
- verificação do estado de secagem e limpeza do equipamento;
- colocação do molde no centro da mesa de consistência;
- enchimento do molde em duas camadas de altura sensivelmente iguais;
- compactação com o varão (20 pancadas em cada camada), mantendo o molde fixo na mesa de consistência;
- nivelamento da superfície, retirando-se o molde com cuidado;
- rotação da manivela, provocando 15 pancadas em 15s;
- medição com a craveira, segundo os quatro diâmetros gravados no tampo da mesa, do afastamento entre dois pontos de intersecção de cada um deles com o contorno da argamassa, após o espalhamento provocado pelas 15 pancadas;
- cálculo da média das quatro medições, d , arredondada à unidade.

Nota: O procedimento adotado, relativamente à norma EN 1015-3:1999, difere essencialmente na medição com a craveira dos quatro diâmetros gravados na tampa da mesa, em que neste caso apenas foram medidos 2 diâmetros, um no sentido vertical e o outro no sentido horizontal.

Neste ensaio teve-se o cuidado dos equipamentos (mesa de consistência, molde tronco-cônico e varão) estarem sempre com o mesmo grau de humedecimento para que os resultados pudessem ser comparáveis e não influenciados por um teor de humidade variável da mesa de consistência. O valor de espalhamento (Esp) arredondado à unidade é obtido com a seguinte expressão [84]:

$$Esp = \frac{d-10}{10} \times 100 \quad [\%] \quad (4.6)$$

onde: d é a média dos dois valores d' [cm]; 10 é o diâmetro interior da base do molde tronco-cônico [cm].



a) compactação; b) nivelamento da superfície; c) aspeto da argamassa após se retirar o molde; d) aspeto da argamassa no final do ensaio e medição com a craveira

Figura 4.24 - Ensaio de consistência por espalhamento da argamassa fresca

O valor final obtido para o espalhamento foi de 68%. Na Tabela I. 8 do Anexo I apresentam-se os valores obtidos nas diferentes amassaduras efetuadas, no total de quatro amassaduras.

Após o ensaio de consistência por espalhamento, procedeu-se ao enchimento dos moldes dos provetes, de acordo com a Fe 19 [85]. A moldagem decorreu durante o dia 23 de Outubro de 2012, nas condições que se apresentam de seguida, Figura 4.25.

Equipamentos:

- compactador mecânico;
- moldes prismáticos de 4cmx4cmx16cm.

Procedimento:

- colocação do molde bem fixo na mesa do compactador mecânico;
- enchimento do molde em duas camadas de alturas sensivelmente iguais;
- compactação de cada camada com vinte pancadas;
- remoção do excesso de argamassa.



a) fixação do molde; b) compactação de cada camada

Figura 4.25 - Moldagem e compactação mecânica dos provetes de 16cmx4cmx4cm

Após a moldagem dos provetes, estes foram colocados numa sala de ambiente condicionado onde ocorreu a cura, com as seguintes condições: temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $60\pm 5\%$.

Após um período de sete dias, os provetes foram desmoldados, permanecendo na sala de cura, mantendo as mesmas condições a que estavam expostos. Os provetes foram colocados em estantes, cada um deles sobre dois suportes de plástico para garantir o contacto da face inferior com o ambiente. Na Figura 4. 26 mostra-se o aspeto dos provetes de argamassa após o desmolde.



Figura 4. 26 - Provetes de referência desmoldados utilizados nos ensaios de caracterização

4.6. Caracterização da argamassa endurecida

Na Tabela 4. 8 referem-se os ensaios de caracterização, física e mecânica, realizados sobre a argamassa no seu estado endurecido, bem com as normas e/ou fichas de ensaio usadas. Todos os ensaios foram efetuados com provetes não armados (AR). Os resultados individuais e os respetivos desvios padrões encontram-se no Anexo I.

Tabela 4. 8 - Características estudadas nas argamassas endurecidas

Características estudadas		Norma e/ou ficha de ensaio
Características Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	Fe 08 [93]
	Resistência à tração por flexão	EN 1015 – 11:1999 [12] / Fe 27 [90]
	Resistência à compressão	EN 1015 – 11:1999 [12] / Fe 27 [90]
Características Físicas	Massa volúmica aparente	Fe 01 [87]
	Massa volúmica real	Fe 01 [87]
	Porosidade aberta	Fe 02 [92]
	Absorção de água por capilaridade	Fe 06 [91]
	Secagem	Fe 07 [89]

4.6.1. Características mecânicas

❖ Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite avaliar a sua suscetibilidade à fendilhação (compatibilidade física com o suporte), ao nível da sua deformabilidade. Valores de módulo de elasticidade dinâmico elevados correspondem a materiais com maior rigidez, enquanto valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade. A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão ligadas à capacidade de absorver deformações que podem ser de algum modo avaliadas através do módulo de elasticidade. O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado aos 135 dias dos provetes após a moldagem, de acordo com a ficha de ensaio Fe 08 [93]. Nestes ensaios foram utilizados provetes inteiros, antes de serem ensaiados à tração por flexão e à compressão. De seguida indicam-se os equipamentos e procedimento de ensaio utilizados na determinação do módulo de elasticidade dos provetes de ensaio, Figura 4.27.

Equipamento:

- estufa ventilada;
- balança com precisão 0,1g;
- equipamento adequado para emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal associada.

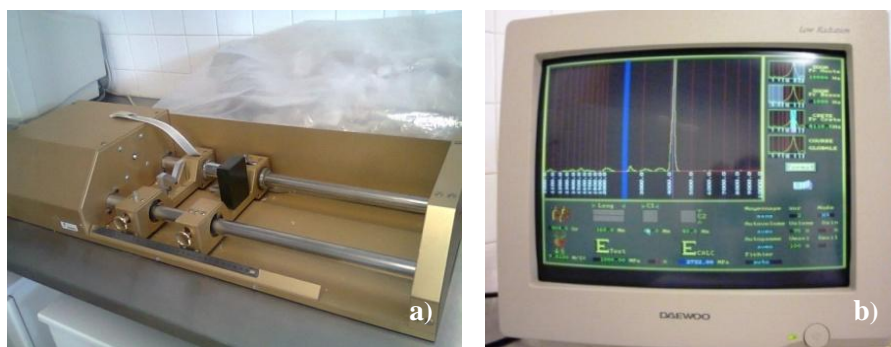
Procedimento experimental:

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$ até obter massa constante;
- colocação de cada provete no equipamento, aplicando numa extremidade uma fonte emissora e, na outra, a unidade de receção;
- ligação do oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, correspondendo as condições de ressonância às amplitudes máximas.

O módulo de elasticidade dinâmico, E_{din} , é calculado automaticamente pelo programa informático que processa os dados recebidos do equipamento, através da expressão [93]:

$$E_{din} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [MPa] \quad (4.7)$$

Sendo: L o comprimento do provete [m]; f_0 a frequência de ressonância longitudinal [Hz] ; ρ a massa volúmica [N/m^3]; g a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$).



a) equipamento para a determinação do E_{din} ; b) equipamento informático de processamento de dados

Figura 4.27 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Para cada um dos provetes devem ser efetuadas no mínimo duas determinações, sempre com o provete em diferentes posições, e estas não devem diferir mais do que 5%.

A frequência longitudinal final de cada um dos provetes é dada pela média das duas determinações.

O valor médio obtido para o módulo de elasticidade dinâmico aos 135 dias foi $E_{din}=2018$ MPa.

Na Tabela I. 9 do Anexo I apresentam-se os valores individuais e o desvio padrão.

❖ Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

As resistências mecânicas das argamassas são parâmetros importantes para a sua caracterização, pois através destas podemos conhecer a sua capacidade resistente.

De facto, embora estes parâmetros não sejam os mais importantes na caracterização de uma argamassa (pois do ponto de vista mecânico de uma argamassa, a rigidez é mais importante do que a resistência), eles devem ser tidos em conta no processo de seleção de uma argamassa de revestimento, de assentamento ou outra.

Para esta caracterização, em primeiro lugar é efetuado o ensaio de resistência à tração por flexão e, com as metades dos provetes resultantes, realiza-se o ensaio de resistência à compressão, do qual resultam apenas as duas extremidades de cada «meio provete» (as quais são depois usadas em ensaios de determinação da massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta).

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com a norma EN 1015-11:1999 [12] e com a ficha de ensaio Fe 27 [90]. De seguida indicam-se os equipamentos e respetivo procedimento de ensaio [12, 90].

Equipamentos:

- estufa ventilada
- máquina universal de tração (ZWICK Z050)
- suporte para ensaio de flexão
- suporte para ensaio de compressão

Procedimento experimental (para determinação da resistência à tração por flexão), Figura 4.28 a):

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante;
- colocação dos provetes prismáticos sobre o suporte para o ensaio de flexão, com os pontos de apoio afastados de 100mm e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento;
- aplicação da carga a meio vão, com uma velocidade de 5,1mm/min (50 ± 10 N/s), até à rotura, registando-se o valor da carga última ao qual resistem os provetes – F_f

Procedimento experimental (para a determinação da resistência à compressão), Figura 4.28 b):

- colocação dos meios provetes resultantes do ensaio de flexão no suporte para ensaio de compressão (com uma área de contacto de 1600mm^2) e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento
- aplicação da carga com uma velocidade de 5,2mm/min (100 ± 10 N/s), até à rotura, registando-se o valor da carga última ao qual os provetes resistem – F_c

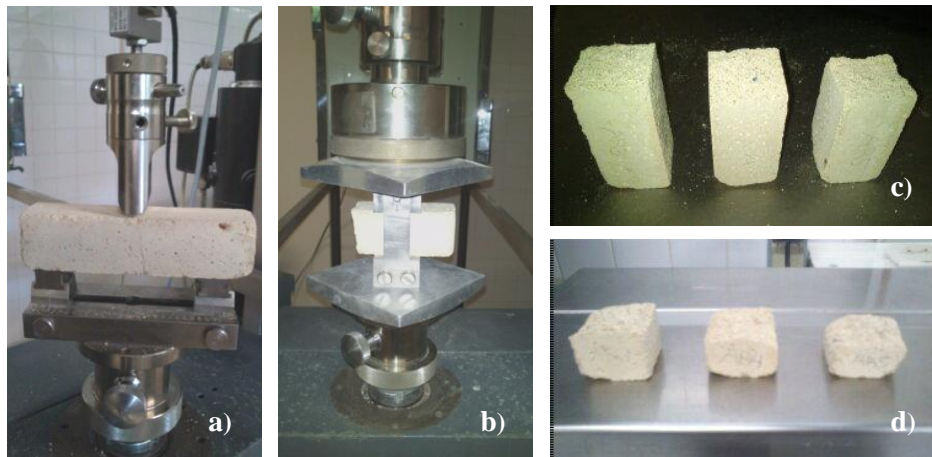
Os resultados são expressos em MPa e de acordo com as seguintes expressões [12, 90]:

- Resistência à flexão:
$$R_f = \frac{3}{2} \times F_f \times \frac{L}{b^3} \quad [MPa] \quad (4.8)$$

- Resistência à compressão:
$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [MPa] \quad (4.9)$$

Onde: b é o lado da secção quadrada do prisma (neste caso $b = 40\text{mm}$); l a distância entre apoios (neste caso $l = 100\text{mm}$); A área de contacto (neste caso $A = 40 \times 40 = 1600\text{mm}^2$) e F_f [N] e F_c [N] forças de rotura para a flexão e compressão, respetivamente.

Na Figura 4.29 indicam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão dos provetes ensaiados aos 135 dias. Nas Tabela I. 10 e Tabela I.11 do Anexo I, são indicadas as resistências à tração por flexão e resistências à compressão obtidas para cada tipo de provete de argamassa ensaiado.



a) ensaio de flexão; b) ensaio de compressão; c) extremidades dos provetes resultantes do ensaio de flexão; d) extremidades dos provetes resultantes do ensaio de compressão

Figura 4.28 - Ensaio para determinação das tensões de resistência à tração por flexão e à compressão

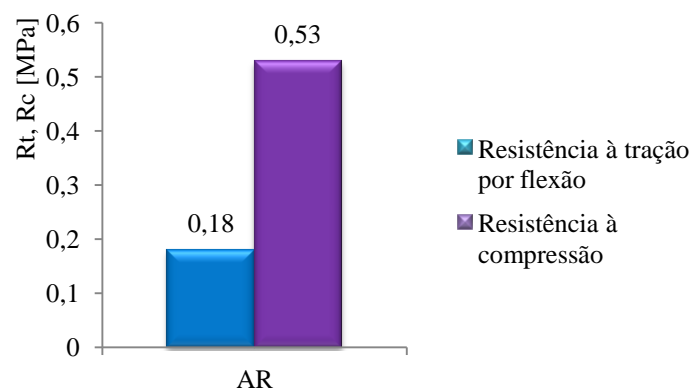


Figura 4.29 - Resultados médios das resistências mecânicas

4.6.2. Características físicas

❖ Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta

A massa volúmica real (MVR) e a massa volúmica aparente (MVA) são características físicas que ajudam na interpretação de algumas características mecânicas, nomeadamente a nível do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências mecânicas.

Quanto maior a massa volúmica, maior o módulo de elasticidade e maior será a compacidade (C) e, por sua vez, menor a porosidade (P) (pois são grandezas complementares: $P+C=100\%$) [7].

O ensaio de determinação da porosidade aberta (PA) permite avaliar a porosidade aberta das argamassas, isto é, saber a percentagem de volume de poros presentes no interior da argamassa que têm ligação ao exterior e ligação com os outros poros [63].

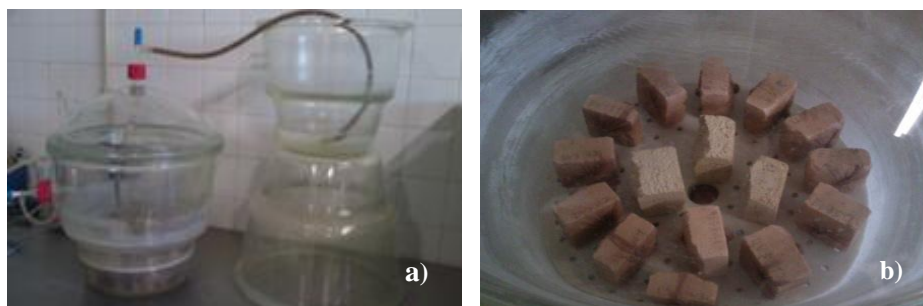
A determinação da massa volúmica e porosidade aberta foram realizados aos 152 dias dos provetes após a moldagem, e de acordo com as fichas de ensaio Fe 01 [87] e Fe 02 [92], respetivamente. Os ensaios foram executados com as extremidades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão, sendo que os equipamentos e procedimentos indicados de seguida foram comuns em ambos os ensaios, variando apenas o tratamento dos dados obtidos, Figura 4.30.

Equipamentos

- estufa ventilada
- balança com precisão 0,001g
- exsiccador
- bomba de vácuo ligada ao exsiccador
- funil de vidro
- mangueiras de plástico

Procedimento experimental

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante
- pesagem dos provetes secos, obtendo-se a massa M_0
- colocação dos provetes no interior do exsiccador fechado, fazendo diminuir gradualmente a pressão no seu interior até aos 2667 Pa (20mm de mercúrio) através de uma bomba de vácuo; os provetes são mantidos a esta pressão durante 24h
- ao fim de 24h, coloca-se a água no funil e faz-se penetrar a água dentro do exsiccador, lentamente e a uma temperatura de 15 a 20°C (através de uma mangueira de PVC), até imersão total dos provetes, durante cerca de 15min; a imersão total dos provetes à pressão referida é mantida durante 24 h
- após 24h, desliga-se a bomba de vácuo deixando os provetes em imersão durante mais 24h sujeitos à pressão atmosférica normal
- pesagem dos provetes em imersão (pesagem hidrostática), obtendo-se a massa M_1
- retiram-se os provetes da água, absorve-se a água em excesso com um pano húmido e determina-se a massa dos provetes saturados (pesagem saturada), obtendo-se a massa M_2



a) vista geral dos equipamentos de ensaio utilizados; b) provetes dentro do exsiccador

Figura 4.30 - Ensaio de determinação da massa volúmica

Os resultados são obtidos de acordo com as seguintes expressões:

- Massa volúmica real (MVR):
$$\frac{M_0}{M_0 - M_1} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.10)$$

- Massa volúmica aparente (MVA):
$$\frac{M_0}{M_2 - M_1} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.11)$$

- Porosidade aberta (PA):
$$\frac{M_2 - M_0}{M_2 - M_1} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.12)$$

Sendo: M_0 a massa dos provetes secos [g]; M_1 a massa dos provetes correspondente à pesagem hidrostática [g]; M_2 a massa dos provetes saturada [g].

Na Figura 4.31, apresentam-se os valores médios obtidos para a massa volúmica real e aparente. O valor médio obtido para a porosidade aberta foi de 23,4%. Na Tabela I. 12 do Anexo I apresentam-se os resultados individuais de cada provete de argamassa.

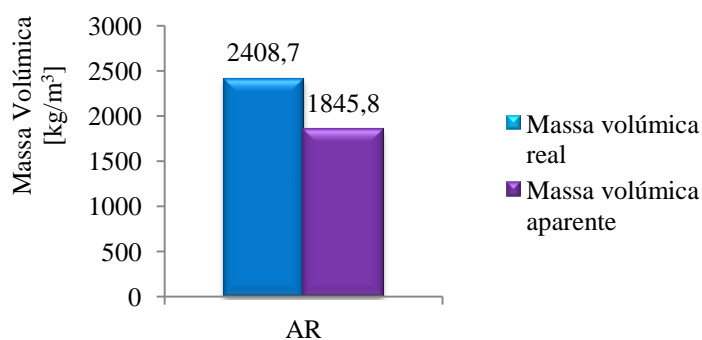


Figura 4.31 - Valores médios da massa volúmica real e aparente

❖ Absorção de água por capilaridade

A capilaridade traduz a ascensão de água, através dos poros de um material, sendo que para o mesmo grau de percentagem de poros (porosidade), quanto maior foi a dimensão dos poros de um material (porometria), menor será a sua absorção por capilaridade. A progressão da água será tanto mais rápida e significativa, quanto mais finos forem os capilares do material [21].

A absorção de água pode fazer-se por duas vias: pressão hidráulica associada à imersão total ou por capilaridade. A absorção de água devido à pressão hidráulica dá-se quando as argamassas estão totalmente imersas, sendo a absorção feita através das várias faces do provete devido à pressão que a água exerce para ocupar o espaço preenchido por ar. A absorção por capilaridade dá-se quando predominantemente uma das faces da argamassa está em contacto com a água, dando-se o fenómeno de sucção capilar.

O ensaio de absorção foi realizado aos 156 dias de idade dos provetes após a moldagem, utilizando uma das metades dos prismas ensaiados à tração por flexão. De seguida indicam-se os equipamentos e procedimento de ensaio segundo estipulado pela ficha de ensaio Fe 06 [91], adaptando o tempo de $s^{1/2}$ para $h^{1/2}$. Na Figura 4.32 apresenta-se algumas fases do procedimento de ensaio.

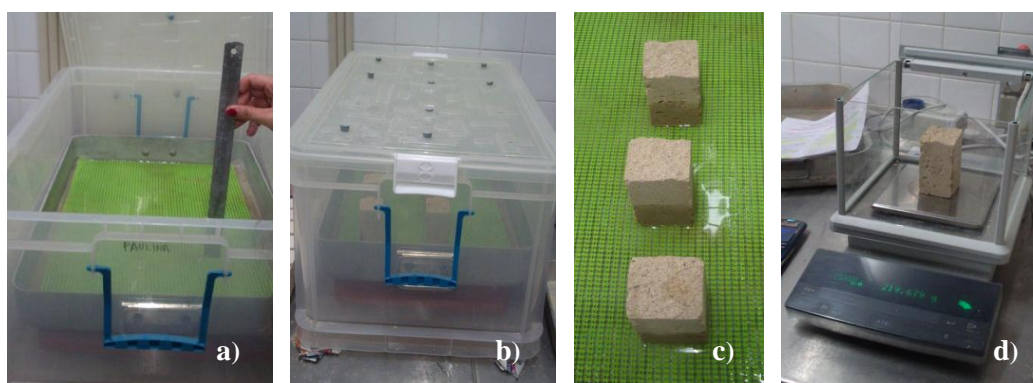
Equipamentos:

- estufa ventilada
- balança de precisão de 0,01g
- caixa de plástico com tampa
- tabuleiro de material rígido e não absorvente
- rede absorvente
- esguicho com água destilada
- cronómetro

Procedimento experimental:

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até massa constante
- pesagem dos provetes secos, obtendo-se a massa M_0
- colocação do tabuleiro, , dentro de uma caixa de plástico com tampa, dentro da qual se verte água com altura suficiente para que se criem condições de saturação (aproximadamente 10cm de altura); o tabuleiro é posto sobre um tijolo, impedindo a entrada de água no seu interior e garantindo a sua horizontalidade
- coloca-se rede absorvente a cobrir o fundo no fundo do tabuleiro

- com o esguicho, cria-se uma lâmina de água no interior do tabuleiro com altura suficiente depois de concluída a colocação dos provetes, esta se mantenha a uma altura de 2 mm
- colocação dos provetes com a face plana menor (4×4) assente no tabuleiro
- colocação da tampa da caixa logo após a colocação do último provete
- passados 5min, retiram-se os provetes, limpa-se a superfície imersa com papel absorvente, pesam-se e colocam-se novamente dentro da caixa de plástico, obtendo-se a massa M_i
- repetição do processo após 15, 30, 60, 180, 360 min e ao fim de cada 24h, até atingir massa constante



a) medição da lâmina de água com 2mm ; b) provetes sujeitos às condições de saturação; c) imagem dos provetes durante o ensaio; d) pesagem dos provetes

Figura 4.32 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados são obtidos pela determinação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície, até ao instante t (M_t), de acordo com a seguinte expressão [91]:

$$M_t = \frac{M_0 - M_i}{A} \quad [kg/m^2] \quad (4.13)$$

Sendo: M_i a massa do provete no instante $t = i$ [g]; M_0 a massa do provete seco [g]; A a área da face em contacto com a água [m^2] (neste caso, $S=0,04 \times 0,04=0,0016m^2$).

Com os valores obtidos, traça-se o gráfico relativo à absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, até massa constante, com abcissas em t [$h^{1/2}$] e ordenadas em kg/m^2 . A inclinação do troço inicial do gráfico define o «coeficiente de absorção de água por capilaridade», expresso em $kg/(m^2 \cdot h^{1/2})$. É igualmente determinado o «valor assintótico» da curva de absorção de água, atingido quando a diferença entre dois valores sucessivos de massa determinados, m_i e m_{i-1} for inferior a 1%, expresso em kg/m^2 . O coeficiente de absorção permite conhecer a velocidade inicial a que a água é absorvida pelo material, e o valor assintótico correspondente à máxima absorção capilar a que o provete pode estar sujeito [73].

Na Figura 4.33 apresentam-se os valores médios de absorção de água por capilaridade e o gráfico correspondente à primeira hora de ensaio. Nas Tabela I. 13 e Tabela I. 14 apresentam-se os valores individuais de cada amostra. Chegou-se a um resultado médio final para o coeficiente de absorção de água de 15,67 [kg/(m².h^{1/2})], e um valor assintótico de 19,10 [kg/m²].

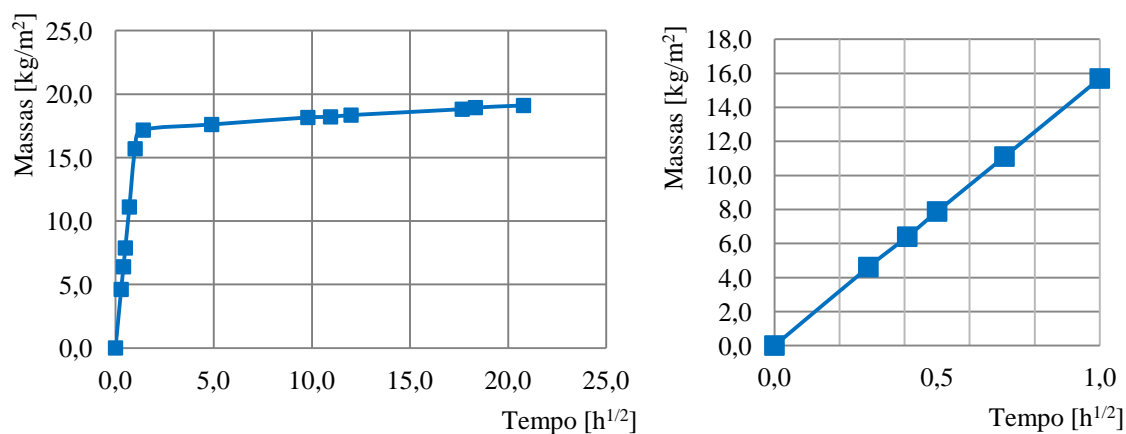


Figura 4.33 - Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade

❖ Ensaio de secagem

A secagem de uma argamassa está relacionada com os valores de porosidade aberta e as condições de temperatura e ventilação ambiente [63]. O resultado deste ensaio é de grande relevância na avaliação do comportamento das argamassas, pois relaciona a capacidade de evaporação de água (podendo esta ter origem na capilaridade, infiltração ou condensação), e o seu comportamento térmico, pois quanto mais húmida a parede estiver, maior será a sua condutibilidade térmica.

O ensaio de secagem realizou-se aos 173 dias de idade dos provetes após a moldagem, segundo as indicações da ficha de ensaio Fe 07 [89], e foram utilizados os meios prismas ensaiados à flexão com que se realizou anteriormente o ensaio de absorção de água por capilaridade. Em seguida referem-se os equipamentos e o procedimento do ensaio de secagem, Figura 4.34.

Equipamentos:

- tabuleiro de material não absorvente;
- balança com precisão de 0,001g;
- cronómetro.

Procedimento experimental:

- pesagem dos provetes saturados, M_s , imediatamente após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade;
- colocação dos provetes em base seca;

- pesagem de cada provete, M_i , após 5, 15, 30, 60, 180, 300, 360 min e de 24 em 24h, até atingir massa constante¹¹.



Figura 4.34 - Ensaio de secagem dos provetes de argamassa

Através de medições diárias da massa dos provetes, procede-se à elaboração de curvas de secagem, que indicam a progressão do teor de água nos provetes (Q_i) ao longo tempo, expresso em horas. Os resultados são obtidos através da seguinte equação [89]:

$$Q_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad [\%] \quad (4.14)$$

Sendo: M_i a massa do provete no instante t_i [g]; M_0 a massa do provete seco [g].

Na Figura 4.35 apresenta-se o resultado médio do ensaio de secagem. Na Tabela I. 15 do Anexo I apresentam-se os resultados individuais do ensaio de secagem obtidos em cada provete de argamassa.

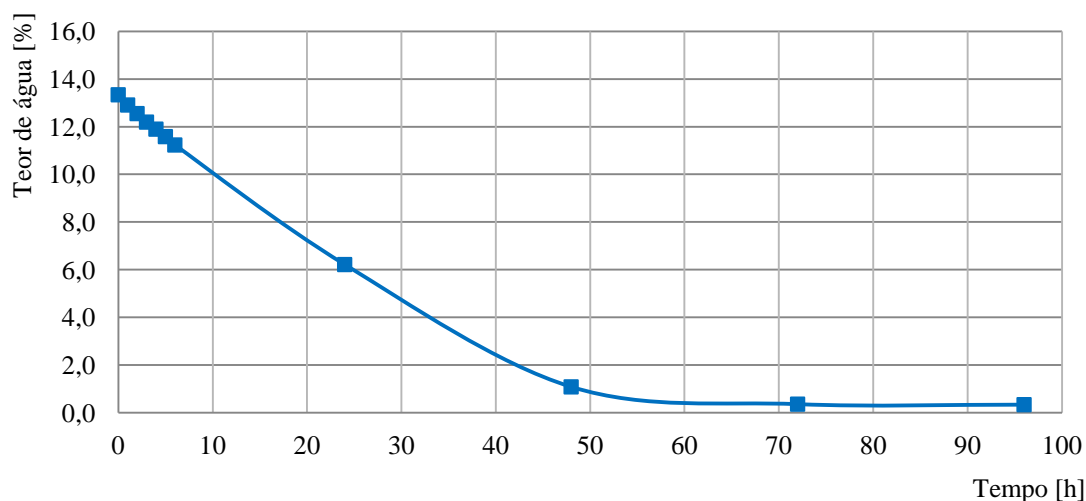


Figura 4.35 - Resultado médio do ensaio de secagem dos provetes de argamassa

¹¹ No ensaio de secagem a «massa constante» de um provete é atingida quando a variação entre duas pesagens sucessivas no intervalo de 24 horas, é menor que 0,01% da massa do provete [89]

A caracterização da secagem é fornecida pelo índice de secagem (IS), e permite-nos conhecer a velocidade com que a argamassa seca. Este é calculado segundo a seguinte expressão [11]:

$$IS = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(Q) \times dt}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (4.15)$$

Sendo: $f(Q_i)$ a quantidade de água no interior do provete [%] em função do tempo, relativamente à massa seca; $Q_{m\acute{a}x}$ a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca; t_f o tempo final do ensaio [h].

O cálculo do integral foi efetuado através da seguinte expressão [11]:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n_s} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (4.16)$$

Sendo: Q_i a quantidade de água no interior do provete no instante i [%], relativamente à massa seca; $Q_{m\acute{a}x}$ a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca; t_f o tempo final de ensaio [h]; t_i o tempo de ensaio i [h]; n_s o número de pesagens de controlo efetuadas.

O resultado médio final obtido para o índice de secagem foi de 0,268. Na Tabela I. 16 do Anexo I apresentam-se os resultados individuais para cada provete.

4.7. Enquadramento dos resultados

Nesta secção enquadra-se e comparam-se os valores obtidos neste capítulo com os obtidos por outros autores referidos no Capítulo III, com a intenção de os poder extrapolar ao trabalho de investigação [65] que serviu de referência ao presente estudo.

Neste seguimento, recuperam-se os resultados referidos no Capítulo III e que serviram de comparação aos valores obtidos neste estudo, relativamente aos ensaios de caracterização da argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:1:6, e também relativamente à composição química das fitas metálicas.

Por razões de síntese, respetivamente à argamassa, apresentam-se na Tabela 4. 9 os valores obtidos por outros trabalhos (referidos no Capítulo III) com o objetivo de comparar aos obtidos na presente dissertação, fazendo o confronto entre características dos constituintes das argamassas em pasta e endurecidas. Quanto à composição das fitas metálicas apresentam-se de igual forma na Tabela 4.3, os valores obtidos por outros autores, a serem comparados aos obtidos na presente dissertação.

Esta análise foi feita tomando em conta algumas condicionantes de ensaio, tais como: resultados de características semelhantes obtidas em idades diferentes; utilização de diferentes equipamentos; os ensaios terem sido efetuados por técnicos distintos; por vezes o grau de compactação é diferente; a superfície específica e outras características relacionadas (de agregados e/ou ligantes) ser diferente;

por vezes o seguimento de disposições de ensaio é distinto; e o facto de no principal trabalho de referência a esta dissertação [65], as amassaduras terem sido efetuadas em «ambiente de obra». Estas condicionantes podem ter intervindo na relação das diversas características estudadas, face ao atual estado do conhecimento.

Tabela 4. 9 - Comparação das características dos provetes de argamassa

Autor	Material	Idade [dias]	Características														
			Físicas										Mecânicas				
			D [mm]	d [mm]	Mf	Ba [kg/m ³]	Esp [%]	MVR [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	PA [%]	C.Cap [kg/m ² .h ^{1/2}]	VA [kg/m ²]	IS	E _{din} [MPa]	R _t [MPa]	R _c [MPa]	
F. Pinho [65]	Areia rio		2,38	0,149	2,7	1584,4											
	Areia areeiro		0,595	0,149	1,8	1527,3											
	Arg. end.	1)					x	2768	1875	32,2	13,6	2)	x	5637	1,22	4,55	
P. Faria [21]	Areia rio		2,38	0,297	2,7	1590											
	Cimento					1280											
	Cal aérea					570											
	Arg. pasta						67										
	Arg. end.	60						x	1841	31	15,0	20,9	x	7340	1,23	4,08	
V. Rato [73]	Areia																
	Arg. pasta						70										
	Arg. end.	60						x	1801	30	21,78	2)	x	5905	0,96	3,02	
F. Henriques e V. Rato [34]	Arg. end.							2615	1843	29,5	15,78	18,8	x	5600	1,06	3,79	
A. Gonçalves	Areia rio		0,595	0,149	0,99	1487,0											
	Areia areeiro		0,595	0,149	0,98	1389,7											
	Cimento					988,5											
	Cal aérea					408,9											
	Arg. pasta						68										
	Arg. end.	3)						2408,7	1845,8	23,4	15,67	15,10	0,268	2018	0,18	0,53	

1) Os ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida foram efetuados em vários dias, logo a idade dos provetes não será aqui indicada.

2) Os valores de VA, apesar de terem sido calculados, não são apresentados porque o ensaio foi efetuado com provetes inteiros.

3) Os ensaios de caracterização da argamassa endurecida decorreram aos 135, 152, 156 e 173 dias, razão pela qual não se indica a idade na tabela.

4) x - ensaio não efetuado pelo autor.

❖ **Baridade:**

A baridade é um aspeto que exerce desde logo uma grande influência nas características das argamassas, sendo que, com esta informação são determinados os traços volumétricos das argamassas.

A maior ou menor compactação, aplicada na determinação desta característica, justifica a diversidade na gama de valores entre os diferentes autores, nomeadamente nos ligantes.

❖ **Espalhamento:**

Comparando V. Rato [73] com A. Gonçalves, observa-se que o valor obtido pelo primeiro é maior, o que implicaria um valor de massa volúmica aparente inferior ao de A. Gonçalves. Ao analisar o gráfico dos valores adquiridos no ensaio de massa volúmica aparente, comprova-se que tal se verificou.

Comparando o valor obtido no ensaio de espalhamento por P. Faria [21], com os provetes de A. Gonçalves constata-se que o valor de P.Faria [21] é ligeiramente inferior, o que implicaria um valor de massa volúmica aparente superior ao de A. Gonçalves, mas observa-se que tal não acontece. Contudo, o ensaio de consistência por espalhamento trata-se de uma determinação muito pouco fidedigna. É utilizada apenas, para de algum modo se poder comparar a influência da água no comportamento das argamassas, pelo que não se procuram tirar grandes inferências deste ensaio.

❖ **Massa volúmica real e massa volúmica aparente:**

Os valores de massa volúmica real não são alvo de discussão, uma vez que esta característica despreza os vazios existentes na argamassa, não representa uma influência direta na avaliação dos parâmetros de resistência mecânica e módulo de elasticidade.

Os valores da massa volúmica aparente foram, de algum modo, tidos em conta juntamente com a análise do espalhamento.

❖ **Porosidade aberta:**

Independentemente de outros fatores, uma maior porosidade aberta (implicando uma menor compacidade) leva a uma menor resistência mecânica e um menor módulo de elasticidade dinâmico.

Comparando o valor obtido de porosidade nos provetes de A. Gonçalves com F. Pinho [65] verificou-se que esta situação não aconteceu.

Comparando o valor obtido de porosidade aberta por F. Pinho com P.Faria, verifica-se que uma menor porosidade aberta obtida por P. Faria, conduziu a um maior módulo de elasticidade face ao obtido por F. Pinho.

❖ **Absorção de água por capilaridade:**

O valor assintótico determinado no ensaio de absorção de água por capilaridade depende da porosidade aberta total e também das dimensões dos provetes ensaiados. O ensaio na presente dissertação decorreu com meios provetes. Não se sabendo se todos os outros ensaios, levados a cabo pelos vários autores apresentados no Capítulo III, foram concretizados com iguais dimensões, os valores de VA obtidos por esses autores não são discutidos.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é influenciado pela porometria das argamassas, pois quanto menor a dimensão do poro capilar, maior será a quantidade de água absorvida por capilaridade pela argamassa. Uma vez que o ensaio de porometria não foi realizado na presente

dissertação, faz-se uma relação do ensaio de absorção de água por capilaridade com o ensaio de porosidade aberta.

Comparando o valor obtido no ensaio de porosidade aberta por A. Gonçalves com os de V. Rato [73] ou até mesmo com F. Henriques e V. Rato [34], observa-se que este é inferior, obtendo igualmente um coeficiente de absorção inferior. Por outro lado, comparando A. Gonçalves com o valor obtido por F. Pinho [65] e até mesmo com P. Faria [21], o valor do ensaio de porosidade aberta obtido por estes são superiores aos de A. Gonçalves, o que implica um valor de coeficiente de absorção de água superior ao de A. Gonçalves. Analisando os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, verifica-se que tal não aconteceu.

❖ ***Módulo de elasticidade dinâmico:***

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a massa volúmica da argamassa, variando as duas de forma diretamente proporcional.

Comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [65] com o de A. Gonçalves, nota-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implicaria um valor de módulo de elasticidade dinâmico superior ao de A. Gonçalves, o que, analisando os valores obtidos nesse ensaio, verificou-se que tal aconteceu.

Comparando F. Pinho com P. Faria [21], observou-se que apesar de P. Faria ter obtido um valor de massa volúmica aparente inferior a F. Pinho, o mesmo não se verificou no módulo de elasticidade dinâmico. Observou-se que os valores obtidos por A. Gonçalves são inferiores aos obtidos por F. Pinho [65], trabalho de referência do presente estudo.

❖ ***Resistência à tração por flexão e resistência à compressão:***

Comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [65] com o de A. Gonçalves, observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implica um valor de porosidade aberta inferior e resistências mecânicas superiores ao de A. Gonçalves. Analisando os valores obtidos no ensaio de porosidade aberta e resistência mecânica, observa-se que esta situação não foi verificada para o caso do valor de porosidade aberta, mas verificou-se no caso das resistências mecânicas.

Comparando P. Faria [21] com V. Rato [73] nota-se que valores de massa volúmica aparente superiores conduziram a valores de resistências mecânicas superiores. Contudo, o valor de porosidade aberta de P. Faria deveria ter sido inferior ao de V. Rato, o que não se constatou. Apurou que os resultados das resistências à compressão e à tração por flexão, obtidos por A. Gonçalves, deram valores inferiores aos obtidos por F. Pinho [65], trabalho de referência do presente estudo.

❖ *Análise FRX das fitas metálicas:*

Tabela 4. 10 - Comparação dos valores da composição química das fitas metálicas [%] com vários autores

Autor	Material	Concentração dos elementos [%]								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
M. C. García-Alonso et al. [27]	AISI 304	0,06	1,14	0,35	0,02	0,01	17,4	8,3	0,12	0,4
M. Kouril et al. [56]	FeCr18Ni10	0,08	1,40	0,64	0,023	0,020	18,06	10,20	0,16	0,12
	FeCr18Ni10Mo2	0,07	0,98	0,25	0,025	0,014	17,84	9,86	2,06	0,12
A. Gonçalves	Fita metálica	-	1	0,3	-	-	19	9	0,2	0,6

Comparando A. Gonçalves com M. C. García-Alonso et al. [27] e até com M. Kouril et al. [56], o valor de percentagem de crómio (Cr) obtido por A. Gonçalves é ligeiramente superior que o obtido pelos restantes autores. Comparando A. Gonçalves com M. Kouril et al. [56], o valor da percentagem de molibdénio (Mo) obtido por M. Kouril et al. para o aço FeCr18Ni10Mo2 é muito superior.

5. DURABILIDADE DAS FITAS METÁLICAS FACE AOS CLORETOS

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são descritos os procedimentos de ensaio adotados para avaliar a durabilidade das fitas metálicas e em segundo plano, da argamassa face à ação dos cloretos, seguido da apresentação dos gráficos de perda de massa dos provetes. Posteriormente mostram-se os resultados das análises químicas e físicas efetuadas às fitas metálicas, e ainda das análises químicas e microestruturais feitas à argamassa. As análises e comentários aos resultados obtidos são tecidos logo após a apresentação dos mesmos. Nesta fase da campanha experimental, os provetes foram sujeitos a dois ambientes de envelhecimento artificial, a câmara de cloretos (CC) e a câmara de nevoeiro salino (CNS), sendo que o trabalho experimental realizou-se em duas fases intercaladas:

- **Exposição dos provetes aos ambientes de envelhecimento**
- **Recolha de amostras para as seguintes análises e ensaios:**

Fitas metálicas:

- ensaio à tração
- difração de raios-X (DRX)
- microscopia ótica
- microscopia ótica de varrimento (SEM)

Argamassa:

- difração de raios-X (DRX)
- microscopia ótica
- microscopia ótica de varrimento (SEM)

Nesta fase foram utilizados dois provetes de argamassa sem fita metálica (AR1 a AR2), quinze provetes de argamassa com fita metálica (AF1 a AF15) e treze fitas metálicas. Na Tabela 5.1, mostra-se como estes foram distribuídos pelos ambientes de envelhecimento.

Tabela 5.1 - Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos cloretos

Ambientes	Provetes		
	Argamassa sem fita metálica	Argamassa com fita metálica	Fita metálica
Câmara de cloretos	AR1	AF1 a AF4	F1 _{CC} a F3 _{CC}
Câmara de nevoeiro salino	AR2	AF5 a AF15	F1 _{CNS} a F10 _{CNS}

Para conferir se existiram variações no comprimento das fitas metálicas após terem sido expostas aos cloretos, mediu-se com uma craveira os comprimentos iniciais das mesmas, l_i [mm], e são apresentados na Tabela I. 7 do anexo I. Utilizam-se as designações AR para os provetes sem fita metálica, AF referentes aos provetes armados com fita metálica e F para as fitas não embebidas por argamassa.

5.2. Ensaio de durabilidade face aos cloretos

Para conhecer as resistências das fitas metálicas face aos cloretos - principal objetivo da presente dissertação -, foram realizados ensaios de durabilidade aos 60 dias de idade após a moldagem dos provetes. Passa-se a explicar os procedimentos de ensaio utilizados na câmara de cloretos e para a câmara de nevoeiro salino.

5.2.1. Câmara de Cloretos

O ensaio foi realizado com base em P. Faria [21] e na ficha de ensaio Fe 12 [88] a provetes inteiros. Os equipamentos utilizados e o procedimento de ensaio seguido [88] foram os apresentados de seguida, Figura 5.1.

Equipamentos de ensaio:

- estufa ventilada;
- balança com precisão de 0,001 g;
- câmara climática Fitoclima 300 EDTU da Aralab;
- recipiente para a realização da contaminação dos provetes;
- cloreto de sódio.

Procedimento de ensaio:

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até massa constante;
- preparação da solução¹² saturada de cloreto de sódio;
- pesagem dos provetes secos, M_0 ;
- colocação dos provetes em imersão na solução saturada de cloreto de sódio durante 24 h;
- colocação dos provetes na estufa a $T=90\pm 5^{\circ}\text{C}$, até massa constante;
- pesagem dos provetes secos, com cloretos retidos, M_1 ;
- colocação dos provetes na câmara climática;
- pesagem dos provetes e verificação do seu estado de integridade, no fim do ciclo seco, a cada 2 ciclos completos.

Levaram-se a cabo ciclos de humedecimento/secagem/pesagem, determinando-se a perda de massa até à conclusão de 60 ciclos ou até à rotura dos provetes.

¹² A solução de água com sal, para a imersão dos provetes foi obtida dissolvendo uma grande quantidade de sal em água, até ao ponto deste se depositar no fundo do recipiente e não se dissolver mais e depositar no fundo do recipiente.

Através da diferença entre as massas secas dos provetes, antes e após a imersão na solução, determinou-se a quantidade de cloretos retidos, em termos de percentagem em relação à sua massa seca inicial, de acordo com a seguinte expressão [21]:

$$\text{Cloretos retidos} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (5.1)$$

sendo: M_1 a massa seca após imersão na solução saturada de cloreto de sódio [g]; M_0 a massa seca inicial [g].

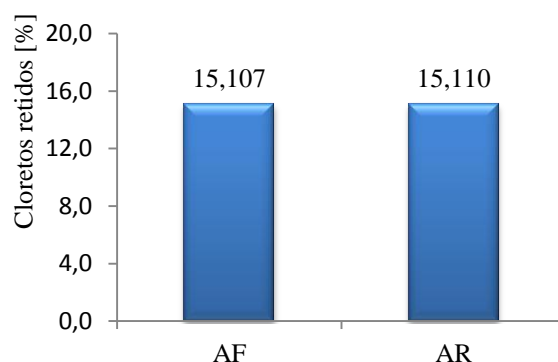
A monitorização dos provetes foi efetuada através da pesagem com balança de precisão de 0,01g. De observar na Figura 5.1 c), que o provete AF4 partiu-se durante a sua colocação na câmara climática.



a) caixa de imersão em cloretos; b) provetes após imersão em cloretos; c) provetes na câmara climática

Figura 5.1 - Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos cloretos - câmara de cloretos

Por lapso não foi pesado a massa seca inicial de cada provete (M_0), e iniciou-se a imersão na solução de cloretos. Na altura de fazer o tratamento dos dados, constatou-se a sua falta, e faz-se uma estimativa deste valor, para cada provete ensaiado. A Figura 5. 2 apresenta a percentagem média estimada de cloretos retidos. Na secção 4.2 do Anexo I descrevem-se os passos para obter esta estimativa, assim como os resultados obtidos para cada provete na Tabela I. 19.



AF: provetes de argamassa armados com fita metálica; AR: provetes de argamassa não armados

Figura 5. 2 - Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa AF e AR

Começou-se por colocar os provetes numa câmara climática, mas esta não estava em pleno funcionamento porque não conseguia fazer os ciclos de humidade. No dia 27-12-2012 mudaram-se os provetes para outro equipamento e voltaram-se a pesar os provetes, passando esta a ser a pesagem inicial nos gráficos de variação de massa em % apresentados na Figura 5. 5. O equipamento utilizado foi o de modelo FITOCLIMA300 EDTU da Aralab, Figura 5.3 a). No seu interior, fez-se variar a humidade relativa (HR), mantendo a temperatura constante de 23°C. O ciclo de humidade é composto por duas fases, com duração de 12h cada, onde na primeira fase a HR é de 40% (fase seca), Figura 5.3 b), e na segunda fase a HR é incrementada para 90% (fase húmida), demorando sensivelmente 15 min a aumentar/diminuir a HR, como é indicado na Figura 5.4.

Na Figura 5.3 c) apresenta-se a planta com a disposição dos provetes no interior da câmara de cloretos e na tabela



a) vista geral da câmara; b) pormenor do painel na fase seca; c) esquema da disposição dos provetes no interior da câmara

Figura 5.3 - Câmara de cloretos e pormenor do painel de configurações na fase seca

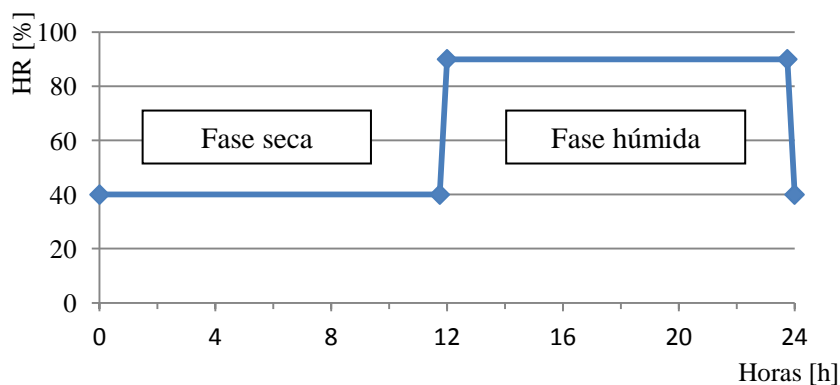


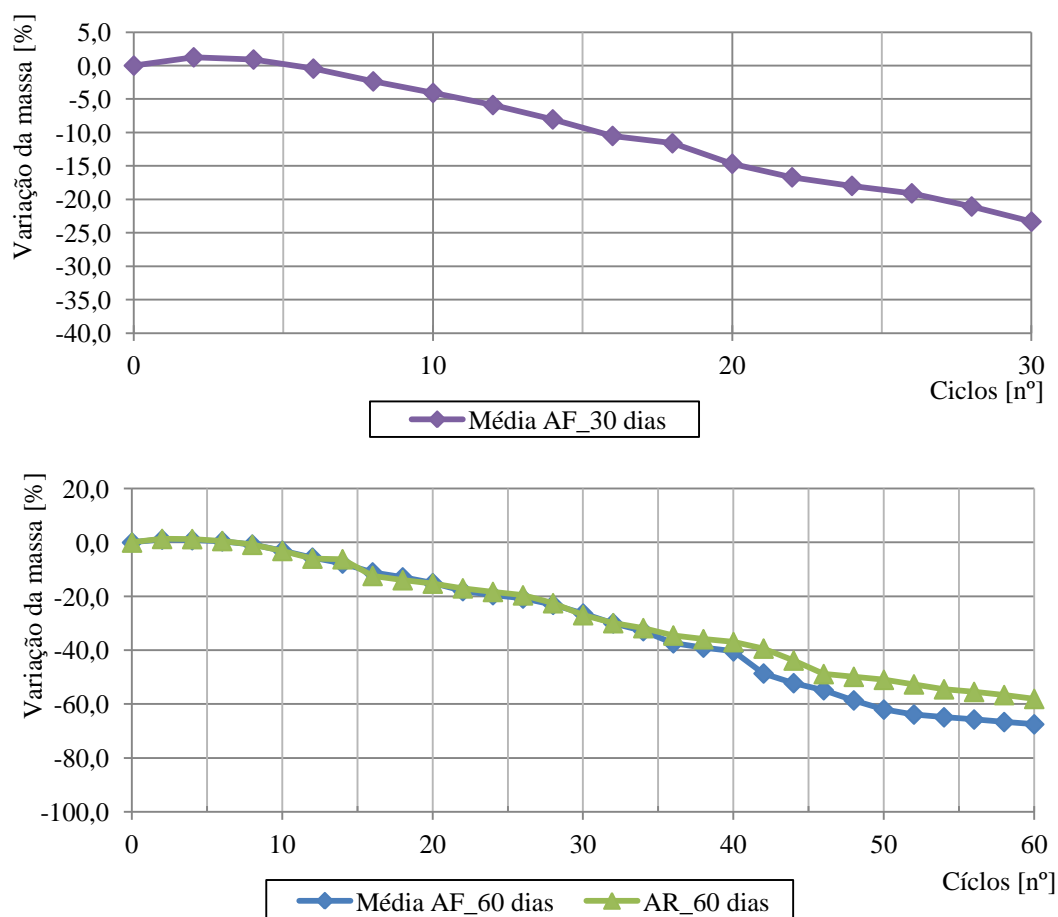
Figura 5.4 - Ciclo da câmara de cloretos (CC)

Ao fim de 30 dias/ciclos retiraram-se os primeiros provetes e os últimos ao fim de 60 dias/ciclos. As datas respectivas em que os provetes foram retirados da câmara estão indicadas Tabela 5.2.

Tabela 5. 2 - Datas em que foram retirados os provetes da câmara de cloretos

Ambiente	30 dias/ciclos (26-01-2013)	60 dias/ciclos (25-02-2013)
CC	AF1; AF2; F1 _{CC} ; F2 _{CC}	AF3; AF4; AR1; F3 _{CC}

Na Figura 5.5 apresentam-se os valores individuais da variação de massa dos provetes de argamassa ao longo de 30 e 60 ciclos. Os valores de evolução e variação de massa de todos os provetes de argamassa em todos os ciclos, assim como os valores de desvio padrão, são apresentados nas Tabela I. 20 a Tabela I. 22, estando seguidas dos respetivos gráficos, Figura I. 2e Figura I. 3.



AF - Provete armado; AR - Provete não armado

Figura 5. 5- Resistência dos provetes de argamassa face aos cloretos – variação da massa

Na Figura 5. 6 apresentam-se as evoluções dos provetes AR1 (provete não armado retirado aos 60 ciclos) e AF3 (provete armado retirado aos 60 ciclos), ao longo dos 60 ciclos no interior da câmara de cloretos.



Figura 5. 6 - Evolução dos provetes de argamassa ao longo de 60 ciclos de ataque por cloretos na câmara de cloretos

De notar que após o ciclo nº 51, o provete AF3 quebrou na zona junto ao espaçador, como se pode observar na Figura 5. 6, no ciclo 60/60. Observando o provete AF3 ao longo do ensaio, verificou-se a diminuição da secção dos provetes na zona adjacente aos espaçadores, acabando por quebrar.

De acordo com as datas indicadas tabela 5.2, recolheram-se os provetes do interior da câmara de cloretos aos 30 e 60 dias. Na Figura 5. 7 podemos verificar o aspeto da fita metálica e da argamassa que esteve em contato com a fita durante o ensaio de cloretos ao longo de 60 dias no interior da câmara de cloretos, para o provete AF3, processo este que foi repetido para os restantes provetes armados. A argamassa foi guardada em sacos plásticos devidamente identificados para posteriormente serem analisadas no DCM.



Figura 5. 7 - Aspeto da argamassa em contato com a fita metálica após ensaio de cloretos na câmara de cloretos

De observar na Figura 5. 7, que a camada de argamassa que esteve em contato com a fita também não apresenta nenhuma alteração na sua cor. Na Figura 5.8 a) e Figura 5.8 b) apresentam-se as fitas metálicas após 30 e 60 dias no interior da câmara de cloretos. Para diferenciar os provetes, utiliza-se a designação AF para as fitas que durante o ensaio estiveram envolvidas em argamassa, e F para as fitas que não estiveram envolvidas em argamassa no decurso do ensaio de cloretos.

Como se pode observar na Figura 5.8 a) e b) que representa as fitas metálicas após serem limpas, independentemente do tempo que estiveram no interior da câmara de cloretos e de estarem ou não envolvidas em argamassa, não foi detetada na superfície do metal a existência de picadas nem camadas de ferrugem avermelhada e acastanhada contrariamente ao estudo feito por D. A. Koleva et al. relativamente a barras de aço [55], evidenciando que a camada de crómio que cobre a superfície da fita está completamente passivada. De igual forma, as extremidades das fitas não apresentam qualquer alteração a nível de cor, aparentando estarem estáveis.

No que diz respeito aos comprimentos das fitas metálicas depois do ensaio de cloretos, após medição com uma craveira analógica, concluiu-se que estes não se alteraram. Logo os comprimentos finais das fitas metálicas, são iguais aos comprimentos iniciais que estão apresentados na Tabela I. 7 do Anexo I.



AF1; AF2; F1_{cc}; F2_{cc} - 30 dias AF3; AF4 F3_{cc} - 60 dias

a) fitas rodeadas por argamassa; b) fitas não rodeadas por argamassa

Figura 5. 8 - Aspetto das fitas metálicas após 30 e 60 dias na câmara de cloretos

5.2.2. Câmara Nevoeiro Salino

Neste caso, devido a problemas de nível técnico, houve a necessidade de se utilizar dois equipamentos. O primeiro equipamento a ser utilizado até aos 88 dias de ensaio (44 ciclos) foi o modelo Corrosionbox 400 l. O ciclo adotado foi de 48 horas e composto por duas fases, a primeira de 8h e a segunda de 40h. Na primeira fase a temperatura da câmara é aumentada para 55°C, altura que os provetes são sujeitos a um aumento de humidade com temperaturas de 70°C. Nas restantes 40h a temperatura no interior da câmara diminui gradualmente, até igualar a temperatura ambiente do laboratório que ronda os 17°C, Figura 5.9. A concentração de cloretos utilizada neste ensaio foi de 5%. Esta é bem superior à concentração de cloretos encontrada na água do mar (3%), isto porque devido ao tempo limitado para realizar esta campanha experimental procurou-se agravar as condições para assim se obter resultados mais significativos.

Uma vez que os valores da HR no interior na câmara não nos eram fornecidos, e por ser um dado de grande relevância no tema em estudo, tentou-se encontrar uma forma de serem feitas as medições deste parâmetro. Uma das tentativas consistiu na introdução de uma mangueira em PVC no interior da câmara e a outra extremidade ligada a um humidímetro, mas na necessidade de manter a porta da câmara selada durante a fase húmida (1ª fase), esta estrangulava a mangueira impedindo que fossem feitas medições. Pensou-se também em colocar um humidímetro no interior da câmara durante a fase

húmida, mas receou-se que a ação dos cloretos danificasse o equipamento. Pelo que não se conseguiu determinar os valores de HR no interior da câmara em questão.

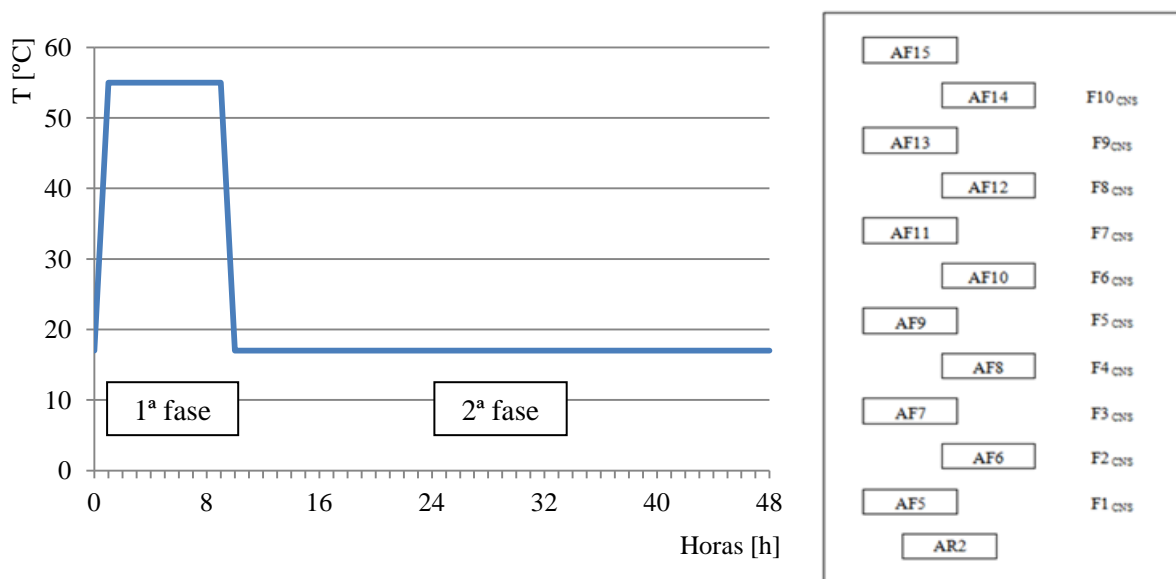


Figura 5.9 - Ciclo da câmara de nevoeiro salino (CNS) e esquema ilustrativo da distribuição dos provetes no interior da câmara

O segundo equipamento utilizado neste ensaio foi o modelo Ascott 450 t. Este encontra-se também no laboratório de estruturas do DEC. Mais uma vez, este também estava a ser utilizado para um estudo a decorrer neste departamento, pelo que as condições de ensaio foram levadas a cabo mediante as necessidades do estudo em curso. O programa adotado para o ensaio consistiu em ciclos de 24 horas com temperatura no interior da câmara mantida a 40°C, onde nas primeiras 6 horas dá-se a fase húmida e nas restantes 18h a fase seca. Os provetes foram colocados na CNS assentes sobre perfis de plástico de modo a promover uma maior superfície de contato com os cloretos, Figura 5.10.



Figura 5.10 - Provetes no interior da câmara de nevoeiro salino (CNS)

Ao fim de 30, 60 e 120 dias retiraram-se amostras para que se pudesse fazer a caracterização física e química das fitas metálicas, assim como, a caracterização química da argamassa, com o objetivo de

avaliar o efeito dos cloretos. Devido a inúmeras avarias nos equipamentos, a duração do ensaio teve que se alargar por mais tempo do que foi inicialmente projetado, pelo que se efetuou entre o dia 21 de dezembro de 2012 e 14 de junho de 2013. Na Tabela 5.3, estão indicadas as datas respetivas em que os provetes foram retirados da CNS.

Tabela 5. 3- Datas em que foram retirados os provetes da câmara de nevoeiro salino

Ambiente	30 dias	60 dias	120 dias
CNS	AF5; AF6; AF7; $\frac{1}{3}$ AF8 F1 _{CNS} ; F2 _{CNS} ; F3 _{CNS}	$\frac{1}{3}$ AF8; AF9; AF10; AF11; F4 _{CNS} ; F5 _{CNS} ; F6 _{CNS}	$\frac{1}{3}$ AF8; AF12; AF13; AF14; AF15; AR2; F7 _{CNS} ; F8 _{CNS} ; F9 _{CNS} ; F10 _{CNS}

A pesagem dos provetes e verificação do seu estado de integridade assim como das fitas, foi efetuada com intervalo de quinze dias entre cada medição, dado que a degradação dos provetes é muita mais lenta que na CC não havendo assim necessidade de se fazerem medições com tanta frequência. A monitorização dos provetes de argamassa foi efetuada através da pesagem com balança de precisão de 0,01g.

Ao logo do ensaio existiram inúmeras avarias no equipamento, ficando por vezes sem funcionar durante períodos de dois a três dias até períodos de quinze dias consecutivos pelo que, devido à mudança que isso implicou nos horários dos ciclos, por vezes o período seco coincidia com o período da noite, pelo que não foi possível acompanhar as medições nesta câmara.

Na Figura 5. 11 apresenta-se a evolução dos provetes AR2 (proвете não armado retirado aos 60 ciclos) e AF12 (proвете armado retirado aos 60 ciclos), ao longo dos 60 ciclos no interior da câmara de nevoeiro salino.

Com o objetivo de analisar a evolução do comportamento do provete ao ataque dos cloretos na zona de interface fita /argamassa, mas desta vez no sentido transversal, Figura 5.12 b), optou-se por dividir o provete AF8 em três partes, sendo que a divisão foi feita através de uma máquina de corte retirando $\frac{1}{3}$ do provete de cada vez aos 30, 60 e aos 120 dias, Figura 5.12 a). Para selar o topo onde a fita metálica está à vista utilizou-se cera de vela, Figura 5.12 c). Quando a camada de cera solidificou o provete foi novamente colocado na CNS. Na Figura 5. 13 apresentam-se as metades do provete AF8 evidenciando a fita metálica e zona circundante.

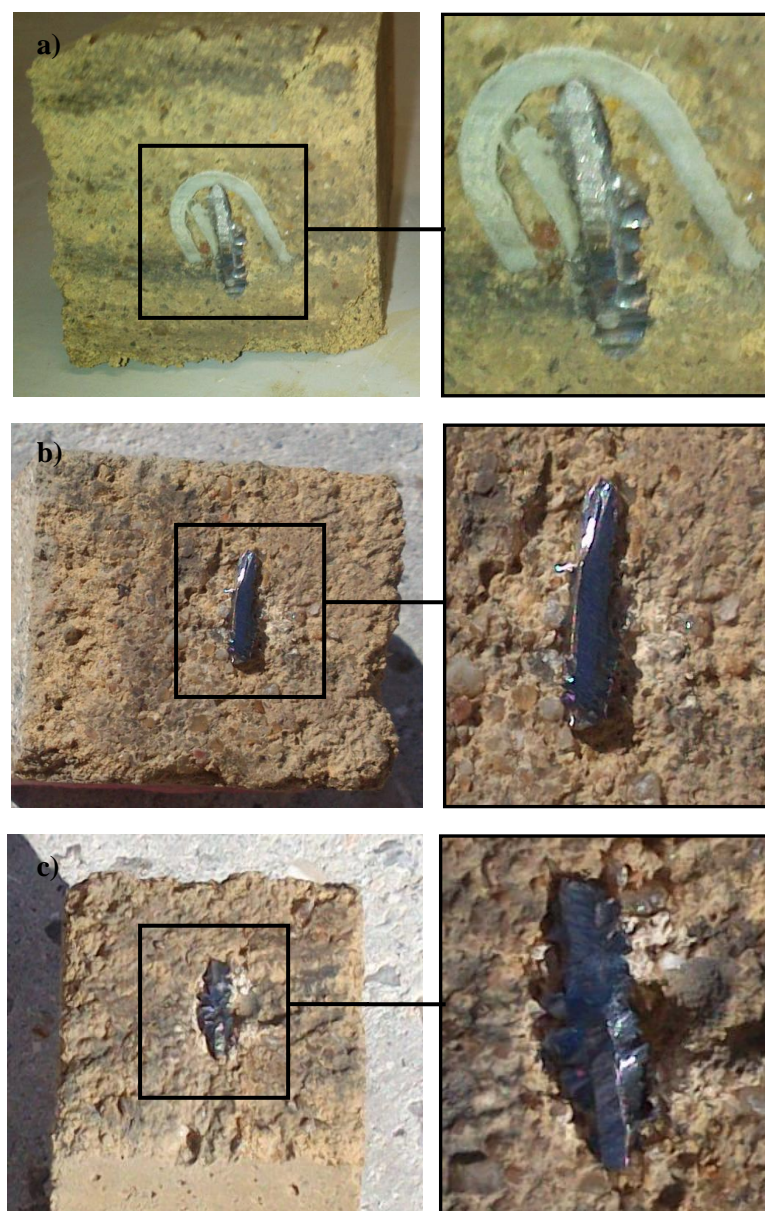


Figura 5. 11 - Evolução dos provetes de argamassa ao longo de 120 ciclos de ataque por cloretos na câmara de nevoeiro salino



a) corte de 1/3 do provete; b) parte do provete para observação; c) provete com o topo selado

Figura 5. 12 - Corte do provete AF8 e selagem do topo com fita à vista



a)30 dias; b) 60 dias; c) 120 dias

Figura 5. 13 - Aspeto da zona circundante da fita do provete AF8 após ataque de cloretos na CNS

Na Figura 5. 13 é possível observar que ao longo do período em que o provete esteve exposto à ação de cloretos no interior da CNS, não existem evidências de picadas nas fitas metálicas nem manchas de tom avermelhado na argamassa na zona envolvente à fita metálica, que pudessem revelar a ocorrência de oxidação sejam aos 30, 60 ou 120 dias.

De acordo com a Tabela 5.3, retiraram-se os provetes do interior da câmara de nevoeiro salino aos 30, 60 e 120 dias. Na Figura 5. 14 mostra-se a aparência da fita metálica e da argamassa que esteve em contato com a fita ao longo do ensaio de cloretos durante 120 dias, relativamente ao provete AF12 e que foi repetido para todos os outros provetes armados. A argamassa foi guardada em sacos plásticos

devidamente identificados para posteriormente serem analisadas no DCM. É de observar que tal como nos provetes que estiveram na câmara de cloretos, a argamassa que esteve em contato com a fita metálica não sofreu alterações na sua cor, assim como a fita metálica não apresentou sinais de corrosão por picadas na sua superfície.

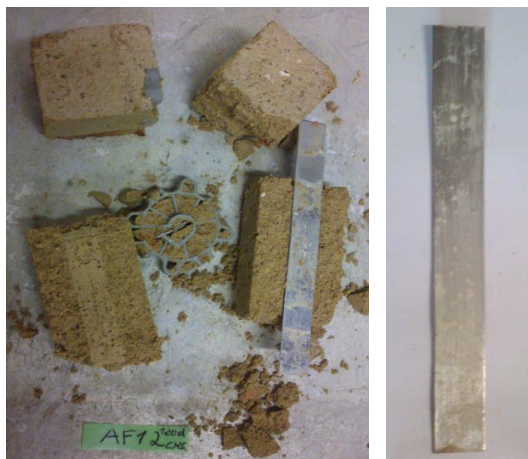
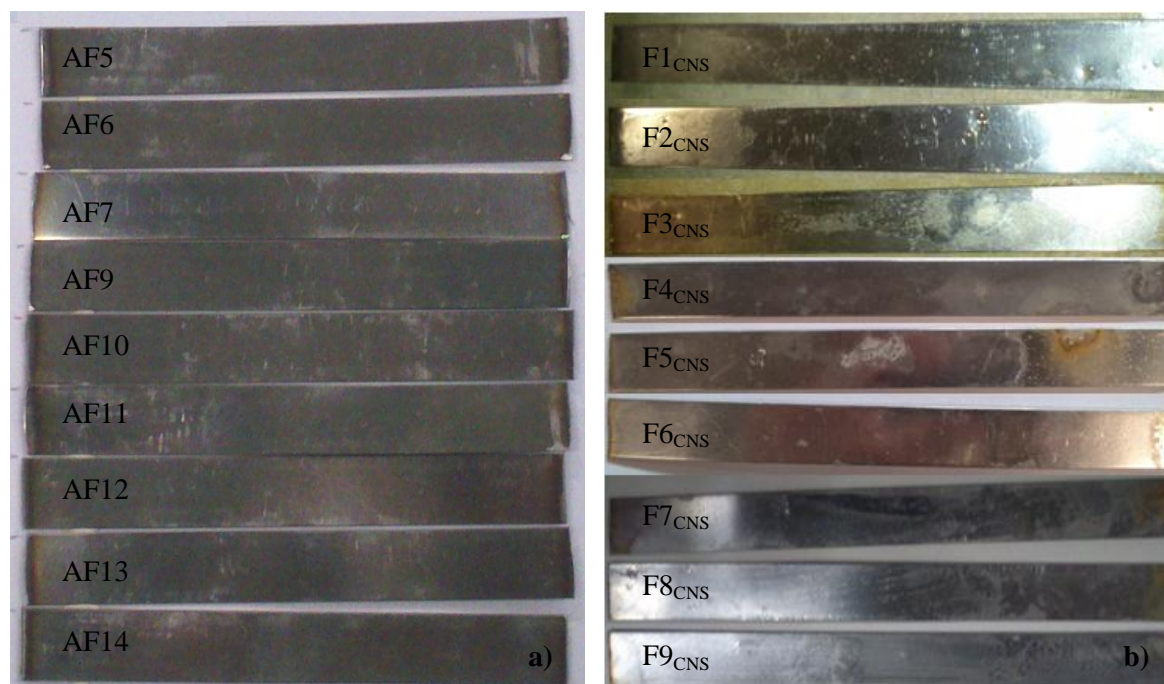


Figura 5. 14 - Aspeto da argamassa em contato com a fita metálica após 120 dias de ensaio de cloretos na câmara de nevoeiro salino

Na Figura 5. 15 apresentam-se as fitas metálicas após 30, 60 e 120 dias no interior da câmara de nevoeiro salino. Para diferenciar os provetes, utiliza-se a designação AF para as fitas que durante o ensaio estiveram envolvidas em argamassa, e F para as fitas que não estiveram envolvidas em argamassa.

Por meio da Figura 5. 15 a), pode-se observar que independentemente do número de dias, as fitas do tipo AF não apresentam nenhum sinal visível de oxidação apesar da argamassa se manter húmida ao longo de todo o ensaio, o que indica que mesmo em contacto com níveis elevados de humidade não se dá início a fenómenos de corrosão por picadas [27].

No caso das fitas metálicas do tipo F, Figura 5. 15 b), que estiveram no interior da câmara durante 60 dias e 120 dias apresentam alguns sinais de corrosão. No provete F5_{CNS} é visível uma mancha de oxidação na face que ficou virada para cima durante todo o ensaio de resistência aos cloretos, o que implica que a mancha se deve à estagnação da água nesta zona não sendo assim provocada pela presença de cloretos. Nos provetes F4_{CNS}, F6_{CNS}, F7_{CNS} e F8_{CNS} são visíveis pequenas manchas de oxidação nas extremidades das fitas, pois quando estas são cortadas, a camada de níquel e crómio (como foi visto por análises de FRX na Tabela 4.3 e no espectro de difração na Figura 4.18) que cobre a superfície da fita e que a protege da corrosão é danificada, promovendo a oxidação, quando em contacto direto com o CO₂ e/ou com a água.



AF5; AF6; AF7; F1_{CNS}; F2_{CNS}; F3_{CNS} - 30 dias

AF8; AF9; AF10; F4_{CNS}; F5_{CNS}; F6_{CNS} - 60 dias

AF11; AF12; AF13; AF14; F7_{CNS}; F8_{CNS}; F9_{CNS} - 120 dias

a) fitas rodeadas por argamassa; b) fitas não rodeadas por argamassa

Figura 5. 15 - Aspetto das fitas metálicas após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino

Relativamente aos comprimentos das fitas metálicas após o ensaio de cloretos na câmara de nevoeiro salino, através de medição com uma craveira analógica, concluiu-se que estes não se alteraram. Pelo que os comprimentos finais das fitas metálicas, são iguais aos comprimentos iniciais que estão apresentados na Tabela I. 7 do Anexo I.

5.3. Ensaios mecânicos e químicos

Durante a fase experimental da presente dissertação foram realizados ensaios mecânicos e químicos, nas diferentes idades dos provetes de modo a poder acompanhar o esperado processo de degradação das fitas e aferir as possíveis condições de proteção que a argamassa possa proporcionar às mesmas. Retiraram as fitas para fazer ensaios à tração, análise DRX e observação por microscopia ótica. Relativamente à argamassa esta foi sujeita a análises DRX e SEM. Começa-se por expor os resultados obtidos pela observação em SEM e análise EDS, seguidos da análise DRX, da observação por microscopia ótica, e finalmente dos valores resultantes dos ensaios à tração feitos às fitas metálicas após ação de cloretos.

❖ **Análise Morfológica por Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM) e Espectroscopia por Difração de Energia de Raio-X (EDS)**

A microscopia eletrónica de varrimento (SEM) é uma técnica que, através de um microscópio eletrónico de varrimento, permite obter imagens de alta resolução da microestrutura dos materiais com ampliações até 30.000x. No SEM a área da amostra a ser observada é irradiada com um feixe de eletrões que varre a área selecionada, permitindo obter informações quer sobre a superfície da amostra em termos da topografia da superfície da estrutura cristalina, quer sobre a microestrutura do material em estudo. Este equipamento permitiu igualmente fazer a Espectroscopia de raios X por dispersão (EDS), possibilitando fazer uma microanálise elementar para caracterização química das amostras. Neste estudo utilizou-se um microscópio eletrónico do modelo *Zeiss, DSM 962*



Figura 5. 16 - Equipamento de microscopia electrónica de varrimento (SEM) e EDS

Fizeram-se análises SEM e EDS à amostra da argamassa de referência aos 232 dias após a amassadura (AR), às argamassas que sofreram ataque de cloretos na CC aos 60 dias de ensaio, e também às argamassas provenientes da CNS aos 60 e 120 dias. Devido a problemas no equipamento, não foi possível utilizar as técnicas de análise de SEM e EDS para observação e determinação da morfologia das fitas metálicas.

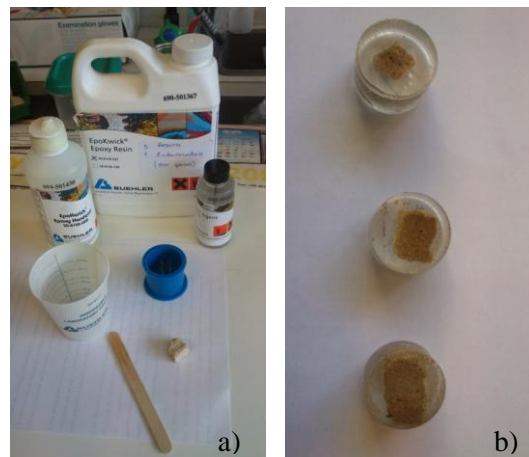
Para o caso das argamassas que sofreram ataque de cloretos retiraram-se amostras da zona de interface em contacto com a fita metálica, e no caso da argamassa sem fita metálica no seu interior, a amostra foi retirada do centro. Para a argamassa de referência a amostra foi retirada da zona do exterior. Estas foram então preparadas para a análise por SEM, onde utilizaram-se amostras polidas montadas em resina, e amostras não polidas, Figura 5. 17 b) e Figura 5. 18, respetivamente.

As amostras montadas em resina, foram montadas a frio num suporte de plástico, feitas com resina e endurecedor Epoxy, Buehler®, com a proporção de 5:1, Figura 5. 17 a). Após endurecerem durante um período de 24h desenformou-se e procedeu-se ao seu desgaste usando lixas de carboneto de silício (180, 320, 500, 1000, 2500 μm). No caso das amostras não polidas estas foram montadas num suporte

Avaliação da durabilidade de fitas metálicas embebidas em argamassa bastarda, sujeita a envelhecimento artificial

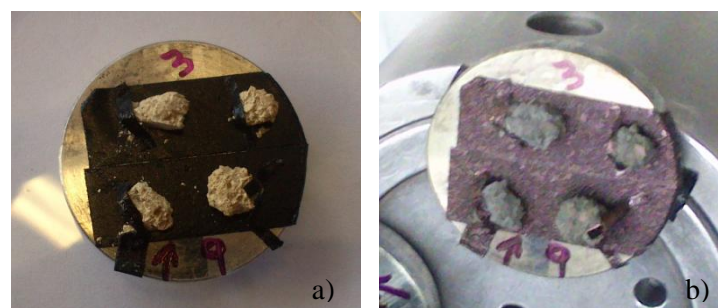
metálico previamente preparado com uma fita condutora, que também foi aplicada à amostra para incrementar a sua condutibilidade, Figura 5. 18 a).

Imediatamente antes do ensaio, as amostras foram cobertas com carbono através do equipamento Agar Sputter Coater durante 15 minutos, promovendo a condutibilidade de energia na amostra.



a) materiais utilizados para montar as amostras em resina; b) amostras depois de montadas em resina; c) amostras montadas em resina depois de polidas

Figura 5. 17 - Montagem das amostras de argamassa em resina para análise SEM



a) amostras com fita condutora; b) amostras após cobertura de carbono

Figura 5. 18 - Montagem das amostras de argamassa em suporte metálico para análise SEM

Em seguida apresentam-se as imagens SEM e análise EDS das amostras das argamassas dos provetes armados (A) e não armados (AR), após 60 dias na câmara de cloretos e após 60 e 120 na câmara de nevoeiro salino. Apresentam-se igualmente imagens SEM e análise EDS da amostra de argamassa de referência aos 232 dias após amassadura para fins de comparação.

Para uma análise puramente microestrutural através de imagem SEM, é suficiente uma ampliação até 500x. A análise morfológica dos produtos de hidratação e de corrosão é feita com uma maior ampliação chegando às 5000x. Ao mesmo tempo foram realizados mapeamentos em certos locais da

amostra, para análise da sua composição química e distribuição espacial dos iões, assim como de produtos de hidratação e de corrosão [55].

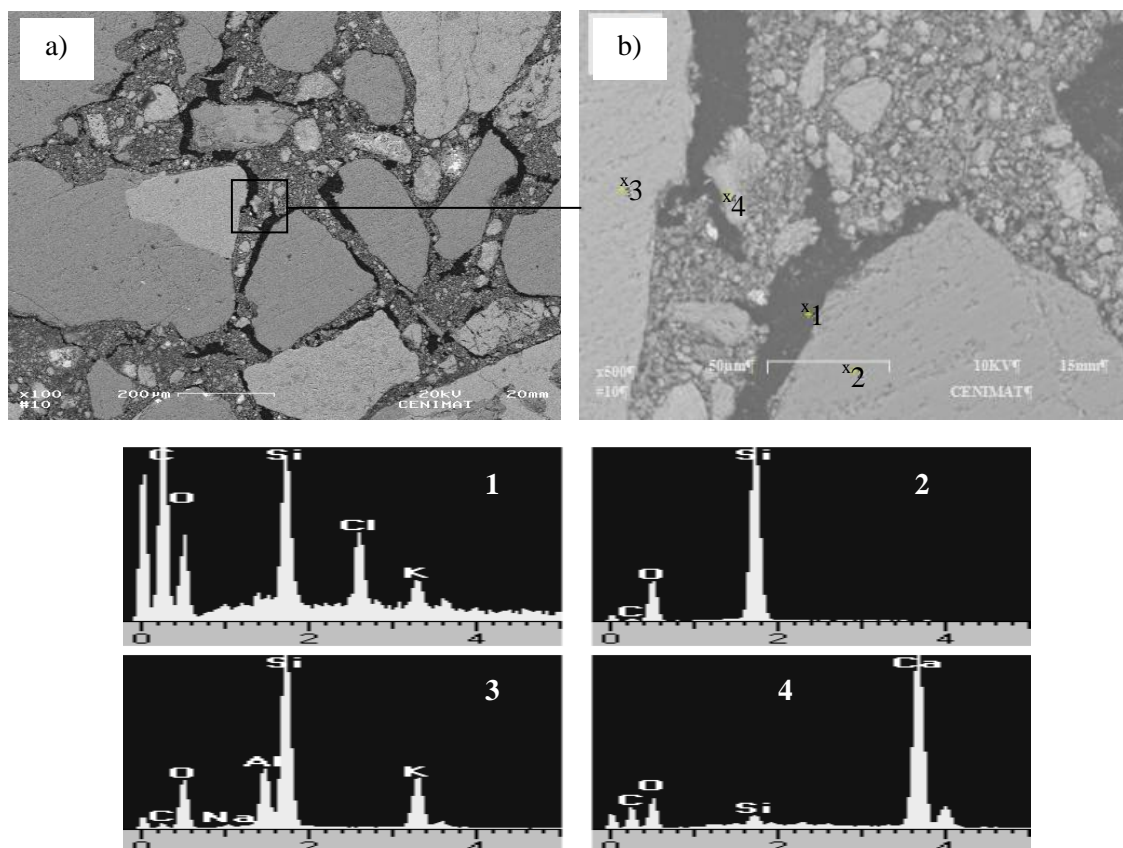


Figura 5. 19 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência 232 após amassadura (AR_232)

Na Figura 5. 19 a) observa-se a microestrutura da argamassa de referência, onde são visíveis a negro, a disposição e dimensão dos poros. Na Figura 5. 19 b) mostra-se uma imagem SEM com maior ampliação.

A análise EDS possibilitou identificar no ponto 1 carbono (C), devido à amostra ter sido coberta por carbono previamente a ser observada, e também algum cloro (Cl) possivelmente relacionado com a água adicionada durante a amassadura.

No ponto 2 detetou-se a presença de quartzo (SiO_2) proveniente das areias de rio e de areiro, como foi detetado por análise DRX cujos espectros de difração são apresentados na Figura 4.14 e Figura 4.15, respetivamente.

No ponto 4 observou-se a presença de calcite (CaCO_3) provenientes da cal aérea e cimento como foi detetado no difratómetro destas matérias-primas apresentados nas Figura 4.16 e Figura 4.17, respetivamente.

No mapeamento apresentado na Figura 5. 20 é possível observar a distribuição de ferro, do cloro, da sílica e do carbono na amostra.

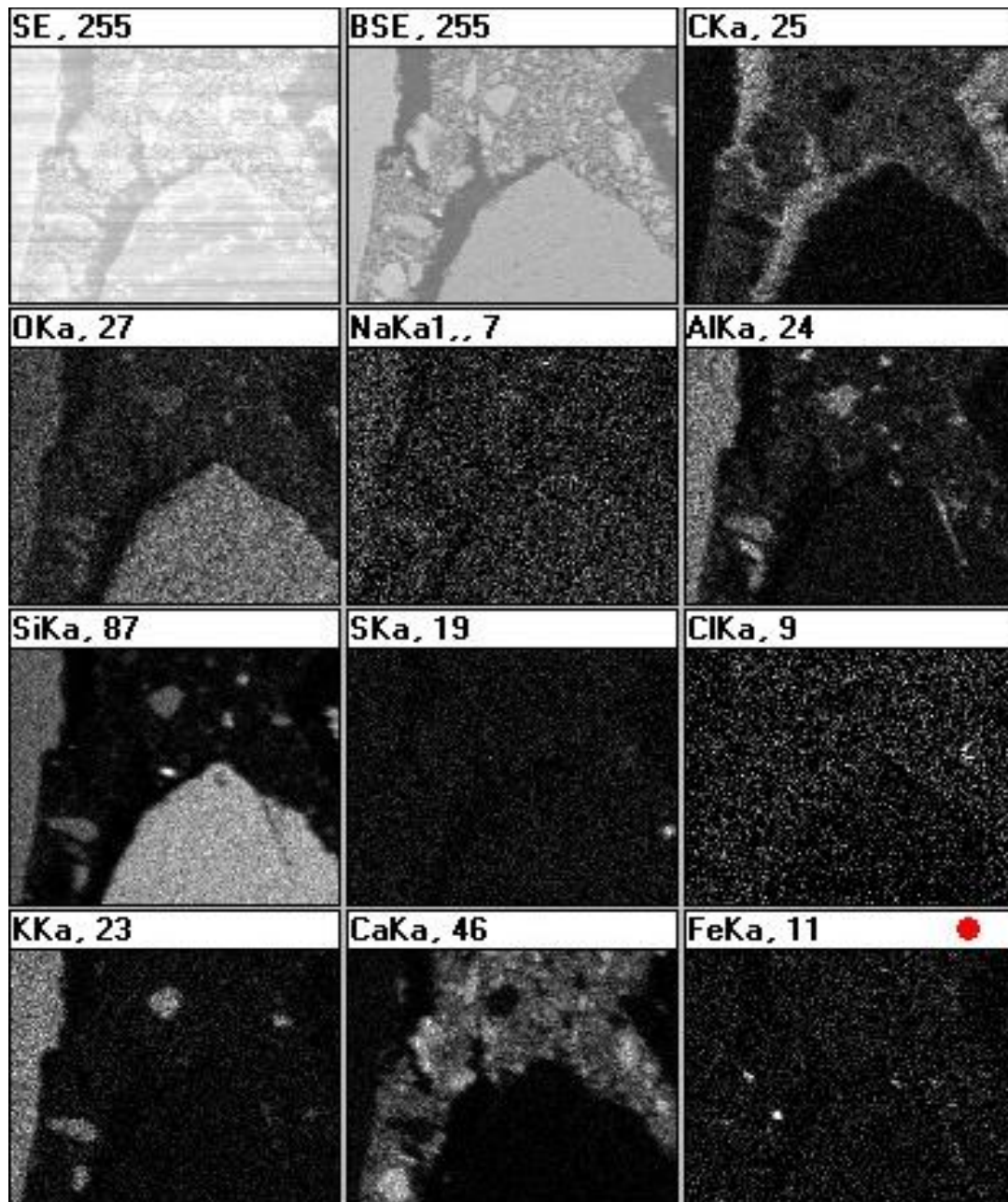


Figura 5. 20 - Mapeamento da argamassa de referência, 232 após amassadura (AR_232)

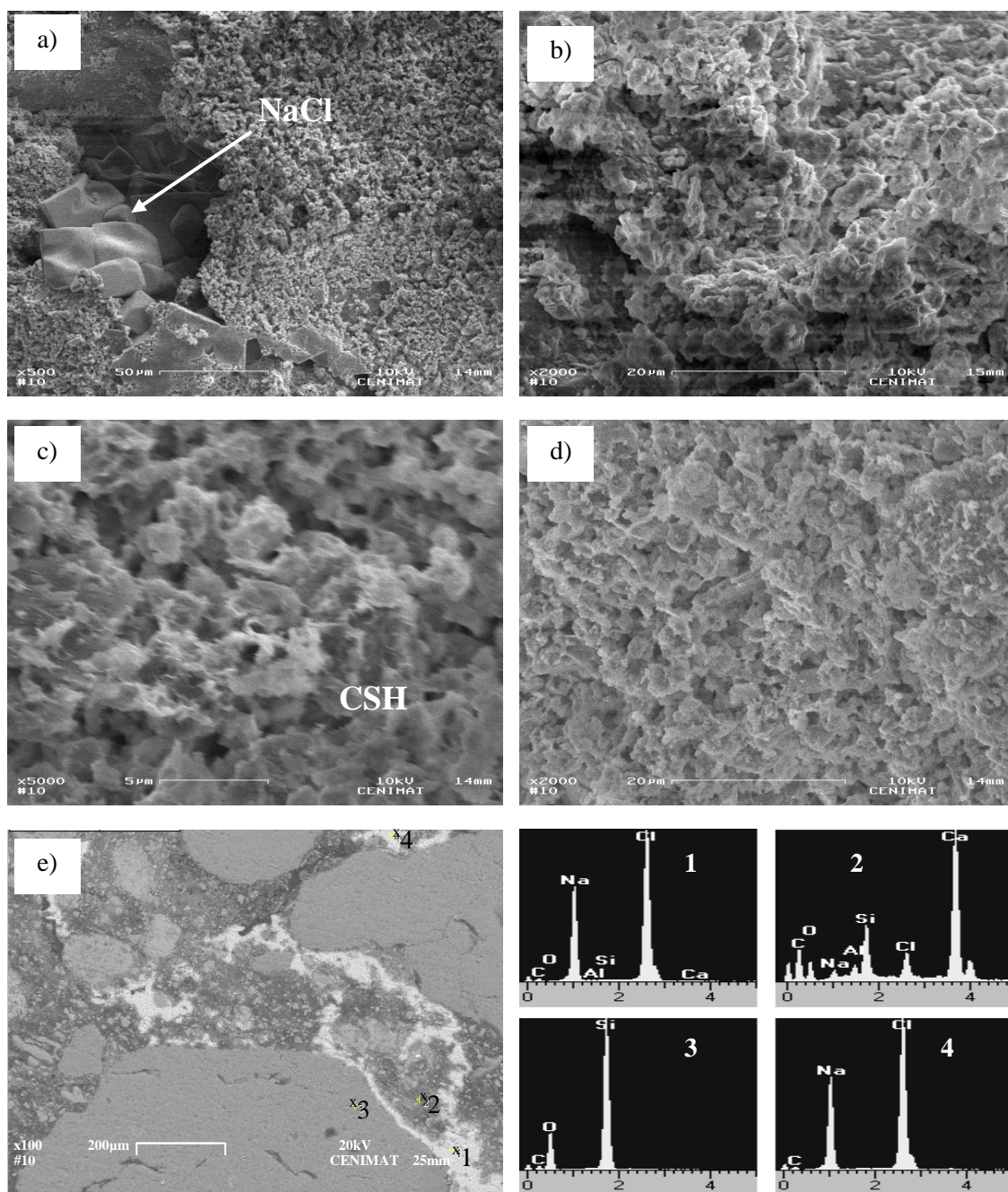


Figura 5. 21 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência após 60 dias na câmara de cloretos (AR_60_CC)

Em relação ao ingresso de cloretos, parte reage com a pasta da argamassa, enquanto o restante mantém-se livremente nos poros da mesma, podendo este último estar na origem de corrosões localizadas no aço [55]. Foi observado a presença de cloretos em forma de cristais de NaCl na argamassa junto à fita metálica, Figura 5. 21 a). Na Figura 5. 21 c) são visíveis a presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

A distribuição dos cristais de NaCl na amostra é exposta na Figura 5. 21 e) e Figura 5. 22, onde se nota que estes se concentram maioritariamente junto dos silicatos. Através da quantificação EDS foi

detetado no ponto 2 a presença de Al, Ca, Na e Cl o que sugere a possível formação de sal de Friedel devido ao ingresso dos cloretos. Sabe-se que quando os íões de NaCl entram em contato com o aluminato tricálcico livre, dá-se uma reação química que origina o sal de Friedel [54].

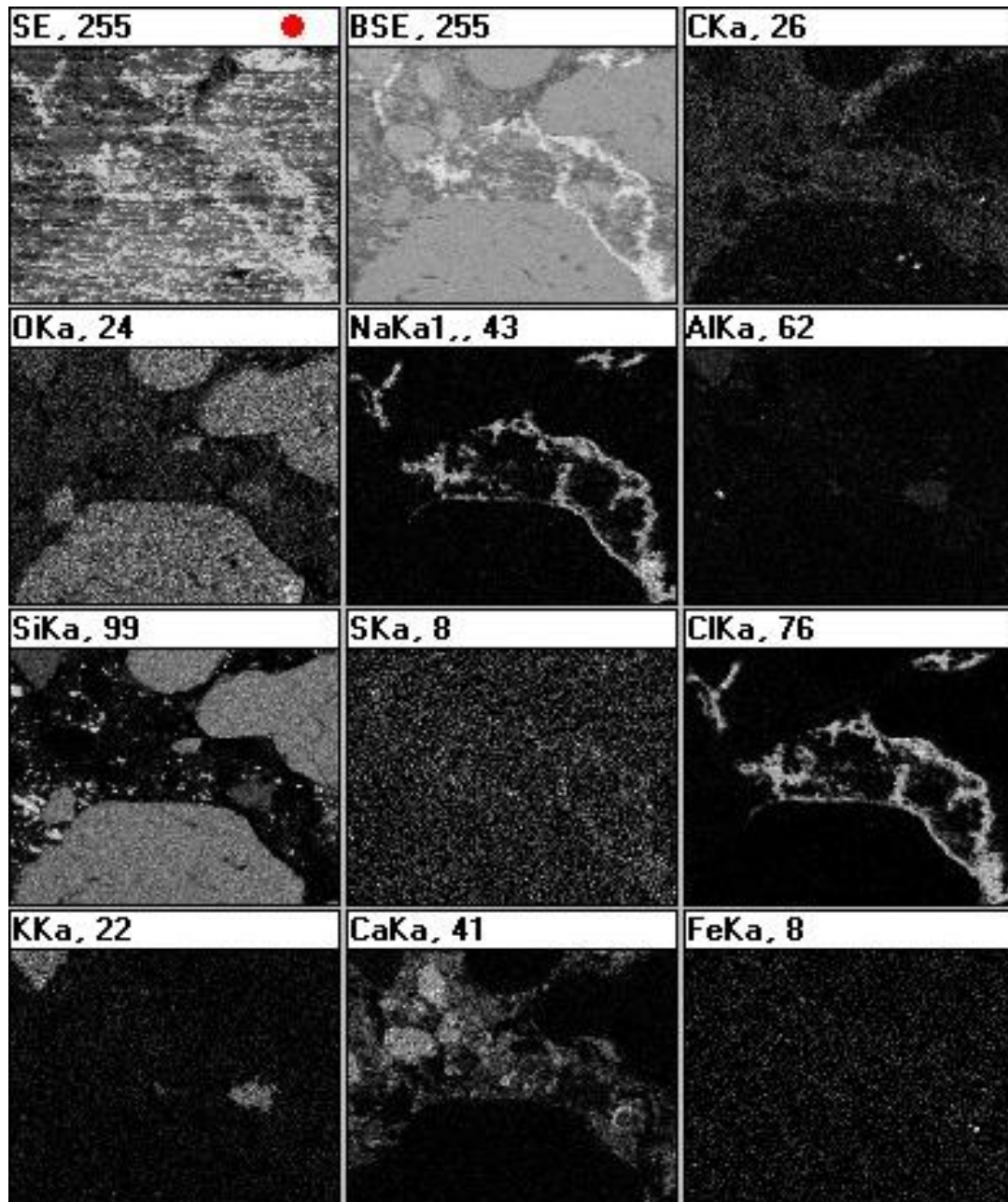


Figura 5. 22 - Mapeamento da argamassa após 60 dias na câmara de cloretos (AR_60_CC)

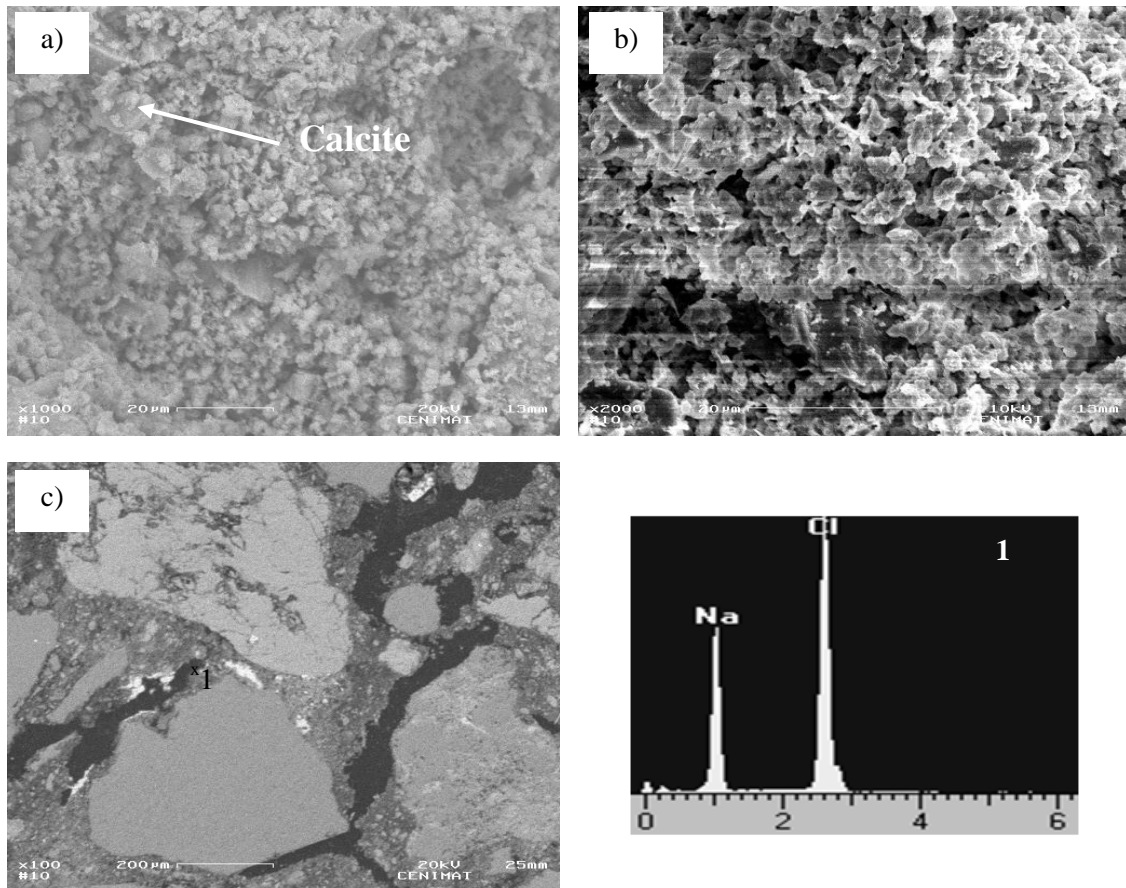


Figura 5. 23 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 60 dias na câmara de cloretos (A_60_CC)

Na Figura 5. 23 a) identificou-se a calcite proveniente do cimento e das areias. Na análise EDS constatou-se no ponto 1 a presença de NaCl, visível na Figura 5. 23 c).

A distribuição e dimensão dos poros, Figura 5. 23 c), revelam-se muito maiores quando comparados com a argamassa de referência que esteve em laboratório, exibida na Figura 5. 19 a). Isto acontece devido aos ciclos consecutivos de dissolução/cristalização dos cloretos a que a argamassa esteve sujeita durante o ensaio de cloretos, criando tensões internas no material e consequente perda de coesão.

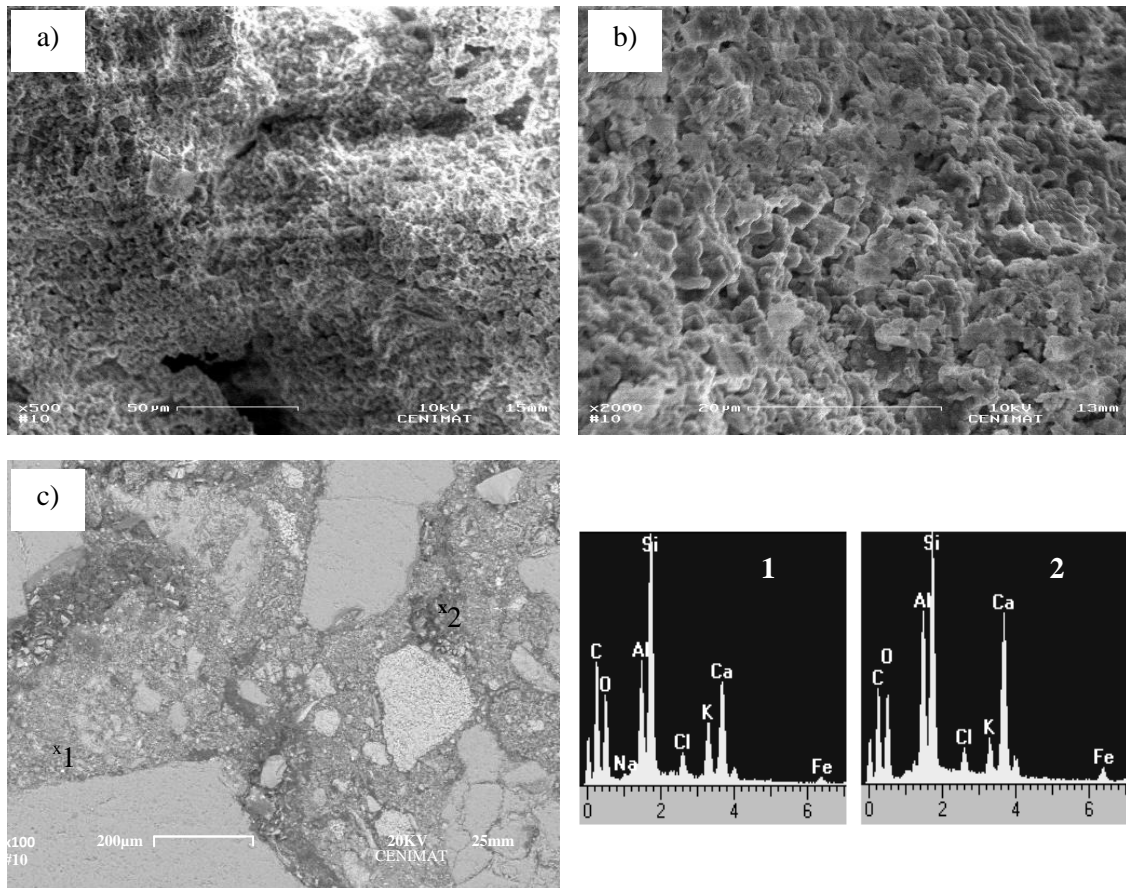


Figura 5. 24 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 60 dias na câmara de nevoeiro salino (A_60_CNS)

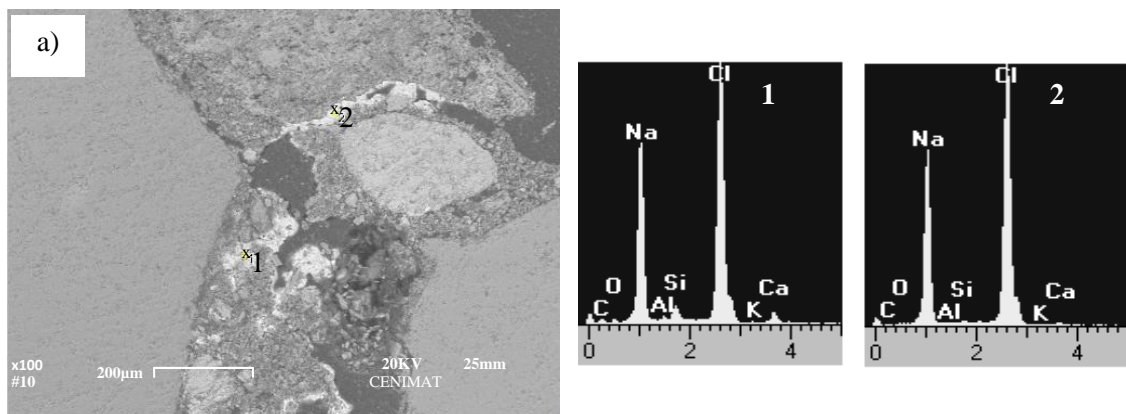


Figura 5. 25 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa em contacto com a fita metálica após 120 dias na câmara de nevoeiro salino (A_120_CNS)

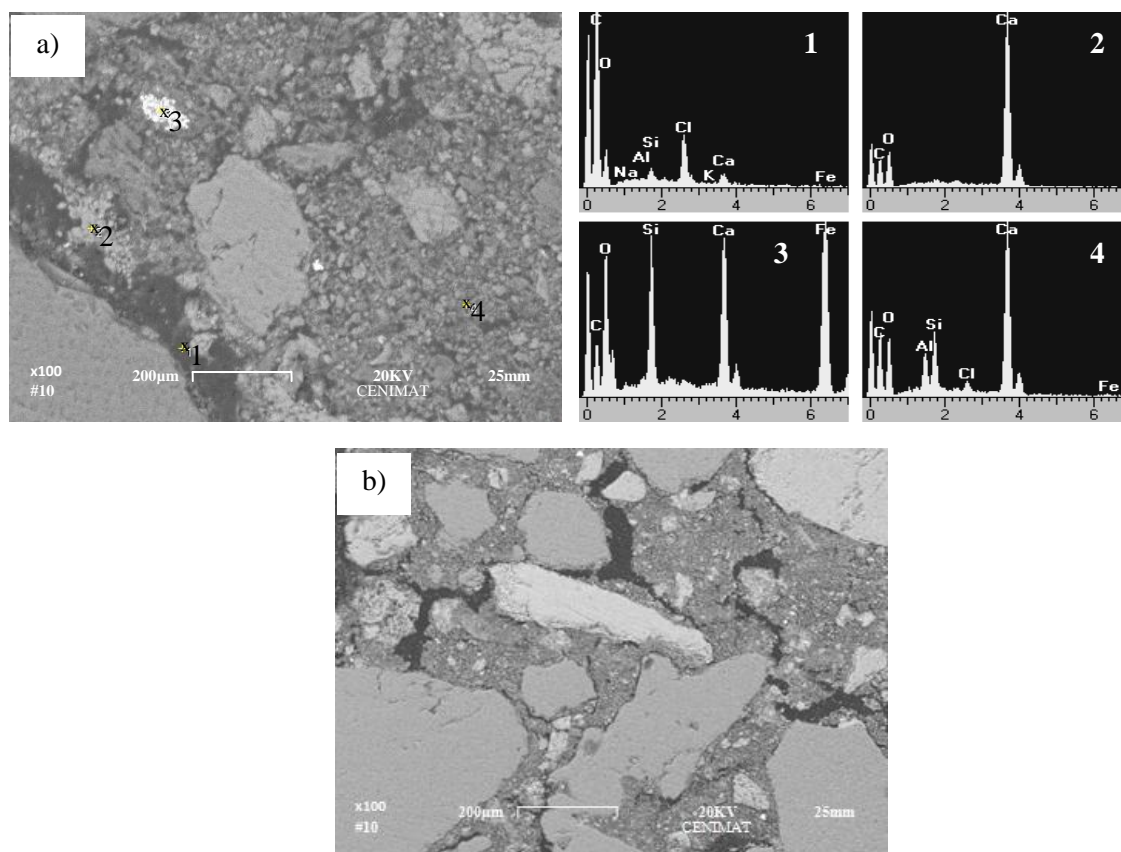


Figura 5. 26 - Imagens SEM e quantificação EDS da amostra de argamassa de referência após 120 dias na câmara de nevoeiro salino (AR_120_CNS)

Nas amostras das argamassas provenientes da câmara de nevoeiro salino, apresentadas nas Figura 5. 24, Figura 5. 25e Figura 5. 26 observa-se que as dimensões dos poros são um pouco maiores que os observados na amostra de referência guardada em laboratório, Figura 5. 19 a).

Na amostra A_120_CNS foi detetada presença de halite através de análise EDS, Figura 5. 25. Nas restantes amostras A_60_CNS e AR_120_CNS (Figura 5. 24 e Figura 5. 26, respetivamente), não foi possível detetar a presença de cristais de halite, talvez devido a estes se encontrarem diluídos no momento em que as amostras foram observadas.

Na amostra AR_120_CNS, Figura 5. 26 a), através da análise EDS foi possível detetar a presença de ferro (Fe) no ponto 3. Este deve-se à contribuição do cimento, como se pode ver no difractograma apresentado na Figura 4.17.

Em suma na argamassa de referência AR_232, foram detetados do quartzo (SiO_2) presente nas areias e calcite (CaCO_3) originada no cimento. Nas argamassas provenientes da câmara de cloretos, para além do quartzo e calcite, detetou-se cloreto de sódio (NaCl). Observou-se também a possível presença de cristais de Friedel e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) na amostra AR_60_CC, proveniente da

hidratação da argamassa. Relativamente às argamassas provenientes da câmara de nevoeiro salino, detetou-se a presença de NaCl apenas na amostra A_120_CNS.

❖ **Análise Mineralógica por Difração de Raios-X**

O procedimento para este ensaio já foi explicado na secção 4.3.4. Para além das possibilidades que esta técnica oferece, mencionadas anteriormente no que diz respeito às fitas metálicas, permite ainda detetar a existência de corrosão por picadas com diâmetro superior a 1 µm. Na Tabela 5. 4 apresentam-se as principais fases cristalinas identificadas nas amostras das argamassas analisadas.

Tabela 5. 4 - Principais fases cristalinas detetadas nas amostras de argamassa após ataque de cloretos

Composto	Fórmula	Notação	Ficha nº
Quatzo	SiO ₂	Q	046-1045 [50]
Calcite	CaCO ₃	C	005-0586 [43]
Sulfato de ferro hidratado	Fe ₂ S ₂ O ₉ ·xH ₂ O/Fe ₂ O ₃ ·2SO ₃ ·xH ₂ O	I	021-0928 [46]
Halite	NaCl	A	005-0628 [44]

De seguida apresentam-se os espectros de DRX das seguintes amostras da argamassa:

- de referência aos 232 dias de idade após a amassadura, Figura 5. 27;
- após 30 e 60 dias na câmara de cloreto, Figura 5. 28;
- após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino, Figura 5. 29.

Para diferenciar as argamassas utiliza-se a designação A para as argamassas que estiveram em contacto com as fitas metálicas relativas aos provetes armados, e AR para as que não estiveram em contacto com as fitas, ou seja, provetes não armados.

No caso dos provetes armados as amostras das argamassas foram retiradas da zona de interface entre a argamassa e a fita metálica.

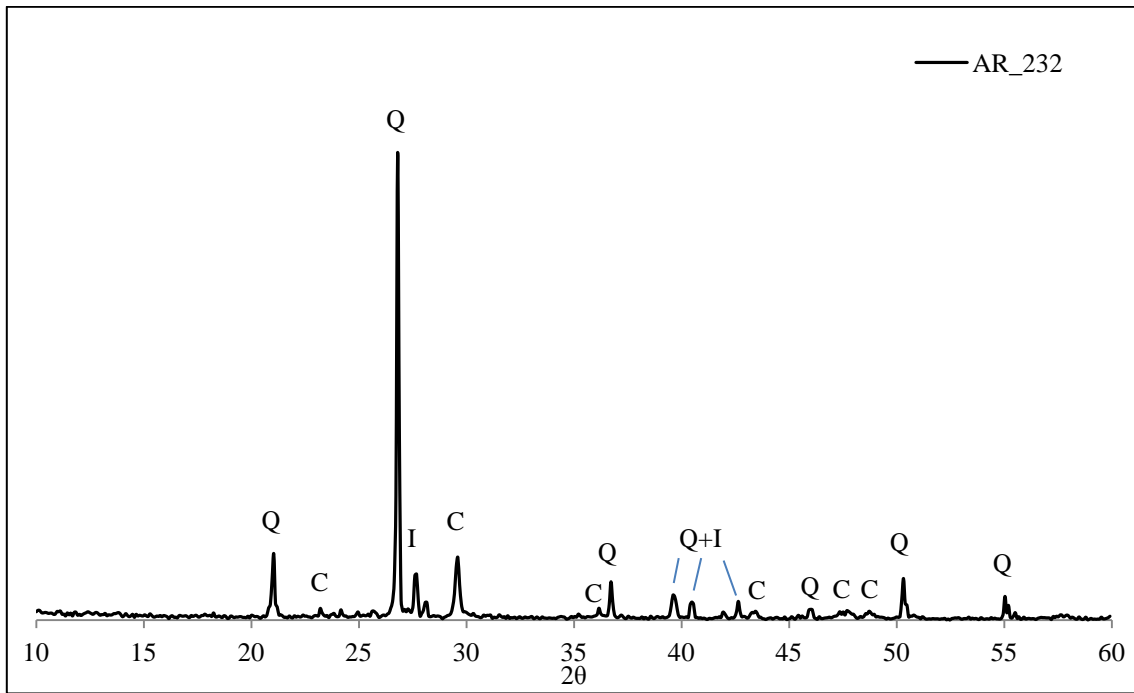


Figura 5. 27 - Espectro de DRX da argamassa de referência aos 232 dias

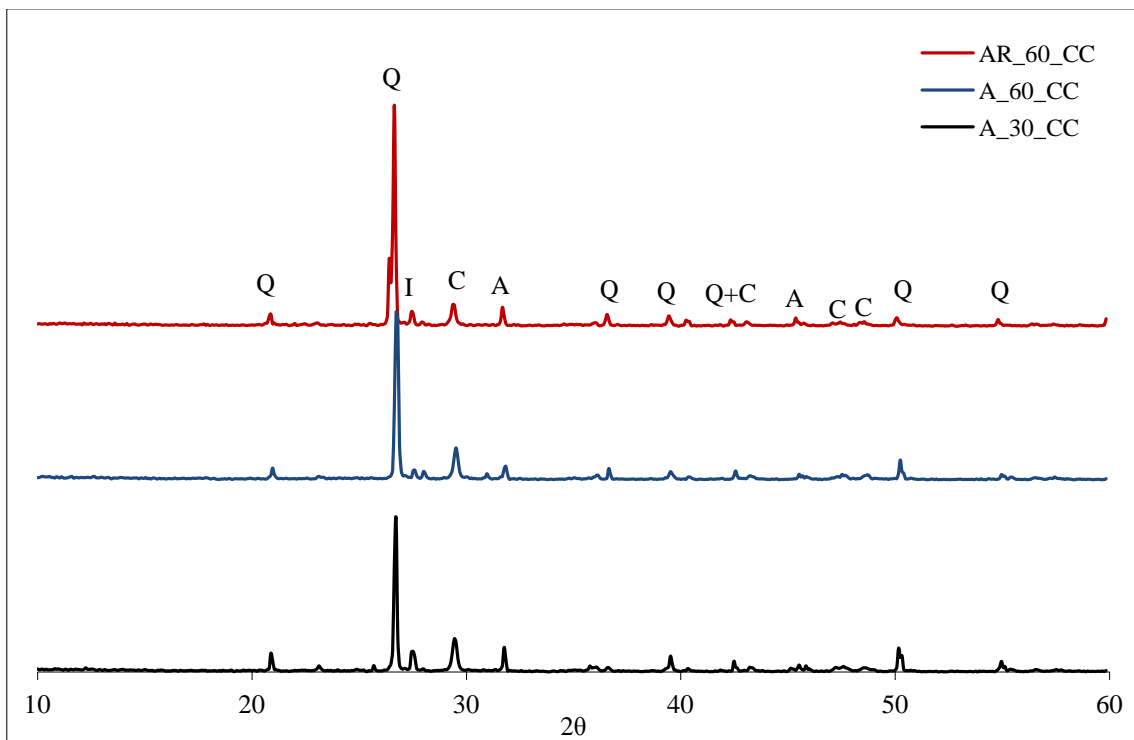


Figura 5. 28 - Espectro de DRX das argamassas após 30 e 60 dias no interior da câmara de cloretos

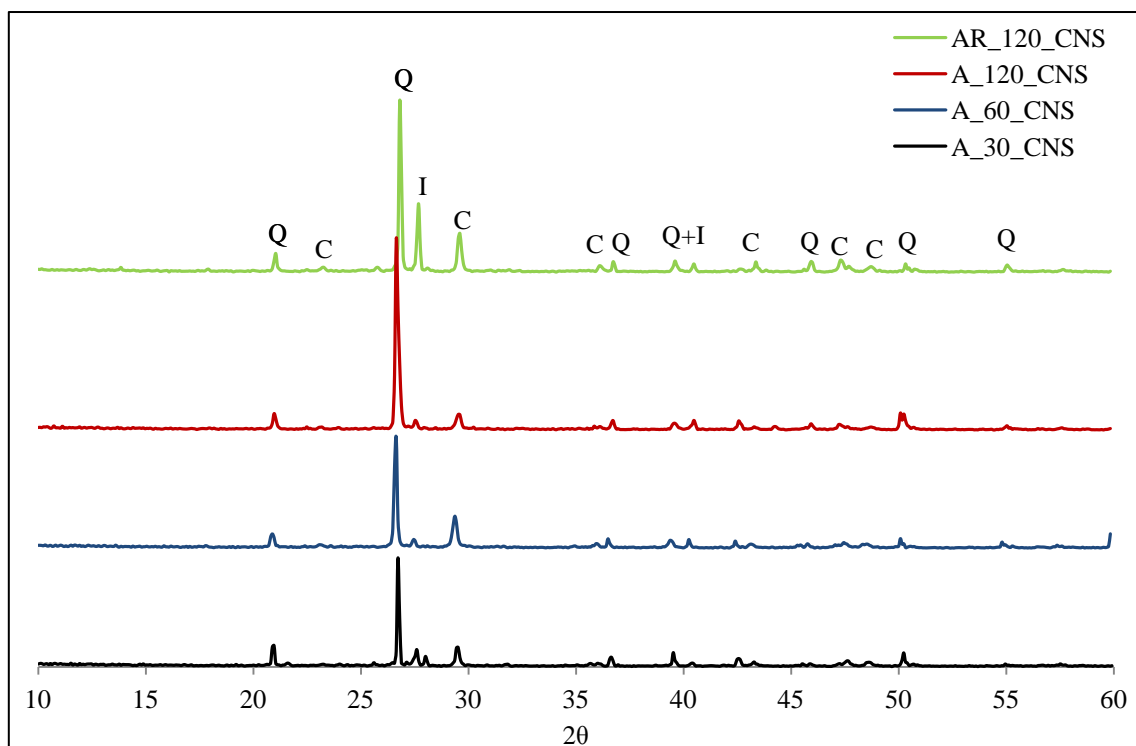


Figura 5. 29 - Espectro de DRX das argamassas após 30, 60 e 120 dias no interior da câmara de nevoeiro salino

Analisando os espectros de DRX das argamassas apresentados nas Figura 5. 28 e Figura 5. 29, podemos constatar que as principais fases cristalinas presentes são o quartzo (SiO_2) e a calcite (CaCO_3) devido à presença das areias e do cimento na argamassa, e como se pode observar na Figura 5. 23 a) e no do ponto 2 Figura 5. 19 b). Observou-se ainda a presença sulfato de ferro hidratado (I) proveniente do cimento (como se pode observar na análise FRX na Tabela 4.2), que está relacionado com a hidratação deste material.

Na Figura 5. 28, que representa os espectros DRX referente às amostras de argamassa provenientes da câmara de cloretos, é possível encontrar em todas as amostras uma outra fase cristalina devido à presença de cloretos de sódio (NaCl). O mesmo foi observado por análise SEM na argamassa AR_60_CC - Figura 5. 21 a) - e por análise EDS na argamassa AR_60_CC e A_60 _CC, Figura 5. 22 e Figura 5. 23, respetivamente.

Nos espectros das amostras de argamassa provenientes da câmara de nevoeiro salino, Figura 5. 29, não foram detetados a presença de cloretos em todas as argamassas. O mesmo foi observado na argamassa de referência (AR_120_CNS) por análise EDS, apresentado na Figura 5. 26. Contudo, detetaram-se cloretos na argamassa junto à fita (A_120_CNS), como se pode ver na análise EDS apresentada na Figura 5. 25.

O facto de ser possível encontrar evidências de NaCl nas argamassas provenientes da câmara de cloretos, deve-se a que neste caso as argamassas estiveram expostas a ciclos de humidade/secagem onde na fase húmida a HR é de 90% pelo que os cristais de NaCl estão hidratados, mas na fase seca a HR baixa para os 40% permitindo que haja a cristalização do cloreto, sendo por isso detetáveis na análise DRX.

No caso das argamassas provenientes das câmaras de nevoeiro salino, como já foi mencionado anteriormente, não foi possível aferir a HR no interior da câmara, mas observou-se que os provetes de argamassa permaneceram húmidos durante todo o ciclo pelo que os cloretos estavam constantemente na fase hidratada, ou seja dissolvidos, e por isso não são visíveis na análise DRX.

Em resumo as fases cristalinas detetadas em todas as argamassas foram o dióxido de sílica (SiO_2) em forma de quartzo, o carbonato de cálcio (CaCO_3) em forma de calcite e sulfato de ferro hidratado. Nas argamassas provenientes da câmara de cloretos, também se detetou a presença de NaCl na forma de halite.

De seguida apresentam-se os espectros de DRX das amostras das fitas metálicas:

- após 30 e 60 dias na câmara de cloretos, Figura 5. 30;
- após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino, Figura 5. 31.

Para diferenciar as fitas utiliza-se que a designação AF para as fitas no interior dos provetes de argamassa armada e F para as fitas não envolvidas em argamassa. Na Tabela 5. 5 apresentam-se a principal fase cristalina identificada nas amostras das fitas.

Tabela 5. 5 - Principais fases cristalinas detetadas nas amostras das fitas metálicas após ataque de cloretos

Composto	Fórmula	Notação	Ficha
Crómio ferro níquel	$\text{Cr}_{0.19}\text{Fe}_{0.7}\text{Ni}_{0.11}$	R	33-0397 [48]

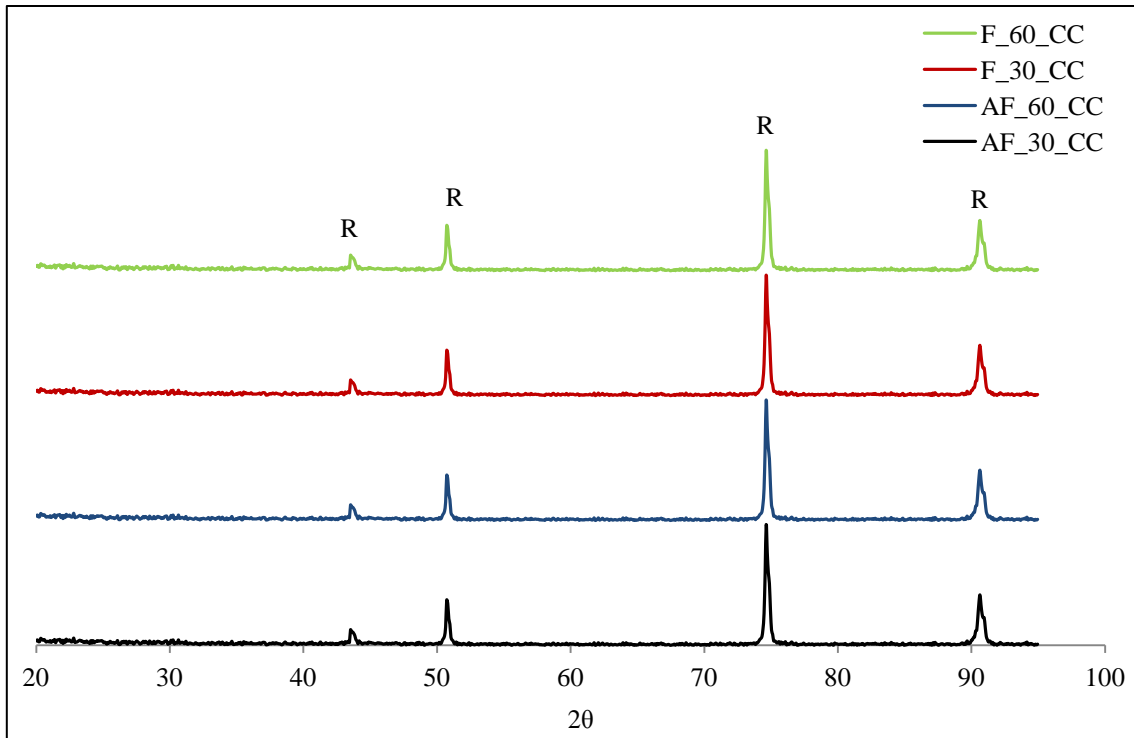


Figura 5. 30 - Espectro de DRX das fitas metálicas após 30 e 60 dias no interior da câmara de cloretos

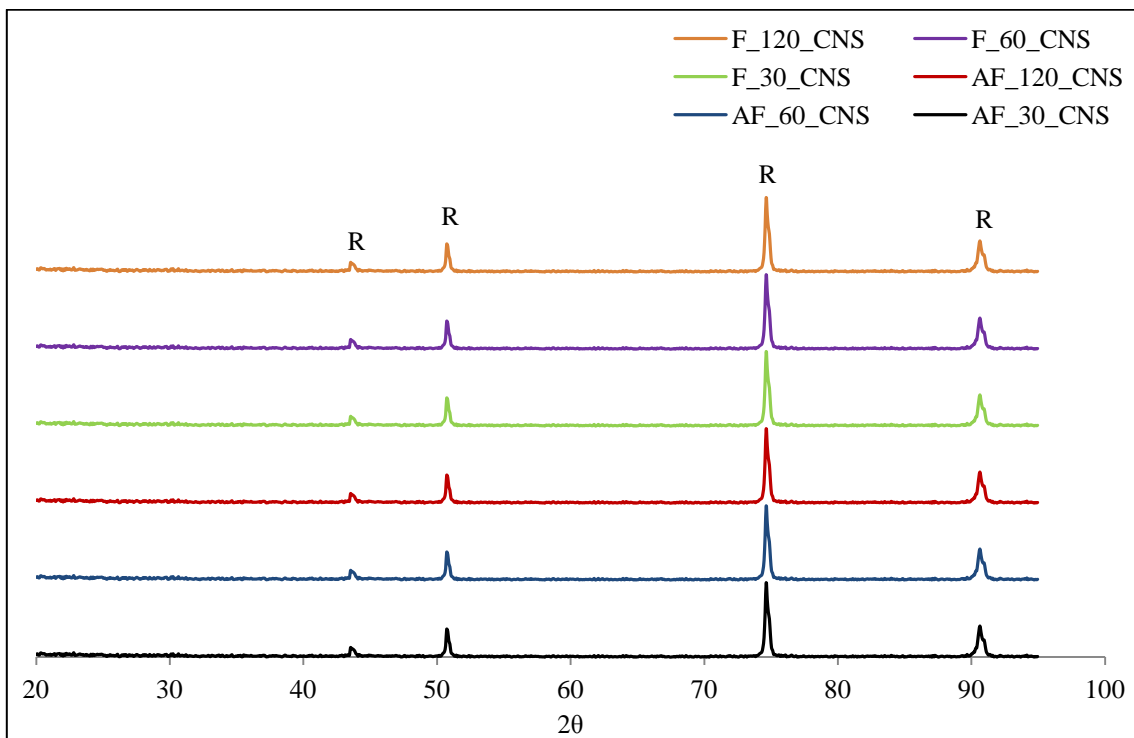


Figura 5. 31 - Espectro de DRX das fitas metálicas após 30, 60 e 120 dias no interior da câmara de nevoeiro salino

Observando os espectros de DRX das fitas provenientes da câmara de cloretos, Figura 5. 30, nas amostras AF_30_CC e AF_60_CC não se notam alterações nas fases cristalinas, acontecendo o mesmo nas fitas F_30_CC e F_60_CC. O mesmo panorama repete-se para as fitas provenientes da câmara de nevoeiro salino, Figura 5. 31, não havendo alteração nas fases cristalinas do aço ao longo de 30, 60 e 120 dias. Observou-se ainda que não foi detetado a presença de NaCl em nenhuma amostra provenientes de ambas as câmaras.

Comparando os espectros das fitas metálicas após ensaio de cloretos, com o espectro da fita metálica de referência que permaneceu em condições normais de laboratório, apresentado na secção 4.3.4, os espectros de difração das fitas metálicas após o ensaio de cloretos, revelam-se semelhantes ao da fita de referência, indicando que não houve qualquer mudança nas fases cristalinas deste material na decorrência do ensaio de cloretos, o que indica que não se detetou a existência de corrosão. No estudo de D.A. Koleva *et al* [55], foi detetada a presença de halite e carbonato de sílica hidratado (C-S-H) depositado na superfície dos fios, o que não foi detetado nas fitas metálicas.

Nas superfícies das fitas metálicas analisadas, apenas foi detetada uma fase cristalina correspondente ao cromo ferro níquel, mantendo-se ao longo do ensaio. O que evidencia que não houve modificações no estado da camada superficial da fita metálica, mantendo-se passiva.

❖ Microscopia ótica

O microscópio ótico é um equipamento que permite analisar, com uma série de lentes multicoloridas e ultravioleta, capazes de descortinar através da luz, estruturas cujas medidas se encontram abaixo de 0,1mm, logo impossíveis de visualizar a olho nu [107].

Observaram-se as superfícies das fitas metálicas antes e depois de sofrerem o ataque dos cloretos, com o objetivo de aferir a existência de uma possível oxidação e analisar a sua evolução ao longo do ensaio. Passa-se a apresentar as imagens referentes às superfícies das fitas metálicas, observadas por microscopia ótica e com a resolução de 500x. Normalmente esta técnica é utilizada com a amostra polida, mas este processo iria danificar a camada passiva da superfície da fita. Contudo decidiu-se fazer esta análise para fins de comparação com trabalhos futuros.

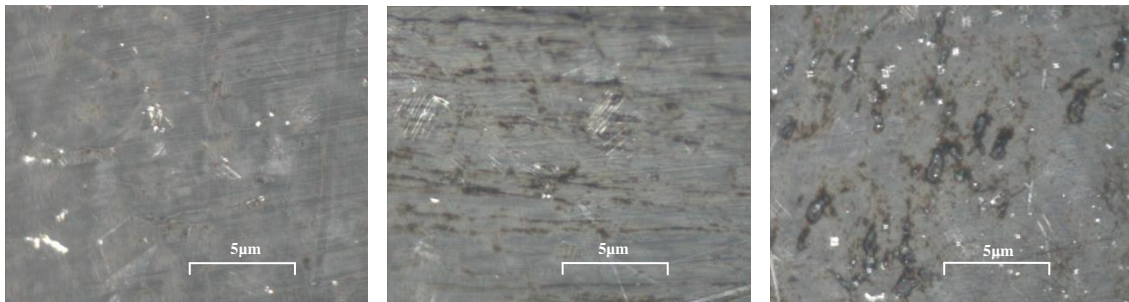


Figura 5. 32 – Aspetto da superfície da fita metálica de referência sujeita às condições normais de laboratório

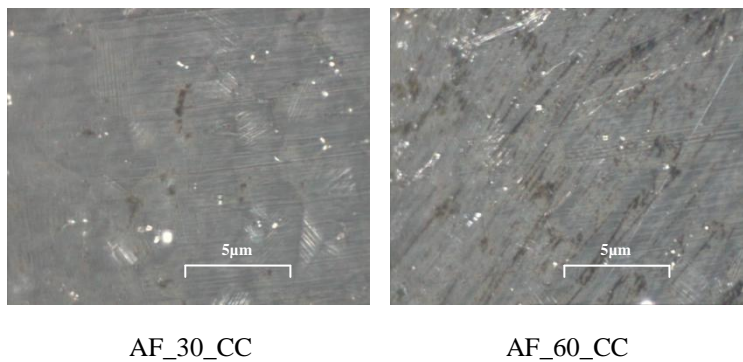


Figura 5. 33 - Aspetto das superfícies das fitas metálicas proveniente dos provetes armados (AF),após 30 e 60 dias na câmara de cloretos

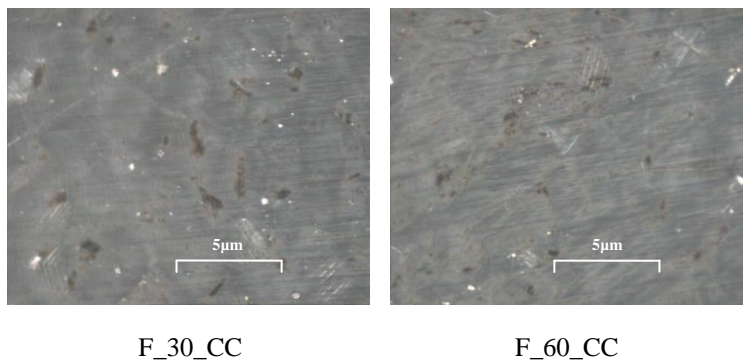


Figura 5. 34 - Aspetto das superfícies das fitas metálicas não envolvidas em argamassa (F) ,após 30 e 60 dias na câmara de cloretos

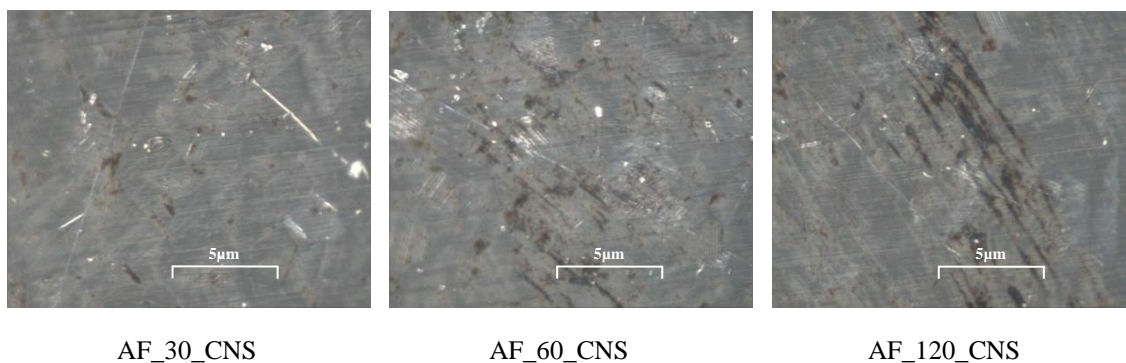


Figura 5. 35 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas proveniente dos provetes armados (AF), após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino

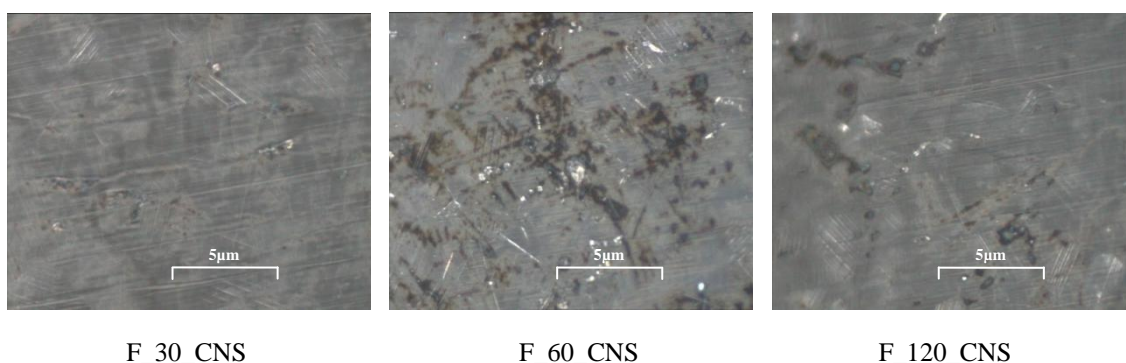


Figura 5. 36 - Aspeto das superfícies das fitas metálicas não envolvidas em argamassa (F) ,após 30, 60 e 120 dias na câmara de nevoeiro salino

Através da Figura 5. 32, nota-se diferentes orientações de laminagem na camada superficial do metal devido ao processo de fabrico, referido na secção 2.2.

Observando as amostras provenientes da câmara de cloretos do tipo F e AF - Figura 5. 33 e Figura 5. 34, e comparando-as com as fitas de referência - Figura 5. 32, nota-se que estas mostram não ter existido alterações no aspeto da camada superficial da fita ao longo do ensaio, como também se observou no difractograma apresentado na Figura 5. 30.

Com a ampliação proporcionada pelo microscópio ótico, talvez devido a pequenos riscos nas superfícies das fitas,

Relativamente às amostras AF_120_CNS - Figura 5. 35, e a amostra F_60_CNS - Figura 5. 36, é possível observar a presença de alguns padrões de manchas mais escuras na superfície das fitas que levantam a possibilidade de ter havido alguma corrosão, que não foi detetado na difração por raio-X, como se pode constatar na Figura 5. 30. e Figura 5. 31. Contudo as manchas mantêm-se estáveis ao

longo do ensaio, mostrando que a camada de cromo e níquel que protege a fita de oxidar parece continuar estável e passiva.

Como tal, a técnica de EDS revela-se muito útil para poder comparar com trabalhos futuros, relativamente à deteção de possíveis corrosões.

❖ Ensaio de tração às fitas metálicas

O ensaio de tração foi realizado como indicado na secção 4.3.5. Ensaio de tração às fitas metálicas, respeitando a norma ISO 6892, no laboratório de ensaios de tração do DEC recorrendo ao equipamento ZWICK Z050, tendo o tratamento dos dados sido processado no computador anexo ao equipamento através do programa TestXpert v12.1 da Zwick Roell, Figura 4.20. Os parâmetros utilizados no ensaio foram de 5 mm/min para a velocidade e 23,5 mm de distância entre pratos.

Os resultados médios das forças à tração máximas obtidas, estão presentes na Tabela 5. 6 e na Figura 5. 37. Nas Tabela I. 23 e Tabela I. 24 do Anexo I são apresentados os resultados individuais e desvios padrão.

Tabela 5. 6 - Resistências à tração das fitas metálicas após ataque dos cloretos

Ambiente	Dias/Ciclos	Provete	Força última média [KN]
Câmara de cloretos (CC)	30	F_30_CC	6,68
		AF_30_CC	6,70
	60	F_60_CC	6,49
		AF_60_CC	6,90
Câmara de nevoeiro salino (CNS)	30	F_30_CNS	6,62
		AF_30_CNS	6,60
	60	F_60_CNS	6,72
		AF_60_CNS	6,61
	120	F_120_CNS	6,54
		AF_120_CNS	6,53

F – Fitas metálicas sem argamassa; AF – Fitas metálicas no interior da argamassa

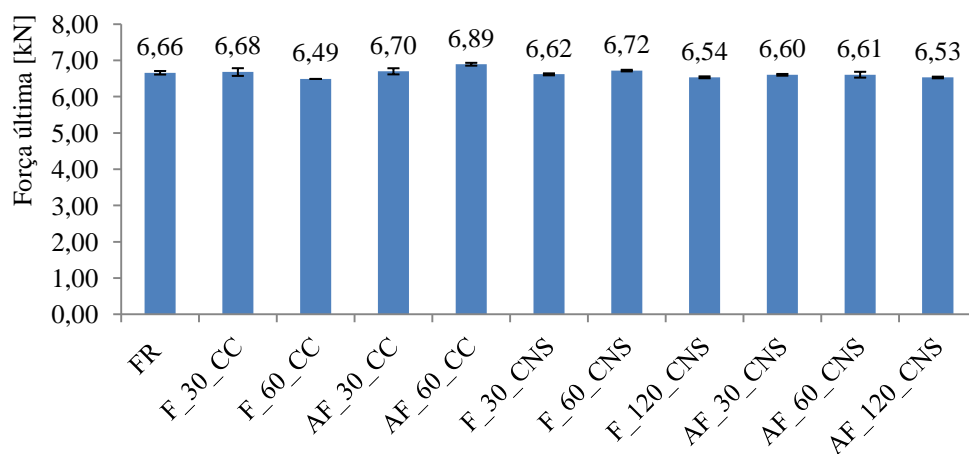


Figura 5. 37 - Resistências à tração das fitas metálicas após ensaio de cloretos

Observando a Tabela 5. 6 e a Figura 5. 37, os valores da força última média das fitas provenientes da câmara de cloretos e da câmara de nevoeiro salino, não manifestam diferenças consideráveis. As fitas do tipo AF retiradas aos 30 e aos 60 dias - AF_30_CC e AF_30_CNS, AF_60_CC e AF_60_CNS – revelam valores de força última média semelhantes em ambas as câmaras. O mesmo foi constatado para as fitas do tipo F, retiradas em simultâneo das duas câmaras. Relativamente às fitas do tipo AF e F, após 120 dias na câmara de nevoeiro salino, estas exibem valores de força última média comparáveis. De notar ainda que não se detetaram diferenças notáveis nos valores obtidos para as forças últimas médias, entre as fitas sujeitas a ataque de cloretos, e a fita de referência (FR).

Nas Figura 5. 38 e Figura 5. 39 mostra-se os valores da força última obtidos para as fitas metálicas após ataque de cloretos, assim como o valor médio determinado para as fitas de referência (secção 4.3.5), referidas aqui como FR.

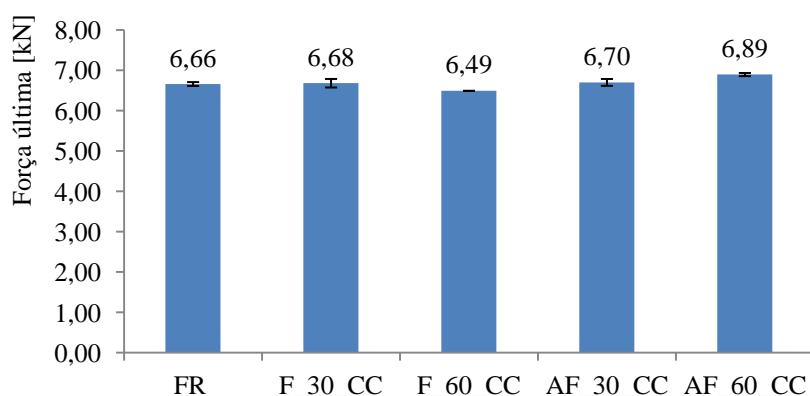


Figura 5. 38 – Comparação da resistências à tração de referência, com os valores obtidos nas fitas metálicas provenientes da câmara de cloretos, com a fita de referência

Analisando a Figura 5. 38, as fitas retiradas da câmara de cloretos aos 30 dias (F_30_CC e AF_30_CC) e aos 60 dias (F_60_CC e AF_60_CC), mostram valores de força última semelhantes

Comparando a resistência à tração das fitas AF com as do tipo F, retiradas em simultâneo, observou-se que os valores da força última são análogos. As fitas ensaiadas, mostram valores de força última médios entre 6,68 e 6,90 kN, sendo comparáveis a 6,66kN, valor médio da fita de referência (RF).

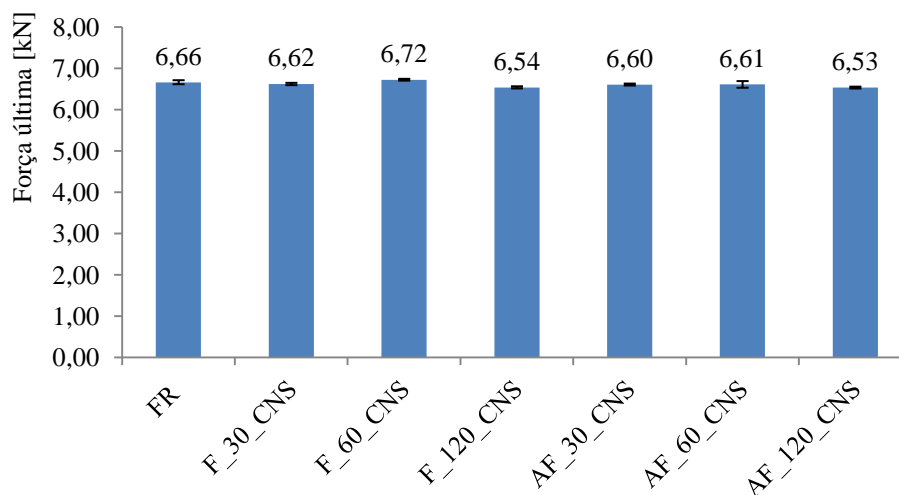


Figura 5. 39 - Comparação da resistências à tração de referência, com os valores obtidos nas fitas metálicas provenientes da câmara de nevoeiro salino

Analisando a Figura 5. 39, observa-se que as fitas retiradas da câmara de nevoeiro salino aos 30, aos 60 e aos 120 dias, revelam valores de força última média semelhantes. As fitas do tipo AF mostram valores análogos às fitas do tipo F, ao longo do ensaio. As fitas exibem valores de força última média entre 6,53 e 6,72 kN, confrontáveis com o valor médio de força última encontrado para a fita de referência de 6,66 kN.

Em síntese as fitas metálicas ensaiadas exibem valores próximos da fita de referência, demonstrando que ao longo do tempo de ensaio não houve diminuição na resistência mecânica deste material.

6. CONCLUSÕES

6.1. Considerações iniciais

No presente estudo foram analisados provetes de argamassa bastarda armados e não armados com fitas metálicas de aço inoxidável, com o objetivo de analisar a durabilidade das mesmas face aos cloretos, tendo presente as características da argamassa quando aplicada para o reforço de paredes de alvenaria de pedra irregular.

Neste capítulo fazem-se comentários finais ao estudo desenvolvido, resumem-se as principais conclusões obtidas e comparam-se os objetivos propostos com os efetivamente alcançados. Por fim mencionam-se possíveis desenvolvimentos futuros.

6.2. Conclusões e comentários finais

Com este estudo pretendia-se averiguar, se as fitas metálicas seriam uma boa alternativa aos fios de aço zincado, utilizada numa das soluções do de reforço das paredes de alvenaria de pedra que consta no principal trabalho de referência [65], denominada de solução IV.

A análise FRX permitiu determinar a concentração ponderada [%], revelando que entre outros componentes, a camada superficial da fita metálica utilizada neste estudo possui 69% de ferro (Fe), 19% de cromo (Cr) e 9% de níquel (Ni). O que possibilitou a identificação do tipo de aço como sendo austenítico.

Através da análise por SEM e EDS observou-se a morfologia da argamassa bastarda e identificaram-se componentes químicos, de onde evidencia-se a calcite (CaCO_3), o quartzo (SiO_2) e os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Nas argamassas ensaiadas na câmara de cloretos, aos 30 e 60 dias observaram-se cristais de halite (NaCl), sendo que estes foram apenas detetados aos 120 dias de ensaio na câmara de nevoeiro salino.

Por meio da Difração por Raio-X identificaram-se as fases cristalinas na camada superficial das fitas ao longo do ensaio de cloretos. A fase cristalina identificada para todas as fitas aos 30, 60 e 120 dias de ensaio, foi cromo ferro níquel. Porque os componentes da camada superficial da fita mantiveram-se com a mesma fase, indica que não houve alterações na camada superficial de proteção à corrosão, continuando esta passivada, pelo que não se detetaram corrosões por picadas em nenhuma amostra.

Através de microscopia ótica observaram-se manchas na superfície das fitas metálicas AF_60_CNS e F_120_CNS. O mesmo não foi detetado nas restantes fitas ensaiadas.

Os ensaios à tração efetuados às fitas metálicas após ensaio de cloretos, revelaram que as fitas ensaiadas na câmara de cloretos têm valores médios de força última entre 6,68 e 6,90 kN e as fitas ensaiadas na câmara de cloretos entre de 6,53 e 6,72 kN. Sendo estes valores comparáveis a 6,66 kN, força média última da fita de referência. Através dos ensaios à tração efetuados às fitas metálicas, antes e após terem sido sujeitas à presença de cloretos, conclui-se que a resistência mecânica não foi afetada, pelo que é altamente improvável que a corrosão irá limitar o tempo de serviço quando as fitas são utilizadas embebidas em argamassa bastarda para reforço de paredes de alvenaria de pedra.

As fitas metálicas ensaiadas neste estudo, apresentaram um bom comportamento face à ação de cloretos, mostrando-se muito resistentes à corrosão mesmo em ambientes com elevada percentagem de cloretos. Nenhuma das fitas metálicas apresentou indícios conclusivos de ter ocorrido corrosão por picadas. O facto das fitas metálicas estarem expostas a níveis de 5% de cloretos em ambiente de grande humidade, não fez com que a corrosão se iniciasse, o que sugere que os níveis de cloretos teriam que ser muito superiores para se atingir um nível crítico de cloretos neste material.

O facto das fitas metálicas estarem envolvidas por argamassa bastarda, não pareceu neste caso ter influência no comportamento à corrosão das mesmas, não sendo neste caso possível concluir se a argamassa bastarda promove ou não proteção às fitas metálicas, relativamente à corrosão. O valor do pH (de 12,5 a 13,5) no interior dos poros da argamassa, não se revela prejudicial no comportamento das fitas metálicas relativamente à corrosão, pelo que neste caso, os níveis de alcalinidade nos poros da argamassa não se revelou ser um catalisador da corrosão por picadas.

6.3. Desenvolvimentos futuros

Na sequência deste trabalho experimental entende-se que alguns dos possíveis desenvolvimentos futuros:

- Ensaiar a durabilidade das fitas metálicas embebidas noutros tipos de argamassas, face à ação de cloretos e comparar com o caso em estudo no presente trabalho;
- Diminuir a área ocupada pelos espaçadores utilizados para fixar as fitas metálicas no centro do provete de argamassa, ou então utilizar outro método que se mostre eficiente;
- Utilizar a técnica de análise SEM e EDS na observação das fitas no sentido transversal, para assim observar a camada passiva e o avanço da possível corrosão;

- Aplicar a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica, para estudar os mecanismos de corrosão nas fitas metálicas;
- Analisar a evolução do pH da argamassa e a sua possível contribuição na corrosão das fitas metálicas;
- Aumentar o teor de cloretos no ensaio de cloretos, e observando o comportamento das fitas metálicas ao longo do tempo de ensaio;
- Aumentar a duração do ensaio de cloretos para 1 ou 2 anos, monitorizando o comportamento das fitas metálicas ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] APPLETON, J. – *Reabilitação de Edifícios Antigos e Sustentabilidade*. VI ENEEC 2010 – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil. Universidade de Évora, Évora, Abril de 2010.
- [2] APPLETON, J. – Tecnologias de intervenção em edifícios antigos. Consolidação de estruturas. Contribuição para um curso de introdução à reabilitação urbana. CCRLVT, Lisboa, Março 1993.
- [3] APPLETON, J.; DOMINGOS, I. – *Biografia de um Pombalino – Um caso de reabilitação na Baixa de Lisboa*. Edições Orion, Amadora, 2009.
- [4] APPLETON, J. – *Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de Intervenção – 1ª Edição*. Edições ORION, Alfragide, 2003.
- [5] APPLETON, J. A. S. – Estruturas antigas e sais solúveis. Actas do Seminário Internacional: *Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos – Danos, processos e soluções*. 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [6] APPLETON, J.; Seminário – *Projectos de Reabilitação de Edifícios Pombalinos*; Módulo 1,2 e 3; 2008.
- [7] BARRETO, Carolina – *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa, 2010.
- [8] BELMONTE, Eduardo dos Passos – *Espectroscopia por fluorescência de raios X por reflexão total: Um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo*, Tese para a obtenção de grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [9] BINDA, L. et al. – *Repair and Investigation Techniques for Stone Masonry Walls*. Construction and building Materials, Volume 11, nº3, 1997.
- [10] BINDA, Luigia; ANZANI, Anna; SAISI, Antonella – *Preservation of the historic structures: investigation and diagnosis as essential steps for compatible choices*. IPCM – A new era of bulding, Cairo, Egypt, Feb. 18-20, 2003.
- [11] BRITO, Vânia – *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

- [12] CEN – Methods of test for mortar for masonry. Part 11: *Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. EN 1015-11:1999. CEN, August, 1999.
- [13] CHAROLA, A. Elena – *Soluble salts in porous materials and the resulting deterioration*. Lecturer, Graduate Program in Historic Preservation, University of Pennsylvania.
- [14] COIAS, V. – *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. IST Press, Lisboa, 2009.
- [15] COIAS, V. – Técnicas reduzidamente intrusivas na aplicação de compósitos na reabilitação sísmica de construções antigas. The COMREHAB Project. Stap, SA, Lisbon, Portugal, 2001.
- [16] COLLEPARDI, Mario; COLLEPARDI, Silvia; TROLI, Roberto – *Salt Weathering of Masonry Walls*. The Venice Experience. CANMET/ACI International Conference, Salonicco, Greece, 2003.
- [17] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – Methods of test for mortar for masonry. Part 3: *Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3:1999. CEN, February, 1999.
- [18] COUTINHO, António Sousa – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 3ª edição, LNEC, Lisboa 1997.
- [19] COUTO, Armanda Bastos; COUTO, João Pedro – *Especificidades e exigências das argamassas na reabilitação de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [20] DIAS, C. – *Física do Estado Sólido* 1998/99. Departamento de Ciências dos Materiais, FCT-UNL, 1999.
- [21] FARIA, Paulina – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2004.
- [22] FILHO, Virgílio F. Nascimento – Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-FRX) e por Reflexão Total (TFRX). Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, 1999.
- [23] Fong-Yuan Ma (2012) – *Corrosive Effects of Chlorides on Metals, Pitting Corrosion*, Prof. Nasr Bensalah (Ed.), ISBN: 978-953-51-0275-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/pittingcorrosion/corrosive-effects-of-chlorides-on-metals>.

- [24] FONSECA, Marc de Araújo - Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional reforçado com confinamento transversal contínuo por fitas metálicas. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Novembro de 2010.
- [25] FONTANA, Mars G. & GREENE, Norbert D. – *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, New York, New York, 1967.
- [26] FRUMENTO, S.; GIOVINAZZI, S.; LAGOMARSINO, S.; PODESTA S. – *Seismic retrofitting of unreinforced masonry buildings in Italy*. Department of structural and geotechnical engineering, University of Genoa, Italy.
- [27] GARCIA-ALONSO, M. C. et al, – *Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar*, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1562-1569.
- [28] GONÇALVES, Teresa Diaz; RODRIGUES, José Delgado – *Rebocos para paredes antigas afectadas por sais solúveis: patologia, princípios de funcionamento e adequabilidade*. Actas do Seminário Internacional: Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos – Danos, processos e soluções. 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [29] GOUVEIA, João P.; LOURENÇO, Paulo B.; VASCONCELOS, Graça – *Soluções Construtivas em Alvenaria*. Congresso Construção 2007. Coimbra., 2007.
- [30] GROOT, J. W. P. Caspar; GUNNEWEG, Jos – *Water Problems in Single Wythe Masonry Walls: The Case of Wind Mills*. Construction and Building Materials, The Netherlands, 2004.
- [31] H. Lee; R.D. Cody; A.M. Cody; P.G. Spry – *The formation and growth of ettringite in Iowa highway concrete deterioration*, Cement Concrete Research 35 (2005) 332 – 343.
- [32] HENRIQUES, Fernando M. A. – *Fenómenos de higroscopicidade devidos à presença de sais solúveis*. Actas do 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB 2003, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [33] HENRIQUES, Fernando M. A. – *Humidade em paredes*. Colecção Edifícios nº1. 4ª Edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [34] HENRIQUES, Fernando M. A.; RATO, Vasco Moreira – *Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade*. 3º ENCORE – Encontro sobre a Conservação e Reabilitação de Edifícios, LNEC, Lisboa, Maio 2003

- [35] HENRIQUES, Fernando; RATO, Vasco Moreira; RODRIGUES, Maria Paulina – *Evaluation of salt resistant mortars*. 6th Internacional Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Lisbon, 2003 (Cd-rom).
- [36] HUERTA, Santiago – *Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach*. Historical constructions, P. B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães, Portugal, pp. 47-70, 2001.
- [37] INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE) - *Parque Habitacional em Portugal: Evolução na última década 2001-2011*. Lisboa, Dezembro de 2012.
- [38] INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE) – *Recenseamento Geral da População e da Habitação – Censos 2011*. Lisboa, 2011.
- [39] IPQ - Cal de construção. Parte 1: *Definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa: IPQ, 2002. NP EN 459-1:2002.
- [40] IPQ – Cimento. Parte 1: *Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. NP EN 197-1:2001.
- [41] IPQ – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados*. Parte 1: *Análise granulométrica – Método de peneiração*. NP EN 933 - 1:2000.
- [42] IPQ – *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados*. Parte 3: *Método para determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [43] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 005-0586, 2001.
- [44] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 005-0628, 2001.
- [45] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 013-0272, 2001.
- [46] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 021-0928, 2001.
- [47] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 033-0311, 2001.
- [48] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 033-0397, 2001.
- [49] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 044-1481, 2001.
- [50] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 046-1045, 2001.
- [51] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 049-0442, 2001.

- [52] JCPDS – *Internacional Center for Diffraction Data*, Ficha nº 086-1110, 2001.
- [53] JÚNIOR, E. – *Estudo da cinética de cristalização de vidros teluretos 20Li₂O – 80TeO₂*. Tese de Mestrado, USP-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.
- [54] KOLEVA, D. A. et al – *Microstructural analysis of plain and reinforced mortars under chloride-induced deterioration*, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 604-617.
- [55] KOLEVA, D. A. et al – *Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack*, *Corrosion Science* 48 (2006) 4001-4019.
- [56] KOURIL, M. et al. – *Threshold chloride concentration for stainless steels activation in concrete pore solutions*, *Cement and Concrete Research* (2010) 431-436.
- [57] LAMEGO, Paula – *Avaliação de técnicas construtivas utilizadas na reabilitação sísmica de edifícios em alvenaria de pedra*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [58] LUSO, E.; ALMEIDA, M.; LOURENÇO, P. – *Humidade em Construções Antigas do Centro Histórico de Bragança*. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios. Porto. p.117-126, 2003.
- [59] MASCARENHAS, Jorge – *Sistemas de Construção V – O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa: Processo Evolutivo dos Edifícios – Inovações Técnicas – Sistema Construtivo – Materiais Básicos (3ª Parte): O Vidro*. Livros Horizonte, Lisboa, 2005.
- [60] NEPOMUCENO, A. A.; ANDRADE, C. – *Steel protection capacity of polymeric based cement mortars against chloride and carbonation attacks studied using electrochemical polarization resistance*, *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 716-721.
- [61] OLIVEIRA, Sílvia et al – *Comportamento de argamassas e elementos de alvenaria antiga sujeitos à acção de sais – 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [62] PAIVA, J. Vasconcelos; VEIGA, Maria do Rosário – *Aspectos gerais. Curso de especialização sobre revestimentos de paredes*. 5ª Edição, LNEC, 2004.
- [63] PEREIRA, Tiago – *Optimização das características de humedecimento e secagem das argamassas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.

[64] PINHO, Fernando F. S. – Construções em Alvenaria de Pedra Tradicional – Principais Anomalias e Técnicas de Reabilitação. Publicação UNIC/UNL, Lisboa, 2003.

[65] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Ciências da Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Outubro de 2007.

[66] PINHO, Fernando F. S. – *Principais patologias em paredes de edifícios antigos*. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000.

[67] PINHO, Fernando F. S. – *Soluções Construtivas de Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000.

[68] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes em Edifícios Antigos em Portugal*. Lisboa: Coleção Edifícios. Nº 8. LNEC, Lisboa, 2008.

[69] PINHO, Fernando F. S.; BAIÃO, Manuel F. C.; LÚCIO, Válder J. G. – *Seismic Behaviour of Limestone Masonry Buildings*. IABSE Symposium Lisbon 2005 – International Association for Bridge and Structural Engineering, Lisboa, 2005.

[70] PINHO, Fernando F. S.; BAIÃO, Manuel F. C.; LÚCIO, Válder J. G. – *Técnicas de consolidação de paredes de edifícios antigos*. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, Maio 2003.

[71] PINHO, Fernando F. S. et al – *Experimental research on rubble stone masonry walls*. HMC08 - Historical Mortars Conference. Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility. LNEC, Lisboa, 2008.

[72] RAMOS, Luís; LOURENÇO, Paulo B. – *Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do Estado de Conservação Estrutural do Martinho da Arcada*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2000.

[73] RATO, Vasco Moreira – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento – Especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2006.

[74] ROQUE, J; LOURENÇO, P. – *Técnicas de intervenção estrutural em paredes antigas de alvenaria*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2003.

- [75] ROQUE, João C. A; LOURENÇO, Paulo B. – *Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria*. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança. Universidade do Minho, Maio 2003.
- [76] ROQUE, João C. Almendra – *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Setembro de 2002.
- [77] ROQUE, João C. Almendra; LOURENÇO, Paulo B. – *Reabilitação estrutural de parede antigas de alvenaria*. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, Maio de 2003.
- [78] SHASHI T.; PANKAJ A. – *Seismic Evaluations of Earthquake Resistant and Retrofitting Measure of Stone Masonry Houses*. Department of Earthquake Engineering, University of Roorkee, India 2000.
- [79] SILVA, J. – Medidas destinadas a evitar o acesso da humidade do terreno às paredes dos edifícios. Lisboa: LNEC, 1983, CPP 510.
- [80] SILVA, J. Mendes da – *Alvenarias não estruturais: patologias e estratégias de reabilitação*. Seminário sobre Paredes de Alvenaria, Porto, 2002.
- [81] SILVA, Rui A. M. – *Caracterização experimental de alvenaria antiga: reforço e efeitos diferidos*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2002
- [82] SILVA, V. C. – *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos – Alvenaria e Madeira – Técnicas Pouco Intrusivas*, ARGUMENTUM, 2ª Edição, Maio de 2007.
- [83] TAVARES, A. – *Reabilitação Urbana - O Caso dos Pequenos Centros Históricos*. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Lisboa 2008.
- [84] UNL/DEC – *Análise de argamassas. Determinação da consistência*. Fe 25, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1998.
- [85] UNL/DEC – *Análise de argamassas. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [86] UNL/DEC – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [87] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.

[88] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da resistência à acção dos cloretos*. Fe 12, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999 (revisto).

[89] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fe 07, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.

[90] UNL/FCT – *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fe 27, Monte da Caparica, UNL/FCT, Janeiro de 1999.

[91] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999.

[92] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[93] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[94] VEIGA, Maria do Rosário; TAVARES, Martha – *Características das paredes antigas*. Requisitos dos revestimentos por pintura. Encontro: A indústria das tintas do século XXI. APTETI, Lisboa, Outubro de 2002.

[95] VIEIRA, Almir G. – *Influência da Microestrutura Inicial na Fração Volumétrica de Austenita Retina e nas Propriedades Mecânicas de Aços Multicomponentes*, Tese de Doutoramento, CPGEM-UFMG, 1999.

[96] Website: AFLORET. *Alvenaria de pedra*. Disponível em: <http://afloret.wordpress.com/category/pared-de-alvenaria-de-pedra/>, acesso em Setembro de 2013.

[97] Website: ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. *Processo de fabrico do aço*. Disponível em: www.abifa.com.br/, acedido em agosto de 2013

[98] Website: BANDIMEX. *Características das fitas BANDIMEX*. Disponível em: <http://www.bandimex.de/>, acesso em dezembro de 2012.

[99] Website: FÓRUM DA CASA. *Cunhais*. Disponível em: <http://www.forumdacasa.com>, acesso em Agosto de 2013

[100] Website: CM-VISEU. *Reabilitação*. Disponível em: <http://www.cm-viseu.pt/guia-reab-centro-historico/capitulo9>, acesso em agosto de 2013.

- [101] Website: CONSERVAÇÃO E RESTAURO. *Ciclo da Cal Aérea*. Disponível em: www.conservacaoerestauero.files.wordpress.com, acesso em Agosto de 2013
- [102] Website: FANTES. *Stainless Steel*. Disponível em: <http://www.fantes.com/stainless-steel.html>, acesso em Agosto de 2013.
- [103] Website: OAPIX. *Silharia*. Disponível em: <http://www.oapix.org.pt>, acesso em Agosto de 2013.
- [104] Website: PORTADA – *Base de Dados de Portugal Contemporâneo*. Disponível em: <http://www.portada.pt>, acesso em Agosto de 2013.
- [105] Website: STHEL, Serviços Especiais. *FRP*. Disponível em: <http://www.sthel.eng.br/index.cfm?target=Servicos>, acesso em Agosto de 2013.
- [106] Website: TEBECHERANI, Ciro de Toledo. *Aços Inoxidáveis*. Disponível em: http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html, acesso em Agosto de 2013.
- [107] Website: WIKIPEDIA. Disponível em: www.wikipedia.org.

ANEXO I
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA E
DAS FITAS METÁLICAS

1 – Considerações iniciais

Neste anexo apresentam-se os resultados das características físicas dos materiais utilizados na preparação da argamassa de cal aérea, cimento, areia de rio e de areeiro e das características mecânicas, físicas e químicas de todos os provetes de argamassa ensaiados, assim como das características mecânicas das fitas metálicas, referidos no Capítulo IV deste trabalho. Apresenta-se também o valor médio e o desvio padrão dos valores obtidos em cada ensaio.

2 – Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas e das fitas metálicas

2.1 – Análise granulométrica dos agregados

Nas Tabela I. 1 e Tabela I. 2 apresentam-se os resultados médios obtidos nas três amostras ensaiadas de cada areia utilizada na análise granulométrica.

Tabela I. 1 - Análise granulométrica da areia de rio

Peneiros		Areia de Rio		
n°	Abertura (mm)	Retido (Kg)	Total acumulado (%)	Material passado (%)
4	4,76	-	-	100
8	2,38	0,0451	4,51	95
16	1,19	0,2243	22,43	73
30	0,595	0,4960	49,61	23
50	0,297	0,2063	20,63	3
100	0,149	0,0224	2,24	1
200	0,075	0,0030	0,30	0
Refugo		0,0022	0,22	0
Total		0,9992	99,94	-
MF				0,99
D = 2,38 mm; d = 0,149 mm				

Tabela I. 2 - Análise granulométrica da areia de areeiro

Peneiros		Areia de Areeiro		
n°	Abertura (mm)	Retido (Kg)	Total acumulado (%)	Material passado (%)
4	4,76	-	-	100
8	2,38	0,0659	6,59	93
16	1,19	0,2369	23,72	70
30	0,595	0,3559	35,62	34
50	0,297	0,2551	25,53	9
100	0,149	0,0695	6,95	2
200	0,075	0,0118	1,18	0
Refugo		0,0040	0,40	0
Total		0,9990	100,00	-
MF				0,98
D = 2,38 mm; d = 0,149 mm				

2.2 – Baridade das areias e dos ligantes

Nas Tabela I. 3 à Tabela I. 6 apresentam-se os resultados de cada amostra das areias e dos ligantes usados na preparação das argamassas

Tabela I. 3 - Valores de baridade de cada amostra de cal aérea

Amostra	Volume do recipiente [cm ³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m ³]
1	750	312,6	416,8
2		307,4	409,9
3		300,0	400,0
Média (g)			408,8
Desvio padrão			8,4

Tabela I. 4 - Valores de baridade de cada amostra de cimento

Amostra	Volume do recipiente [cm ³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m ³]
1	750	750,1	1000,1
2		739,0	985,3
3		735,0	980,0
Média (g)			988,5
Desvio padrão			10,4

Tabela I. 5 - Valores de baridade de cada amostra de areia de rio

Amostra	Volume do recipiente [cm ³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m ³]
1	750	1116,4	1488,5
2		1115,4	1487,2
3		1114,0	1485,3
Média (g)			1487,0
Desvio padrão			1,6

Tabela I. 6 - Valores de baridade de cada amostra de areia de areeiro

Amostra	Volume do recipiente [cm ³]	Areia de Rio	Baridade [kg/m ³]
1	750	1116,4	1407,6
2		1115,4	1372,8
3		1114,0	1388,7
Média (g)			1389,7
Desvio padrão			17,4

2.3. – Caracterização das fitas de aço-inoxidável

Na Tabela I. 7 apresentam-se os comprimentos das fitas de metálicas a utilizar no ensaio de cloretos em mm.

Tabela I. 7 - Comprimentos das fitas metálicas a utilizar no ensaio de cloretos

		Fita metálica	Comprimento [mm]
Câmara Cloretos	Fitas embebidas em argamassa	FP1	122,96
		FP2	121,84
		FP3	120,62
		FP4	120,40
Câmara Nevoeiro Salino		FP 5	121,05
		FP 6	120,88
		FP 7	120,74
		FP 8	121,49
		FP 9	119,23
		FP 10	120,85
		FP 11	120,92
		FP 12	120,25
		FP 13	120,79
		FP 14	121,33
		FP 15	120,15
Câmara Cloretos	Fitas não embebidas em argamassa	F1_CC	121,70
		F2_CC	120,07
		F3_CC	120,77
Câmara Nevoeiro Salino		F1_CNS	121,08
		F2_CNS	121,81
		F3_CNS	119,62
		F4_CNS	120,44
		F5_CNS	121,74
		F6_CNS	121,02
		F7_CNS	121,23
		F8_CNS	120,07
		F9_CNS	121,30
		F0_CNS	120,64

3 – Caracterização das argamassas

3.1 – Argamassa fresca

Na Tabela I. 8 apresenta-se os resultados no ensaio de consistência por espalhamento da argamassa.

Tabela I. 8 - Valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento da argamassa

Amassadura	Ensaio de consistência [cm]			Espalhamento [%]
	d1	d2	d med	
1ª	16,8	16,7	16,8	67,5
2ª	16,7	16,7	16,7	67,0
3ª	16,8	17,0	16,9	69,0
4ª	16,7	16,9	16,8	68,0

3.2 – Características mecânicas

– Módulo de elasticidade dinâmico

Na Tabela I. 9 indicam-se os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 135 dias nos provetes de argamassa.

Tabela I. 9 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa aos 135 dias de idade

Provetes	Massa [g]	Edin [MPa] (1ªleitura)	Edin [MPa] (2ªleitura)	Edin [MPa] (3ªleitura)	Edin [MPa] (4ªleitura)	Edin [MPa]	Eméd [MPa]	Desvio padrãp [Mpa]
AR3	474,2	1856	2006	1816	1859	1884	2047	170
AR4	460,7	2342	2266	2154	2133	2224		
AR5	460,3	2053	2053	2004	2022	2033		

– Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Nas Tabela I. 10 e Tabela I. 11 indicam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão aos 135 dias para os provetes de argamassa.

Tabela I. 10 - Resistências à tração por flexão (Rt) dos provetes de argamassa aos 135 dias de idade

Provete	Massa [g]	Força [N]	L [mm]	b [mm]	σ_f [Mpa]	Rt [Mpa]	D.P.
AR3	474,2	59,8	100	40	0,1	0,2	0,0
AR4	460,7	94,9	100	40	0,2		
AR5	460,3	81,3	100	40	0,2		

Tabela I. 11 - Resistências à compressão (Rc) dos provetes de argamassa aos 135 dias de idade

Provete	Força [N]	A (mm ²)	σ_c [Mpa]	Rc [Mpa]	D.P.
AR3	1005,2	1600	0,6	0,5	0,1
AR4	758,5	1600	0,5		
AR5	757,4	1600	0,5		

3.3 – Características físicas

– Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta

Na Tabela I. 12 indicam-se os valores da massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 152 obtidos nos provetes de argamassa.

Tabela I. 12 - Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa aos 152 dias de idade

Provetes	Massa do Provede [g]			MVR			MVA			PA		
	M ₀	M ₁	M ₂	[kg/m ³]	Média	DP	[kg/m ³]	Média	DP	[%]	Média	DP
AR3	89,011	52,315	100,334	2425,63	2408,7	15,2	1853,66	1845,8	10,7	23,58	23,4	0,3
AR4	67,808	39,513	76,494	2396,47			1833,59			23,49		
AR5	58,583	34,213	65,879	2403,90			1850,03			23,04		

– Absorção de água por capilaridade

Na Tabela I. 13 indicam-se os valores da quantidade de água absorvida em cada provete. Na Tabela I. 14 indicam-se os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e dos valores assintóticos aos 156 dias de idade obtidos nos provetes de argamassa.

Tabela I. 13 - Registo de massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa aos 156 dias de idade

Tempo		Massa do Provede [g]			Água absorvida Massas [kg/m ²]			Média
[h]	[h ^{1/2}]	AR3	AR4	AR5	AR3	AR4	AR5	AR3 a AR5
0,0	0,00	220,258	226,317	241,088	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,29	227,294	233,73	248,77	4,40	4,63	4,80	4,61
0,2	0,41	230,058	236,591	251,719	6,12	6,42	6,64	6,40
0,3	0,50	232,476	239,025	253,975	7,64	7,94	8,05	7,88
0,5	0,71	237,568	244,24	259,165	10,82	11,20	11,30	11,11
1,0	1,00	244,753	251,56	266,679	15,31	15,78	15,99	15,69
2,0	1,41	246,645	253,507	269,894	16,49	16,99	18,00	17,16
24,0	4,90	247,289	254,034	270,838	16,89	17,32	18,59	17,60
96,0	9,80	248,139	255,165	271,517	17,43	18,03	19,02	18,16
120,0	10,95	248,248	255,175	271,624	17,49	18,04	19,09	18,21
144,0	12,00	248,322	255,498	271,898	17,54	18,24	19,26	18,34
312,0	17,66	249,085	256,140	272,722	18,02	18,64	19,77	18,81
336,0	18,33	249,337	256,268	272,957	18,17	18,72	19,92	18,94
432,0	20,78	249,532	256,613	273,211	18,30	18,94	20,08	19,10

Tabela I. 14 - Resultados do coeficiente de absorção e do valor assintótico dos provetes de argamassa aos 156 dias de idade

Provede	Idade	Coef. absorção [kg/m ² .h ^{1/2}]	Valor assintótico [kg/m ²]
AR3	156 dias	15,33	18,30
AR4		15,77	18,94
AR5		15,92	20,08
Média		15,67	19,10
Desvio padrão		0,31	0,90

– Ensaio de secagem

Na Tabela I. 15 indicam-se os registos de massas durante o ensaio de secagem e os respetivos valores de teor de água em cada provete e na Tabela I. 16 os valores de índice de secagem aos 173 dias de idade. A caracterização da secagem, isto é, conhecer a rapidez de secagem das argamassas, faz-se através da determinação do índice de secagem.

Tabela I. 15 - Registo de massas durante o ensaio de secagem dos provetes de argamassa aos 173 dias de idade.

Tempo [min]	Tempo [h]	AR3		AR4		AR5		Média	
		Água [g]	Água [%]	Água [g]	Água [%]	Água [g]	Água [%]	Água [g]	Água [%]
0	0	29,274	13,291	30,296	13,387	32,123	13,324	30,564	13,334
60	1	28,354	12,873	29,376	12,980	31,010	12,863	29,580	12,905
120	2	27,572	12,518	28,580	12,628	30,104	12,487	28,752	12,544
180	3	26,781	12,159	27,797	12,282	29,222	12,121	27,933	12,187
240	4	26,130	11,863	27,149	11,996	28,489	11,817	27,256	11,892
300	5	25,444	11,552	26,452	11,688	27,715	11,496	26,537	11,579
360	6	24,668	11,200	25,680	11,347	26,850	11,137	25,733	11,228
1440	24	13,700	6,220	14,300	6,319	14,700	6,097	14,233	6,212
2880	48	2,473	1,123	2,518	1,113	2,436	1,010	2,476	1,082
4320	72	0,780	0,354	0,820	0,362	0,850	0,353	0,817	0,356
5760	96	0,749	0,340	0,741	0,327	0,813	0,337	0,768	0,335

Tabela I. 16 - Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa aos 173 dias de idade

Provete	Idade	Índice de Secagem
AR3	173 dias	0,27
AR4		0,271
AR5		0,264
Média		0,268
Desvio padrão		0,004

4. – Ensaio de resistência aos cloretos

4.1. – Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência das fitas metálicas e da argamassa de cimento e cal aérea, face à ação dos cloretos referidos no Capítulo V deste trabalho. Apresenta-se também o valor médio e o desvio padrão dos valores obtidos nas várias características ensaiadas.

4.2. – Ensaio de cloretos

Como mencionado anteriormente no capítulo 4, por razões técnicas não foi possível fazer a pesagem dos provetes previamente à realização do ensaio de resistência aos cloretos, mas efetuou-se a pesagem dos provetes após serem 24 h imersos na solução de cloretos.

Tentou-se chegar a valores aproximados do peso seco dos provetes, começando por calcular a % média de água absorvida pelos provetes no ensaio de porosidade aberta, estes são mostrados na Tabela I. 17

Tabela I. 17 – Determinação da percentagem média de água absorvida pelos provetes no ensaio de porosidade aberta

Provete	Pesagem seca [g]	Pesagem húmida [g]	% água absorvida	% média de água absorvida
AR3	89,011	100,334	12,721	12,662
AR4	67,808	76,494	12,810	
AR5	58,583	65,879	12,454	

Fez-se uma solução de cloretos, dissolvendo uma quantidade de sal até este pousar no fundo do recipiente. Transferiu-se a solução para um copo com volume conhecido, e retirou-se o excedente com um vidro como é mostrado na Figura I. 1.



Figura I. 1 – Determinação do peso volúmico da solução de cloretos

De seguida pesou-se o copo com a solução no seu interior, numa balança previamente tarada, de modo a obter apenas o peso da solução. Dividindo o peso da solução pelo volume do copo determinou-se a peso volúmico da solução, através da expressão I.1.

$$\text{Peso volúmico da solução} = \frac{\text{Peso solução}}{\text{Volume copo}} = \frac{0,7764}{0,749} = 1,037 \text{ Kg/dm}^3 \quad \text{I.1}$$

Como o peso da solução é superior ao da água, por conter os cloretos, multiplicando a percentagem média da água absorvida pelo peso volúmico da solução, obteve-se uma estimativa da percentagem média de solução absorvida por massa de provete de 13,13%.

Subtraindo este valor à massa dos provetes húmidos, M_1 , chegou-se a uma estimativa das massas iniciais secas de cada provete, M_0 . Apresentam-se na Tabela I. 18 os valores estimados para a massa seca dos provetes assim como as médias e desvios padrões

Tabela I. 18 - Massa seca dos provetes de argamassa AF e AR aos 60 dias de idade, antes do ensaio de resistência aos cloretos

Provete	Data	Idade [dias]	Massa seca [g]	Média [g]	DP [g]
AF1	21-12-2012	60 d	406,004	405,518	6,069
AF2			406,899		
AF3			411,885		
AF4			397,282		
AR1			420,920	420,920	

¹⁾ AF: provete armado; AR: provete não armado

As percentagens aproximadas de cloretos retidos em cada provete ensaiado, são apresentadas na Tabela I. 19.

Tabela I. 19 - Valores de cloretos retidos em todos os provetes de argamassa

Provete ¹⁾	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa seca M_0 [g]	Massa seca após solução M_1 [g]	Massa Cl-retidos [g]	Média [g]	DP [g]	Cl-retidos [%]	Média [%]	DP [%]
AF1	21-12-12 a 25-02-13	60 d	406,004	467,340	61,336	61,262	0,9	15,107	15,107	0,002
AF2			406,899	468,370	61,471			15,107		
AF3			411,885	474,120	62,235			15,110		
AF4			397,282	457,290	60,008			15,105		
AR1			420,920	484,520	63,600	63,600	-	15,110	15,110	-

¹⁾ AF: provete armado; AR: provete não armado

Nas Tabela I. 20 a Tabela I. 22 apresentam-se os resultados obtidos em cada ciclo e relativamente a cada provete, quer em termos de evolução, quer de variação de massa.

Nas Figura I. 2 a Figura I. 3 apresentam-se os respetivos gráficos da variação de massa para os provetes AF1 e AF2 até os 30 dias e para AF3, AF4 e AR1 até aos 60 dias de ensaio de resistência aos cloretos.

Tabela I. 20 - Resistência dos provetes de argamassa armados AF1 e AF2 face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [n°]	Evolução de massa [g]		Média [g]	Variação de massa [%]		Média [%]	DP [%]
			AF1	AF2		AF1	AF2		
27-12-12 a 26-01-13	66 d	0	469,73	470,44	470,09	0,00	0,00	0,00	0,00
		2	475,17	475,96	475,57	1,16	1,33	1,24	0,12
		4	472,85	475,16	474,01	0,66	1,16	0,91	0,35
		6	463,40	471,88	467,64	-1,35	0,46	-0,44	1,28
		8	455,08	462,22	458,65	-3,12	-1,60	-2,36	1,07
		10	446,45	454,67	450,56	-4,96	-3,21	-4,08	1,24
		12	438,49	445,60	442,05	-6,65	-5,14	-5,89	1,07
		14	428,42	435,50	431,96	-8,79	-7,29	-8,04	1,07
		16	416,55	424,14	420,35	-11,32	-9,71	-10,51	1,14
		18	410,57	419,85	415,21	-12,59	-10,62	-11,61	1,40
		20	394,86	406,71	400,79	-15,94	-13,42	-14,68	1,78
		22	384,63	397,92	391,28	-18,12	-15,29	-16,70	2,00
		24	378,34	392,23	385,29	-19,46	-16,50	-17,98	2,09
		26	371,44	388,65	380,05	-20,92	-17,26	-19,09	2,59
		28	362,38	379,16	370,77	-22,85	-19,28	-21,07	2,53
		30	351,92	368,37	360,15	-25,08	-21,58	-23,33	2,48

¹⁾DP: desvio padrão

²⁾AF – Provede armado

Tabela I. 21 - Resistência dos provetes de argamassa armados AF3 e AF4 face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade do início do ensaio	Ciclos [n°]	Evolução de massa [g]		Média [g]	Variação de massa [%]		Média [%]	DP [%]
			AF3	AF4		AF3	AF4		
27-12-12 a 25-02-13	66 d	0	476,25	456,46	466,36	0	0	0	0
		2	482,01	460,80	471,41	1,21	0,95	1,08	0,18
		4	481,14	459,76	470,45	1,03	0,72	0,87	0,21
		6	478,86	457,78	468,32	0,55	0,29	0,42	0,18
		8	473,01	452,46	462,74	-0,68	-0,88	-0,78	0,14
		10	463,45	440,67	452,06	-2,69	-3,46	-3,07	0,55
		12	450,94	429,28	440,11	-5,31	-5,95	-5,63	0,45
		14	443,61	416,45	430,03	-6,85	-8,77	-7,81	1,35
		16	432,44	397,17	414,81	-9,20	-12,99	-11,09	2,68
		18	426,99	385,54	406,27	-10,34	-15,54	-12,94	3,67
		20	419,08	373,58	396,33	-12,00	-18,16	-15,08	4,35
		22	410,56	354,76	382,66	-13,79	-22,28	-18,04	6,00
		24	405,78	345,62	375,70	-14,80	-24,28	-19,54	6,71
		26	400,58	339,30	369,94	-15,89	-25,67	-20,78	6,91
		28	389,35	328,72	359,04	-18,25	-27,98	-23,12	6,89
		30	378,34	309,45	343,90	-20,56	-32,21	-26,38	8,24
		32	364,57	289,46	327,02	-23,45	-36,59	-30,02	9,29
		34	355,75	271,58	313,67	-25,30	-40,50	-32,90	10,75
		36	335,9	249,53	292,72	-29,47	-45,33	-37,40	11,22
		38	329,78	240,67	285,23	-30,75	-47,27	-39,01	11,68
		40	325,01	232,62	278,82	-31,76	-49,04	-40,40	12,22
		42	315,11	167,09	241,10	-33,84	-63,39	-48,61	20,90
		44	292,37	156,02	224,20	-38,61	-65,82	-52,21	19,24
		46	273,91	149,97	211,94	-42,49	-67,14	-54,82	17,44
		48	256,52	132,06	194,29	-46,14	-71,07	-58,60	17,63
		50	227,84	128,36	178,10	-52,16	-71,88	-62,02	13,94
		52	213,59	125,39	169,49	-55,15	-72,53	-63,84	12,29
		54	207,37	121,95	164,66	-56,46	-73,28	-64,87	11,90
		56	203,1	118,56	160,83	-57,35	-74,03	-65,69	11,79
		58	198,53	114,39	156,46	-58,31	-74,94	-66,63	11,76
60	193,74	111,26	152,50	-59,32	-75,63	-67,47	11,53		

¹⁾DP: desvio padrão

²⁾AF – Proвете armado

Tabela I. 22 - Resistência dos provetes de argamassa de referência AR1 face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade do início do ensaio	Ciclos [n°]	Evolução de massa [g]	Variação de massa [%]
			AR1	AR1
27-12-12 a 25-02-13	66 d	0	487,91	0
		2	494,45	1,34
		4	494,09	1,27
		6	490,64	0,56
		8	483,80	-0,84
		10	472,71	-3,12
		12	458,84	-5,96
		14	457,66	-6,20
		16	427,40	-12,40
		18	419,68	-13,98
		20	413,49	-15,25
		22	404,96	-17,00
		24	398,45	-18,34
		26	392,22	-19,61
		28	378,02	-22,52
		30	356,37	-26,96
		32	341,91	-29,92
		34	332,88	-31,77
		36	319,54	-34,51
		38	312,87	-35,88
		40	307,64	-36,95
		42	295,85	-39,36
		44	274,27	-43,79
		46	249,72	-48,82
		48	244,74	-49,84
		50	239,31	-50,95
		52	231,02	-52,65
		54	222,10	-54,48
		56	217,34	-55,45
		58	211,72	-56,61
60	204,74	-58,04		

¹⁾AR – Argamassa de referência

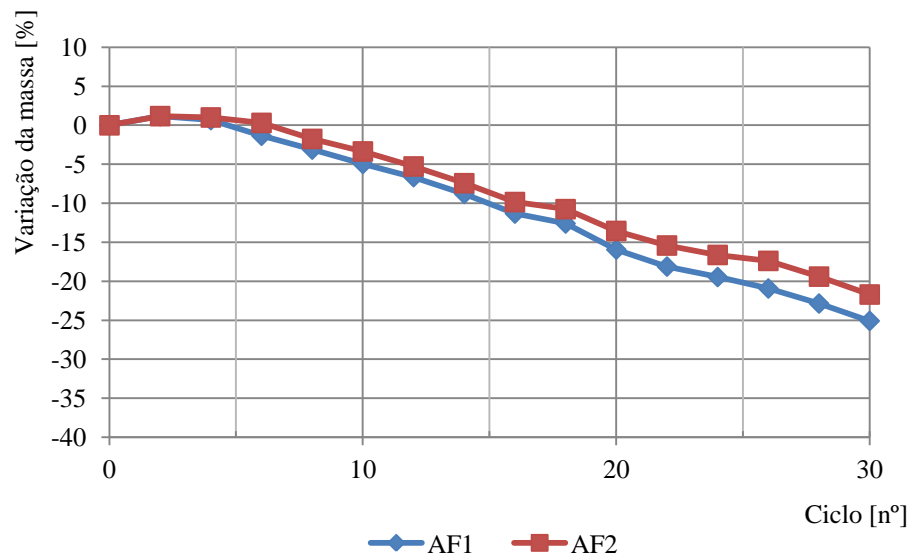


Figura I. 2 - Resistência dos provetes de argamassa armados AF1 e AF2 face aos cloretos – variação de massa

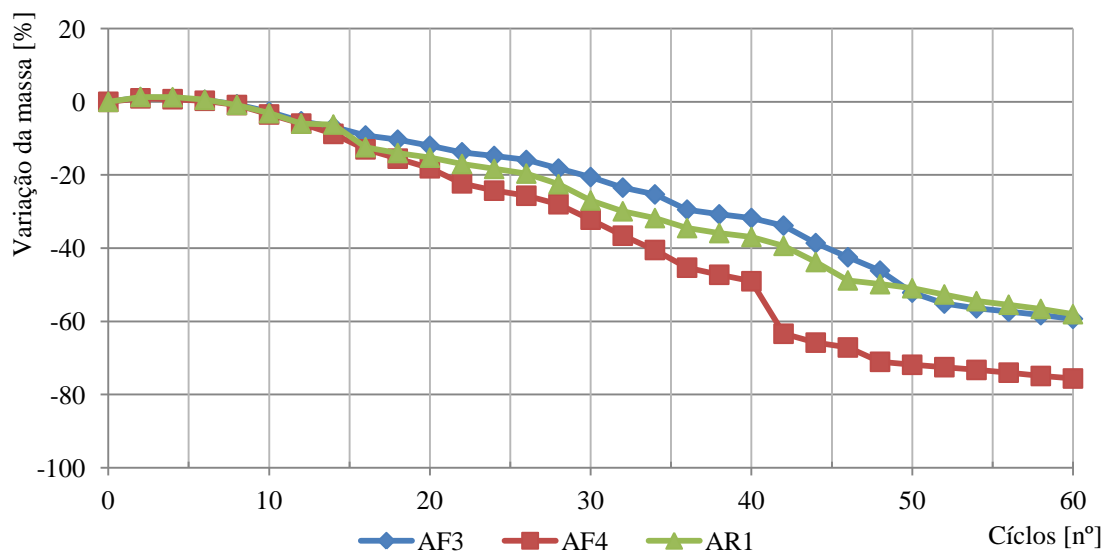


Figura I. 3 - Resistência dos provetes de argamassa armados AF3 e AF4 e argamassa de referência AR1 face aos cloretos – variação de massa

- Ensaio da resistência à tração das fitas de aço inoxidável após ensaio de cloretos

Nas Tabela I. 23 e Tabela I. 24 apresentam-se os valores da força última de resistência à tração das fitas de aço após o ensaio de cloretos. A secção da fita metálica é de $12,7 \times 0,75 \text{ mm}^2$.

Tabela I. 23 – Valores da resistência à tração das fitas metálicas após o ensaio de cloretos na câmara de cloretos

Ambiente	Dias	Provete	Força última [KN]	Tensão última [Mpa]	Força última média [KN]	DP [KN]
Câmara de cloretos	30	AF1	6,58	690,81	6,70	0,17
		AF2	6,82	716,01		
		F1 _{CC}	6,53	685,56	6,68	0,21
		F2 _{CC}	6,83	717,06		
	60	AF3	6,95	729,66	6,90	0,08
		AF4	6,84	718,11		
		F3 _{CC}	6,49	681,36	6,49	6,49

Tabela I. 24 - Valores da resistência à tração das fitas metálicas após o ensaio de cloretos na câmara de nevoeiro salino

Ambiente	Dias	Provete	Força última [KN]	Tensão última [Mpa]	Força última média [KN]	DP [KN]
Câmara de nevoeiro salino	30	AF5	6,62	695,01	6,60	0,05
		AF6	6,55	687,66		
		AF7	6,64	697,11		
		F1 _{CNS}	6,68	701,31	6,62	0,06
		F2 _{CNS}	6,59	691,86		
		F3 _{CNS}	6,58	690,81		
	60	AF9	6,49	681,36	6,61	0,16
		AF10	6,54	686,61		
		AF11	6,79	712,86		
		F4 _{CNS}	6,75	708,66	6,72	0,04
		F5 _{CNS}	6,74	707,61		
		F6 _{CNS}	6,67	700,26		
	120	AF12	6,59	691,86	6,53	0,05
		AF13	6,5	682,41		
		AF14	6,54	686,61		
AF15		6,49	681,36			
F7 _{CNS}		6,52	684,51	6,54	0,05	
F8 _{CNS}		6,61	693,96			
F9 _{CNS}		6,52	684,51			
F10 _{CNS}		6,49	681,36			

Constata-se que os valores obtidos em cada provete e em cada ensaio, são representativos. As maiores diferenças ocorrem por vezes, à rotura desfasada entre provetes, muito devido ao manuseamento a que esses provetes são sujeitos, pelo que essas diferenças são, de algum modo, expectáveis.

ANEXO II

FICHAS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ARGAMASSA E DAS FITAS METÁLICAS