



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de  
cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e  
salinidade**

**ANDRÉ ALEXANDRE COELHO FERREIRA**

**Licenciado Em Engenharia Civil**

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Área de Especialização de Edificações

Orientadores:

Doutora Ana Cristina Gaminha Ribeiro Borges Azevedo (ISEL)

Doutora Maria Rosário Veiga (LNEC)

Júri:

Presidente: Mestre Manuel Brazão Farinha (ISEL)

Vogais:

Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues (FCT/UNL)

Doutora Ana Cristina Gaminha Ribeiro Borges Azevedo (ISEL)

Doutora Maria Rosário Veiga (LNEC)

**Janeiro 2014**



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os que tornaram possível a realização do presente trabalho e que contribuíram de várias maneiras para ultrapassar mais uma fase da minha vida.

Às minhas orientadoras Doutora Ana Cristina Borges Azevedo e Doutora Maria Rosário Veiga agradeço a disponibilidade, confiança e motivação, bem como a partilha de conhecimentos ao longo da realização deste trabalho.

A todos os elementos do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo acolhimento, apoio, disponibilidade e ajuda prestada ao longo da realização de toda a campanha experimental. São de facto uma equipa unida e com grande espírito de entreajuda.

Ao Doutor António Santos Silva e aos elementos do Núcleo de Materiais Metálicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em especial às técnicas Luzia e Paula, agradeço a partilha de conhecimentos e ajuda na realização dos ensaios.

Aos meus pais, irmão e avó agradeço o companheirismo, amizade e apoio que sempre me prestaram.

Agradeço aos meus amigos André, João, Cid e Sónia que estiveram sempre presentes e disponíveis.



## **RESUMO**

A conservação do património edificado constitui nos dias de hoje uma prioridade. Torna-se assim fundamental o conhecimento da composição e comportamento dos revestimentos antigos, garantindo um elevado grau de compatibilidade entre materiais e adequabilidade das intervenções de conservação e reabilitação.

Em Portugal existe um grande número de obras situadas junto da orla costeira. Apesar das condições de elevada humidade relativa e salinidade, estes revestimentos apresentam boa durabilidade.

O estudo de viabilidade da reutilização de resíduos em argamassas ganhou uma nova dimensão, permitindo não só a diminuição dos impactes ambientais, provenientes da sua colocação em aterro, bem como redução do consumo de recursos naturais.

Com o objetivo de explorar a viabilidade da incorporação de resíduos de azulejos cerâmicos vidrados em argamassas, destinadas à reabilitação de rebocos antigos sujeitos a condições severas de humidade e salinidade, foram formuladas argamassas de cal aérea com diferentes teores de substituição do ligante, submetidas a diferentes condições de cura.

As argamassas formuladas foram sujeitas a cura laboratorial e em ambiente marítimo de elevada humidade e salinidade. Foi feita a caracterização física, química, mineralógica e mecânica de modo a avaliar o seu desempenho ao longo do tempo.

Em muitas propriedades estudadas verificou-se a melhoria do desempenho das argamassas, devido à substituição da cal pelo pó cerâmico.

### **Palavras-chave:**

Argamassas de cal aérea, resíduos, cerâmicos, humidade, salinidade, ambiente marítimo, reabilitação



## **ABSTRACT**

The conservation of the built patrimony is a priority. Knowing the composition of ancient mortars is essential to guarantee a high compatibility degree between materials.

Portugal has a large number of constructions along the coast line. Despite the high humidity and soluble salts, ancient mortars demonstrate good performance and durability.

The main subject of this work is to evaluate the viability of incorporating glazed ceramic residues in air lime repair mortars, subjected to sea environment. The studied formulations were based in air lime mortars with partial substitutions of lime weight by the ceramic residue, exposed to sea environment curing conditions.

The reuse of construction and industrial residues in mortars allows the decrease of environmental impacts from their placement in embankment, and the reduction of consumption of the natural resources.

The studied formulations were exposed to different curing conditions, in laboratory and in sea environment. The mortars were evaluated with physical, chemical and mineralogical tests over time.

The partial substitution of the lime for the ceramic residue improved many of the studied properties.

### **Keywords:**

Air lime mortars, ceramic, residues, humidity, salinity, sea environment, rehabilitation





## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO.....	3
1.2	OBJETIVO E METODOLOGIA DE EXECUÇÃO .....	5
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	6
<b>2</b>	<b>ESTADO DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>7</b>
2.1	A CONSTRUÇÃO E A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS .....	9
2.2	ARGAMASSAS .....	10
2.2.1	<i>Considerações iniciais.....</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Materiais constituintes .....</i>	<i>11</i>
2.2.3	<i>Componentes pozolânicos .....</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Efeito de filler.....</i>	<i>22</i>
2.2.5	<i>Propriedades das argamassas.....</i>	<i>23</i>
2.2.6	<i>Requisitos das argamassas de reabilitação/reparação.....</i>	<i>27</i>
2.2.7	<i>Mecanismos de degradação .....</i>	<i>29</i>
<b>3</b>	<b>APRESENTAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	35
3.2	PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....	35
3.3	CONSTITUIÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	37
3.3.1	<i>Cal .....</i>	<i>37</i>
3.3.2	<i>Areia .....</i>	<i>37</i>
3.3.3	<i>Resíduo cerâmico .....</i>	<i>37</i>
3.3.4	<i>Água.....</i>	<i>39</i>
3.4	FORMULAÇÕES E CONDIÇÕES DE CURA.....	40
3.5	PRODUÇÃO DE PROVETES .....	41
3.5.1	<i>Preparação das argamassas .....</i>	<i>41</i>
3.5.2	<i>Provetes prismáticos .....</i>	<i>42</i>
3.5.3	<i>Tijolos.....</i>	<i>43</i>
3.6	ENSAIOS AOS CONSTITUINTES.....	45
3.6.1	<i>Análise por difração raios X .....</i>	<i>45</i>
3.6.2	<i>Avaliação da pozolanidade (Método de Chapelle) .....</i>	<i>46</i>
3.6.3	<i>Análise granulométrica .....</i>	<i>49</i>

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de umidade e salinidade

---

3.7	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	50
3.7.1	<i>Consistência por espalhamento</i> .....	50
3.8	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	51
3.8.1	<i>Massa volúmica aparente no estado endurecido</i> .....	51
3.8.2	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i> .....	53
3.8.3	<i>Resistência à flexão e compressão</i> .....	54
3.8.4	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	57
3.8.5	<i>Ensaio de secagem</i> .....	59
3.8.6	<i>Aderência ao Suporte (Pull-off)</i> .....	59
3.8.7	<i>Ensaio de Permeabilidade à água (Tubos de Karsten)</i> .....	61
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	65
4.2	ENSAIOS AOS CONSTITUINTES .....	65
4.2.1	<i>Análise por difração raios X</i> .....	65
4.2.2	<i>Análise granulométrica</i> .....	66
4.2.3	<i>Avaliação da pozolanicidade (Método de Chapelle)</i> .....	67
4.3	ENSAIO NO ESTADO FRESCO.....	68
4.3.1	<i>Consistência por espalhamento</i> .....	68
4.4	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	68
4.4.1	<i>Análise por difração raios x</i> .....	68
4.4.2	<i>Massa volúmica</i> .....	71
4.4.3	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i> .....	73
4.4.4	<i>Resistência à flexão e compressão</i> .....	75
4.4.5	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	79
4.4.6	<i>Ensaio de secagem</i> .....	84
4.4.7	<i>Aderência ao suporte</i> .....	85
4.4.8	<i>Ensaio de permeabilidade à água (Karsten)</i> .....	86
4.5	ANÁLISE RELACIONAL ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....	86
4.5.1	<i>Ductilidade</i> .....	86
4.5.2	<i>Módulo de elasticidade dinâmico / Resistência à tração</i> .....	88
4.5.3	<i>Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas</i> .....	88
4.5.4	<i>Massa volúmica e resistências mecânicas</i> .....	90
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

5.1	CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES .....	95	
5.2	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	97	
<b>ANEXOS – RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>			
ANEXO A – ENSAIOS AOS CONSTITUINTES .....			I
<i>A1. Análise Granulométrica .....</i>			<i>I</i>
<i>A2. Avaliação da reatividade pozolânica .....</i>			<i>I</i>
ANEXO B – ENSAIO NO ESTADO FRESCO .....			II
<i>B1. Consistência por espalhamento .....</i>			<i>II</i>
ANEXO C – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....			III
<i>C1. Massa volúmica .....</i>			<i>III</i>
<i>C2. Módulo de elasticidade dinâmico .....</i>			<i>IX</i>
<i>C3. Resistência à flexão e compressão .....</i>			<i>XV</i>
<i>C4. Absorção de água por capilaridade .....</i>			<i>XIX</i>
<i>C5. Secagem .....</i>			<i>XX</i>
<i>C6. Análise por difração raios X .....</i>			<i>XXII</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Resíduo Cerâmico Vidrado.....	5
Figura 2.1 - Classificação dos ligantes (Algarvio, 2010) .....	12
Figura 2.2 - Ciclo da cal (Fontes, 2011) .....	13
Figura 2.3 - Classificação das pozolanas.....	20
Figura 2.4 - a) Suporte Liso; b) Suporte rugoso e não excessivamente absorvente; c) Suporte rugoso excessivamente absorvente (Veiga, 1998) .....	25
Figura 2.5 - Principais causas de degradação (Sousa, et al., 2005) .....	30
Figura 2.6 - Mecanismo de degradação por cristalização de sais solúveis (Gonçalves & Rodrigues, 2010) .....	31
Figura 2.7 - Desenvolvimento do processo de cristalização (Silveira, 2008) .....	31
Figura 3.1 - Planificação da campanha experimental com provetes prismáticos.....	36
Figura 3.2 - Processo de fabrico dos azulejos vidrados.....	38

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Figura 3.3 - Máquina de Ensaio de Desgaste de Los Angeles .....	39
Figura 3.4 - Moagem do resíduo cerâmico.....	39
Figura 3.5 - Resíduo após os ciclos de desgaste.....	39
Figura 3.6 - Peneiração mecânica.....	39
Figura 3.7 - Estação experimental no cabo raso .....	40
Figura 3.8 - Provetes em ambiente marítimo .....	40
Figura 3.9 - Pesagem dos constituintes sólidos .....	42
Figura 3.10 - Medição da quantidade de água de amassadura .....	42
Figura 3.11 – Homogeneização mecânica da argamassa .....	42
Figura 3.12 – Homogeneização manual da argamassa.....	42
Figura 3.13 - Equipamento: a) colher de pedreiro; b) talocha; c) pilão; d) molde.....	43
Figura 3.14 - Enchimento até meio e compactação.....	43
Figura 3.15 - Molde totalmente preenchido .....	43
Figura 3.16 - Desmolde dos provetes .....	43
Figura 3.17 - Equipamentos: a) grampos de aço; b) colher de pedreiro; c-d) talochas; e) régua de madeira .....	44
Figura 3.18 - Salpico .....	44
Figura 3.19 - Colocação das régua de madeira .....	44
Figura 3.20 - Camada de acabamento .....	44
Figura 3.21 – Preparação da fração fina .....	45
Figura 3.22 – Passagem pelo peneiro de 106µm.....	45
Figura 3.23 – Preparação da amostra.....	46
Figura 3.24 – Amostras para difração .....	46
Figura 3.25 - Colocação dos cadinhos na mufla.....	48
Figura 3.26 - Cadinhos no exsiccador .....	48
Figura 3.27 - Pesagem do CaO .....	48

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Figura 3.28 - Agitação da solução .....	48
Figura 3.29 - Equipamento: a) coluna de refrigeração; b) entrada de água; c) saída de água; d) placa de aquecimento.....	49
Figura 3.30 - Arrefecimento até à temperatura ambiente .....	49
Figura 3.31 – Pesagem da sacarose .....	49
Figura 3.32 – Filtragem a vácuo .....	49
Figura 3.33 - Titulação .....	49
Figura 3.34 -Equipamentos: a) pilão; b) molde cónico; c) mesa de espalhamento .....	51
Figura 3.35 - Medição da dimensão longitudinal .....	52
Figura 3.36 - Equipamentos: a) equipamento de medição de frequências; b) craveira; c) software de processamento de dados .....	54
Figura 3.37 – Provetes no suporte do equipamento de medição.....	54
Figura 3.38 - Representação Gráfica .....	54
Figura 3.39 - Prensa de ensaios universal .....	55
Figura 3.40 - Apoios para o ensaio de flexão .....	56
Figura 3.41 - Aplicação da carga.....	56
Figura 3.42 - Rotura a meio vão .....	56
Figura 3.43 - Aplicação da carga.....	57
Figura 3.44 - Tina de ensaio .....	58
Figura 3.45 – Provetes no interior da tina com água .....	48
Figura 3.46 - Provetes em secagem .....	59
Figura 3.47 - Realização dos carotes .....	60
Figura 3.48 - Colagem das Pastilhas .....	60
Figura 3.49 - Acessório de Arrancamento.....	61
Figura 3.50 - Rotura após ensaio .....	61
Figura 3.51 - Equipamentos: a)mástique; b) tubos de Karsten.....	62
Figura 3.52 - Fixação dos tubos de Karsten .....	62

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Figura 4.1 - Difractograma do resíduo cerâmico: Q - quartzo; Fa – feldspato sódico; W wollastonite.....	65
Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia do Rio Tejo.....	66
Figura 4.3 - Difractogramas aos 60 dias em cura laboratorial: C – calcite; Q – quartzo; P – portlandite; Fk – feldspato potássico; Fa – Feldspato sódico; M – micas; K – caulinite. ....	69
Figura 4.4 - Difractogramas aos 60 dias em cura marítima: C – calcite; Q – quartzo; P – portlandite; Fk – feldspato potássico; Fa – Feldspato sódico; M – micas; K – caulinite. ....	69
Figura 4.5 - Difractogramas aos 120 dias em cura marítima.....	70
Figura 4.6 - Massa volúmica das argamassas em ambiente marítimo.....	71
Figura 4.7 - Massa volúmica das argamassas em ambiente laboratorial.....	72
Figura 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em ambiente marítimo	73
Figura 4.9 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em ambiente laboratorial .....	74
Figura 4.10 - Gráfico síntese do MED .....	75
Figura 4.11 - Resistência à flexão das argamassas em ambiente marítimo.....	76
Figura 4.12 - Resistência à flexão das argamassas em ambiente laboratorial.....	76
Figura 4.13 - Resistência à compressão das argamassas em ambiente marítimo.....	78
Figura 4.14 - Resistência à compressão das argamassas em ambiente laboratorial .....	78
Figura 4.15 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade.....	80
Figura 4.16 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade .	80
Figura 4.17 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade.....	81
Figura 4.18 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade .	81
Figura 4.19 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias de idade.....	82
Figura 4.20 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 120 dias de idade	82
Figura 4.21 - Curvas de evaporação das argamassas aos 60 dias de idade .....	84

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Figura 4.22 - Curvas de evaporação das argamassas aos 90 dias de idade .....	84
Figura 4.23 - Curvas de evaporação das argamassas aos 120 dias de idade .....	85
Figura 4.24 - Quociente entre resistência à flexão e resistência à compressão das argamassas sujeitas a cura marítima .....	86
Figura 4.25 - Quociente entre resistência à flexão e resistência à compressão das argamassas sujeitas a cura laboratorial .....	87
Figura 4.26 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias..	88
Figura 4.27 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias..	89
Figura 4.28 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 120 dias	89
Figura 4.29 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 60 dias.....	90
Figura 4.30 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 90 dias.....	90
Figura 4.31 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 120 dias.....	91

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das argamassas (Casarek, 2007).....	11
Tabela 2.2 - Requisitos químicos da cal (NP EN 459-1:2011) .....	15
Tabela 2.3 - Classificação dos agregados (Coutinho, 2002) .....	16
Tabela 2.4 - Propriedades que influenciam a trabalhabilidade das argamassas (Sousa & Lara, 2007).....	24
Tabela 2.5 - Requisitos estabelecidos para argamassas de substituição (Veiga et al., 2001).....	28
Tabela 3.1 - Planificação da campanha experimental .....	35
Tabela 3.2 – Nomenclatura e condições de cura .....	41
Tabela 4.1 -Distribuição granulométrica da areia .....	66
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de Chapelle .....	67
Tabela 4.3 - Quantidade de água e valores de espalhamento .....	68

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de umidade e salinidade

---

Tabela 4.4 - - Massas volúmicas [kg/m <sup>3</sup> ] .....	71
Tabela 4.5 - Módulo de elasticidade dinâmico [MPa].....	73
Tabela 4.6 - Resistência à flexão [MPa].....	76
Tabela 4.7 - Resistência à compressão [MPa].....	77
Tabela 4.8 - Valores assintóticos aos 60, 90 e 120 dias de idade.....	83



# Capítulo 1 - Introdução

## **1 INTRODUÇÃO**



## 1.1 ENQUADRAMENTO

Com o passar dos anos as edificações estão expostas a um conjunto de ações que potenciam o aparecimento dos mais variados tipos de anomalias. Estas anomalias devem ser alvo de uma análise minuciosa por forma a determinar não só as suas causas como também possíveis soluções.

Os revestimentos, devido à sua forte exposição, são um dos primeiros elementos das construções a evidenciar degradação. Desta forma são também um dos primeiros elementos a ser intervencionados, garantindo assim não só a sua funcionalidade estética, mas também função protetora dos edifícios.

Em Portugal, existem muitas construções históricas localizadas ao longo de toda a orla costeira. Apesar das condições severas de humidade e salinidade do ambiente marítimo, as argamassas antigas mostraram ser suficientemente resistentes e duráveis, aparecendo pontualmente algumas fendas e outras anomalias. Torna-se desta forma necessário o estudo de argamassas compatíveis com os suportes antigos, sujeitas às mesmas condições ambientais (Veiga et al., 2008).

Em geral, as intervenções feitas aos revestimentos antigos consistem na sua remoção, eliminando o testemunho das técnicas, materiais e estéticas ancestrais. É frequente o uso de produtos incompatíveis que causam uma alteração radical do funcionamento do revestimento podendo originar novas patologias, acelerando o processo de degradação. Torna-se assim fundamental o conhecimento da composição e comportamento dos revestimentos antigos, tendo por base diferentes técnicas que desempenham um papel fulcral nas atividades de conservação e reabilitação dos revestimentos.

As argamassas de cal aérea, de um modo geral, apresentam melhor compatibilidade com os edifícios antigos, embora por vezes não seja viável a sua aplicação devido à presa lenta, produzida exclusivamente pela carbonatação do hidróxido de cálcio. Uma alternativa passa pela utilização de formulações de argamassas hidráulicas com base em cal aérea e componentes pozolânicos (Rodrigues, 2004).

No passado, era prática comum a incorporação de diversos materiais nas argamassas de cal aérea, com a finalidade de lhes conferir características hidráulicas. Um dos materiais mais recorrentes era o pó de cerâmica, cujos primeiros registos remontam à época do império Romano (Matias et al., 2012). Atualmente o estudo de viabilidade da reutilização de resíduos em argamassas ganhou uma nova dimensão, permitindo não só a diminuição

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

dos impactos ambientais, provenientes da sua colocação em aterro, bem como diminuir o consumo dos recursos naturais. Como referido anteriormente, estudos de composição já realizados, conduziram à possível viabilidade da incorporação de pó cerâmico em argamassas, podendo tais formulações conduzir a melhorias na durabilidade e desempenho das argamassas de cal (Matias et al., 2012).

O Planeamento e Gestão de Resíduos, englobando todas as tipologias de resíduos e as diversas origens, constituem o objetivo das políticas neste domínio do Ambiente, assumindo ainda papel de relevo de carácter transversal pela incidência na Preservação dos Recursos Naturais, e em outras Estratégias Ambientais. O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, que estabelece a terceira alteração do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, relativa aos resíduos, prevê, no seu enquadramento legislativo:

- Clarificar conceitos-chave como as definições de resíduo, prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem, e a distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos; aprovar programas de prevenção e estabelecer metas de preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos.
- Incentivar a reciclagem que permita o cumprimento das metas, e da preservação dos recursos naturais, estando prevista a utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em obras públicas.

Este ponto assume especial relevância no seguimento deste trabalho de final de mestrado, uma vez que a incorporação de resíduos de cerâmica nas argamassas de cal pode representar a reutilização de várias toneladas de materiais reciclados por ano.

Perante todo o enquadramento apresentado, justifica-se o estudo de formulações de cal aérea com incorporação de resíduos cerâmicos, pretendendo desta forma obter argamassas com bom desempenho em condições severas de humidade e salinidade, compatíveis com suportes antigos e, dessa forma, apropriadas para a reabilitação e conservação de edifícios e monumentos antigos.

## 1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE EXECUÇÃO

O trabalho experimental visa a incorporação de diferentes teores de resíduos de azulejo vidrado da fábrica Viúva Lamego (*fig.1.1*), finamente divididos em substituição parcial do ligante.

A substituição parcial do ligante tem como objetivo a obtenção de argamassas com bom desempenho, podendo o efeito do pó cerâmico ser de pozolana ou filler.

A substituição é feita em argamassas de cal aérea, sujeitas a condições de cura de elevada humidade e teor em sais, características do ambiente marítimo. Por forma a avaliar a influência do ambiente de cura, esta é realizada em ambiente laboratorial normalizado e em ambiente marítimo.

Por forma a verificar o tipo de influência da substituição efetuada e das condições de cura é feita uma avaliação mecânica, físico-química e mineralógica das amostras com diferentes teores de substituição.

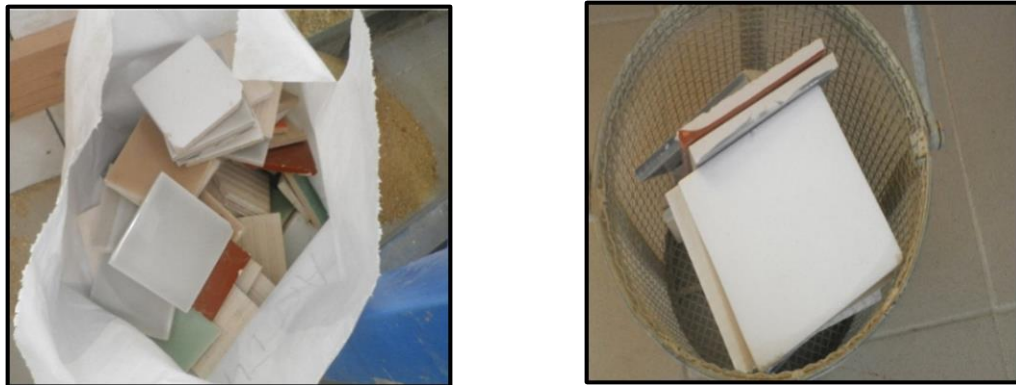


Figura 1.1 - Resíduo Cerâmico Vidrado

Desta forma a realização do trabalho experimental assentou na seguinte metodologia de execução:

- Etapa I - Avaliação da reatividade pozolânica do resíduo cerâmico através do método de Chapelle;
- Etapa II - Incorporação de diferentes percentagens de resíduo cerâmico (20% e 40%) finamente dividido em argamassas de cal aérea em substituição da cal;
- Etapa III - Caracterização física, química, mineralógica e mecânica das argamassas obtidas para as diferentes condições de cura (laboratorial e marítima);

Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Revestimentos de Paredes do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, e no laboratório do Núcleo de Materiais Metálicos, ambos pertencentes ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, os quais pretendem expor de uma forma clara e concisa a problemática em estudo. De seguida apresentam-se sucintamente os assuntos abordados em cada capítulo.

1. Introdução - Neste capítulo foi feito o enquadramento e justificação do tema, definidos os objetivos e metodologia do trabalho;
2. Estado do Conhecimento - É apresentada uma revisão bibliográfica, de forma a obter maior conhecimento sobre argamassas de revestimento, argamassas de revestimentos de edifícios antigos, substituições com agregados minerais, particularmente em argamassas de cal aérea;
3. Apresentação do Trabalho Experimental - Este capítulo remete para a descrição de toda a campanha experimental, onde é feita a sua planificação, são caracterizados os constituintes e formulações em estudo, descritas as condições de cura, ensaios e procedimentos tanto no estado fresco como no estado endurecido;
4. Apresentação dos Resultados – São apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho experimental, descrito no terceiro capítulo, relacionando-os de uma forma detalhada;
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros – São feitas considerações sobre o trabalho realizado, apresentadas as conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2 – Estado do Conhecimento

# **2 ESTADO DO CONHECIMENTO**





## **2.1 A CONSTRUÇÃO E A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS**

O setor da construção é responsável por uma parte significativa dos resíduos produzidos em toda a Europa, estimando-se uma produção anual que ronda as 100 milhões de toneladas de resíduos de construção. A política de resíduos assenta em objetivos e estratégias que visam garantir a preservação dos recursos naturais e a minimização dos impactos ambientais. Desta forma importa incentivar a redução da produção de resíduos bem como a sua reutilização (APA, 2013).

O processo produtivo industrial gera uma grande quantidade de resíduos, os quais são frequentemente colocados em aterro. A reutilização desses resíduos permite minimizar o impacto ambiental provocado pela sua colocação em aterros e diminuir o consumo dos recursos naturais.

Face ao estado atual da economia portuguesa, a conservação do património edificado constitui uma inquestionável prioridade da política das cidades e da política da habitação. O modelo de desenvolvimento atual assente especialmente na construção nova, encontra-se esgotado devido à insustentabilidade do ponto de vista social, económico, ambiental e urbanístico. (AECOPS, 2009).

De acordo com dados de 2011, apesar da grande predominância de edifícios em construções novas (75,1% do total de construções), denota-se que a reabilitação na edificação é uma aposta crescente no sector da construção (INE, 2012).

Com a crescente importância da conservação e reabilitação do património edificado, importa perceber um pouco mais sobre os revestimentos antigos. Estes são maioritariamente à base de cal aérea, com agregado do tipo silicioso, sendo comum a incorporação de diversos materiais conferindo às argamassas características hidráulicas.

Uma forma de reutilizar os resíduos industriais e de construção passa pela sua incorporação em formulações novas de argamassas. Existem vários estudos que demonstram a viabilidade da incorporação dos mais diversos tipos de resíduos melhorando, em alguns casos, o seu desempenho (Matias et al., 2010; Silva et al., 2009).

Estas argamassas surgem como alternativas ao mercado da reabilitação, apresentando em alguns casos elevado desempenho face às exigências a que estarão expostas.

## 2.2 ARGAMASSAS

O presente capítulo pretende fazer uma revisão ao estado atual do conhecimento, no domínio das argamassas de revestimento, em particular de cal aérea. É feita a caracterização dos materiais constituintes das argamassas e são abordadas as principais exigências a que uma argamassa de revestimento deverá atender.

### 2.2.1 Considerações iniciais

As argamassas são materiais de construção constituídos por um ou mais ligantes, agregados, adjuvantes ou adições e água. Todos estes componentes e o seu modo de conjugação influem na qualidade final da argamassa (Margalha, 2009). Na *tabela 2.1* é apresentada uma classificação das argamassas em relação a vários critérios.

A utilização de argamassas nas construções remonta à antiguidade. A cal foi um dos materiais mais utilizados na construção, tendo sido primeiramente utilizada como revestimento pelos Gregos (Veiga, 2007 ).

Com o aparecimento do cimento a utilização de cal em formulações de argamassa foi caindo em desuso. O progressivo desaparecimento dos meios tradicionais de produção e de mão-de-obra com conhecimento e habilidade técnica, aliado às facilidades que o uso do cimento trouxe ao mercado atual contribuiu para que a cal fosse sendo substituída pelo cimento (Kanan, 2008).

Com a crescente importância das obras de conservação e reabilitação temos assistido a um acréscimo na investigação de materiais compatíveis com edifícios históricos, evitando desta forma intervenções radicais, perdas e danos às estruturas antigas.

As argamassas de cal aérea são as que apresentam uma composição mais próxima das argamassas antigas, garantindo desta forma uma maior compatibilidade estética e funcional com os materiais já existentes, tornando-as ideais para obras de conservação e restauro.

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Tabela 2.1 - Classificação das argamassas (Casarek, 2007)

<b>Critério de Classificação</b>	<b>Classificação</b>
Quanto à natureza do ligante	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa aérea</li><li>➤ Argamassa hidráulica</li></ul>
Quanto ao tipo de ligante	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa de cal</li><li>➤ Argamassa de cimento</li><li>➤ Argamassa de cimento e cal</li><li>➤ Argamassa de gesso</li><li>➤ Argamassa de cal e gesso</li></ul>
Quanto ao número de ligantes	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa simples</li><li>➤ Argamassa bastarda</li></ul>
Quanto à consistência	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa seca</li><li>➤ Argamassa plástica</li><li>➤ Argamassa fluída</li></ul>
Quanto ao traço	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa pobre ou magra</li><li>➤ Argamassa média ou cheia</li><li>➤ Argamassa rica ou gorda</li></ul>
Quanto à densidade	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Argamassa leve</li><li>➤ Argamassa normal</li><li>➤ Argamassa pesada</li></ul>

### 2.2.2 Materiais constituintes

Tal como referido anteriormente as argamassas são constituídas essencialmente por um ou mais ligantes, agregados e água. A proporção em que estes materiais são misturados influi nas propriedades finais do revestimento. Importa desta forma perceber e caracterizar cada um dos materiais constituintes das argamassas, determinando a sua influência no revestimento final.

### 2.2.2.1 Ligante

Um ligante é um elemento que possui a propriedade de aglomerar uma quantidade de materiais (agregados), que quando misturados com água formam uma pasta moldável e maleável que ganha presa e endurece fornecendo à argamassa coesão e resistência mecânica. São classificados como orgânicos e inorgânicos.

De entre os orgânicos podem referir-se os hidrocarbonetos e as resinas sintéticas (Rodrigues, 2004), os quais não serão abordados ao longo do presente trabalho.

Os inorgânicos subdividem-se em ligantes aéreos e hidráulicos. Os ligantes aéreos apenas endurecem em contacto com o ar uma vez que dependem do dióxido de carbono presente na atmosfera para se transformarem em carbonatos. Por outro lado os ligantes hidráulicos endurecem tanto imersos em água como ao ar, conseguindo obter em ambos os casos elevada resistência.

A *figura 2.1* apresenta de uma forma esquemática a classificação dos ligantes.

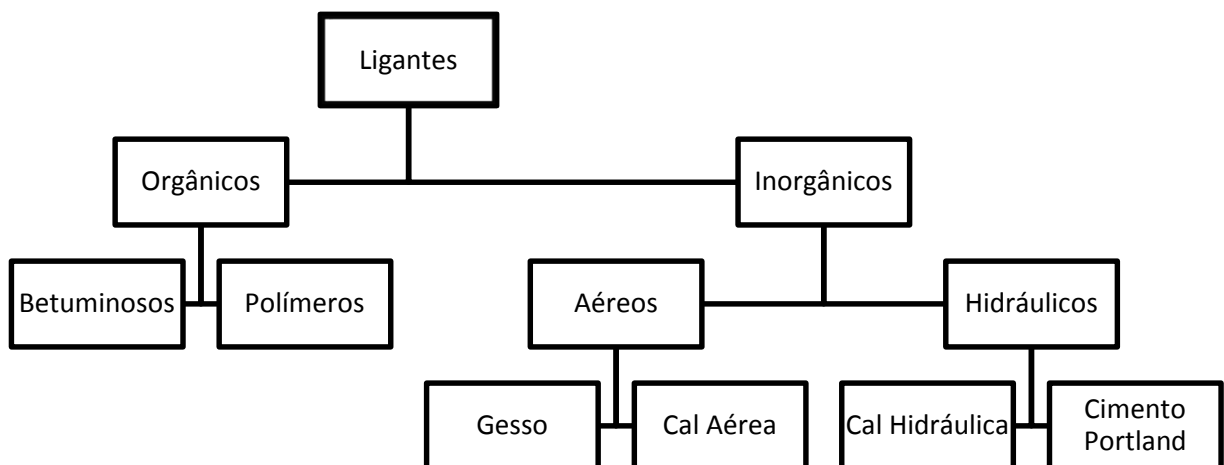


Figura 2.1 - Classificação dos ligantes (Algarvio, 2010)

O enfoque do presente trabalho são argamassas de cal aérea, sendo o trabalho experimental baseado em argamassas de cal aérea hidratada em pó. Desta forma importa perceber um pouco mais sobre os processos de formação da cal, os quais serão descritos sucintamente nos tópicos que se seguem.

### Cal Aérea

As cals aéreas podem ser de origem cálcica ou dolomítica e obtêm-se da cozedura de calcários com elevado grau de pureza. A norma NP EN 459-1 (2011) define os requisitos de ambos os tipos de cal e a sua classificação.

As cals aéreas são principalmente constituídas por óxidos ou hidróxidos de cálcio, que quando amassados com água, endurecem lentamente em contacto com o ar, reagindo com o dióxido de carbono presente na atmosfera (Rodrigues, 2004).

A cal aérea resulta da decomposição, pela ação da temperatura, da rocha cálcica ou dolomítica com uma percentagem não inferior a 95 % de  $\text{CaCO}_3$  ou  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  respetivamente.

A *figura 2.2* demonstra o ciclo da cal.

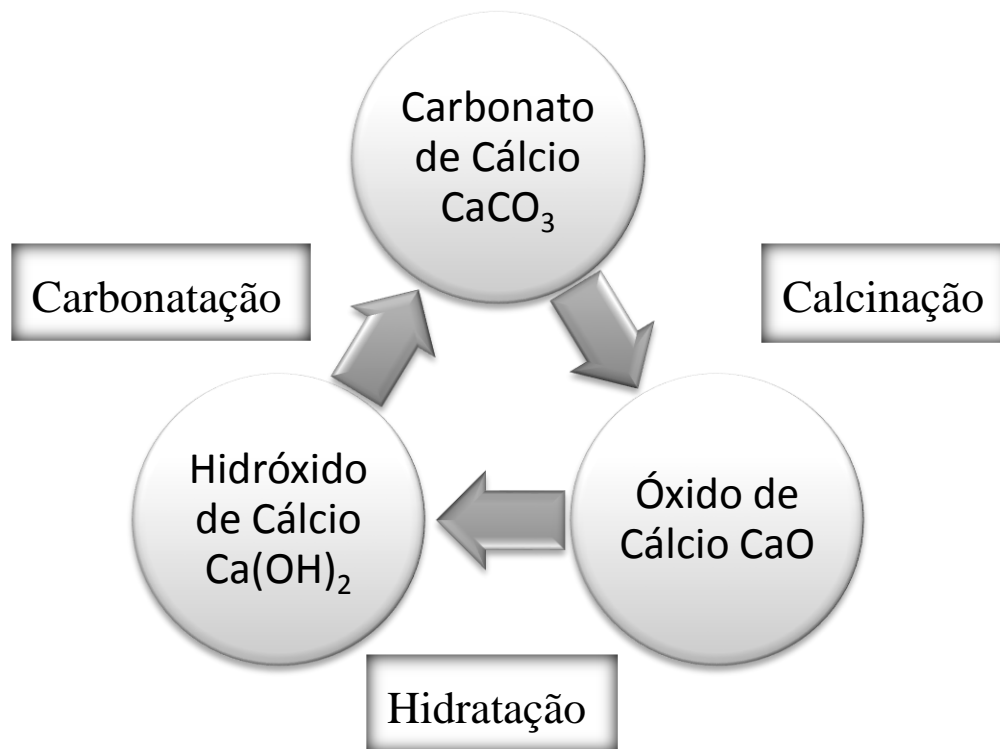


Figura 2.2 - Ciclo da cal (Fontes, 2011)

De seguida serão descritos sucintamente os processos indicados na *figura 2.2* correspondente ao ciclo da cal.

#### ➤ Calcinação

Como referido anteriormente a cal aérea resulta da decomposição a altas temperaturas da rocha cálcica ou dolomítica. A temperatura de decomposição das rochas cálcicas situa-se

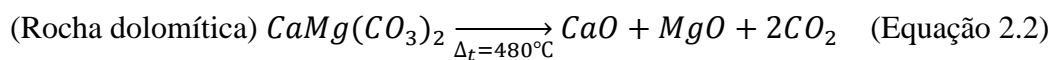
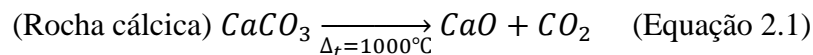
## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

normalmente entre os 800 e os 1000°C, formando-se desta forma a cal aérea cálcica constituída principalmente por óxido de cálcio (CaO).

O processo de decomposição das rochas dolomíticas é semelhante ao das rochas cálcicas, embora a temperaturas bastante inferiores que variam entre os 400 e os 480°C, originado desta forma óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) (Margalha, 2009).

As equações químicas 2.1 e 2.2 retratam o processo de calcinação, descrito anteriormente, no qual se obtém a Cal Viva.



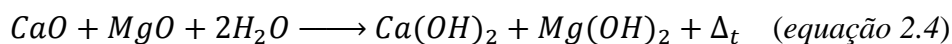
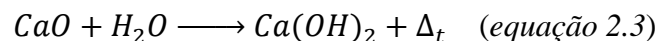
A cal viva pode ser apresentada sob a forma de pedra ou sob a forma de pó designando-se por cal viva micronizada.

### ➤ Hidratação

O processo de adição de água à cal viva designa-se por extinção ou hidratação da cal.

O armazenamento da cal viva tem que ser muito cuidado devido à instabilidade que lhe está associada. Essa instabilidade torna necessária a adição de água, que irá promover a hidratação da cal viva. O óxido de cálcio (CaO) é transformado em hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e o óxido de magnésio é transformado em hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>).

As equações químicas 2.3 e 2.4 representam o processo de hidratação, obtendo-se a cal apagada ou extinta.



As reações descritas anteriormente são exotérmicas, há libertação de calor ( $\Delta_t$ ), podendo atingir temperaturas consideráveis chegando a ser superiores a 100°C.

Durante o processo de hidratação se for adicionada apenas a água necessária para que ocorra a reação obtém-se a cal hidratada em pó seco. No caso de ser adicionada água em excesso, é uma extinção por fusão, obtendo-se a cal hidratada em pasta ou em calda,

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

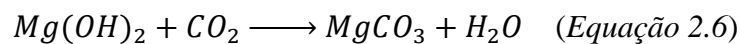
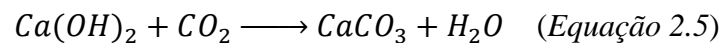
dependendo da quantidade adicionada. Quando a cal é armazenada em ambientes com alguma humidade, a sua extinção pode ocorrer de forma natural (Margalha, 2009).

### ➤ Carbonatação

O endurecimento da cal aérea é um processo que ocorre através da reação lenta com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera. Este acontece em duas fases onde na primeira dá-se a evaporação da humidade em excesso e na segunda fase dá-se a carbonatação (Bandeira, 2012).

A carbonatação corresponde assim ao processo pelo qual ocorre o endurecimento da argamassa de cal aérea quando o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e o hidróxido de magnésio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) reagem com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) originando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ou carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ).

As equações 2.5 e 2.6 descrevem o processo de carbonatação.



O processo de carbonatação é bastante lento, podendo levar anos até estar concluído. A velocidade de carbonatação é influenciada pelo teor de água, pela temperatura, concentração de  $\text{CO}_2$ , humidade relativa ambiente, espessura e permeabilidade ao vapor do reboco (Rodrigues, 2004).

A tabela 2.2 define, de acordo com a norma NP EN 459-1 (2011), os requisitos químicos para os diversos tipos de cal cálcica e dolomítica, as quais são classificadas de acordo com o seu teor de  $\text{CaO} + \text{Mg}$ .

Tabela 2.2 - Requisitos químicos da cal (NP EN 459-1:2011)

Tipo de Cal	Valores em % de massa			
	CaO + Mg	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2
CL 80	≥80	≤5	≤7	≤2
CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2
DL 85	≥85	≤30	≤7	≤2
DL80	≥80	≤30	≤7	≤2

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

A escolha da cal em detrimento de outros tipos de ligante prende-se com a maior trabalhabilidade no estado fresco e com a sua capacidade de absorção de deformações.

### 2.2.2.2 Agregados

Designa-se por agregado o material granular que se considera como não intervindo na reação de endurecimento da argamassa (EMO, 2011). A norma NP EN 13139:2005 especifica as propriedades dos agregados e dos fillers obtidos a partir do processamento de materiais naturais, artificiais ou reciclados e das misturas destes agregados para utilização em argamassas.

A *tabela 2.3* descreve a classificação dos agregados.

Tabela 2.3 - Classificação dos agregados (Coutinho, 2002)

Classificação		Descrição
Origem	Naturais	Agregados que já se encontram com a sua forma na natureza
	Industrializados	Têm composição particulada obtida por processos industrializados
	Reciclados	Resultam do processamento de material inorgânico anteriormente utilizado na construção
Dimensão das partículas	Finos	Areias (recicladas ou britadas), com partículas de dimensões inferiores a 4 mm
	Grossos	Godo ou brita, com partículas de dimensões superiores a 4 mm
Massa Volúmica Aparente	Leves	<2000 Kg/m <sup>3</sup>
	Normais	2000 a 3000 Kg/m <sup>3</sup>
	Pesados	>3000 Kg/m <sup>3</sup>



## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Os agregados têm um contributo fundamental no comportamento dos revestimentos. São o componente maioritário presente nas argamassas e podem ser classificados de acordo com a sua origem, dimensão das partículas e massa volúmica.

Propriedades como a massa volúmica, granulometria, formas das partículas e porosidade afetam decisivamente as características da argamassa, sendo necessário efetuar uma escolha cuidada de acordo com o fim a que se destina.

Nas argamassas utilizam-se genericamente areias com máxima dimensão inferior a 4 mm, sendo esta garantida pela passagem pelo peneiro correspondente.

As areias resultam da degradação de rochas pelo que do ponto de vista químico podem ser distinguidos dois grupos principais:

- Areias siliciosas (quartzosas e graníticas) geralmente do rio ou do areeiro;
- Areias calcárias resultantes do desperdício de rocha calcária.

As areias podem apresentar diversas percentagens de argila na sua composição, sendo designada por amarela a areia do areeiro que contém algum teor de argila.

As areias argilosas conferem maior trabalhabilidade e resistência mecânica às argamassas devido aos finos da argila, mas podem provocar a diminuição da ligação entre o agregado e a cal implicando a necessidade de adicionar maior quantidade de água na amassadura, o que potencia o aumento da retração (Rodrigues, 2004).

A areia de rio, de uma forma geral, confere menor resistência mecânica às argamassas devido aos grãos serem rolados, mas é naturalmente mais lavada e por isso com menos impurezas (Rodrigues, 2004).

Para além das areias naturais ou artificiais podem ser introduzidos nas argamassas outros produtos que funcionam como agregados. Os materiais cerâmicos são um exemplo dessas introduções. Podem ser introduzidos com granulometria grosseira ou fina, chegando eventualmente a desempenhar a função de pozolana (Matias et al., 2010).

O agregado utilizado no presente estudo é a areia do rio Tejo, caracterizada em 3.3.2. Posteriormente foi feita uma substituição em percentagem do ligante por resíduo da indústria cerâmica (azulejo vidrado), caracterizado em 3.3.3.

### **2.2.2.3 Água**

A água é um elemento indispensável para a produção de argamassas. Pode ser qualquer água doce e potável, não devendo ter minerais nem partículas dissolvidas ou em suspensão que possam retardar o processo de presa e afetar as características das argamassas.

A quantidade de água de amassadura está diretamente relacionada com a superfície específica dos grãos da argamassa. Por consequência a quantidade aumentará com a finura das areias e com a dosagem de ligante utilizado.

A água de amassadura confere trabalhabilidade e aderência à argamassa. Argamassas muito secas são difíceis de aplicar e apresentam fraca aderência, mas argamassas muito fluidas são porosas, permeáveis e apresentam fraca resistência mecânica. Desta forma é necessário utilizar um valor intermédio de quantidade de água, que permita obter uma argamassa trabalhável e com boas características mecânicas.

Em formulações de cal aérea a água presente na argamassa influencia o processo de carbonatação, agindo como catalisador da reação.

### **2.2.2.4 Adjuvantes e adições**

Os adjuvantes e aditivos têm como finalidade modificar as propriedades das argamassas tornando-as mais adequadas para determinadas funções. Estes elementos estão a ser cada vez mais utilizados possibilitando acrescentar melhorias ao nível de (Paulo, 2006):

- Trabalhabilidade;
- Tempo de presa;
- Tempo de endurecimento;
- Resistência aos ciclos gelo-degelo;
- Permeabilidade aos líquidos;
- Coloração;
- Massa;
- Etc...

De entre os adjuvantes utilizados em formulações de argamassas destacam-se os seguintes (Veiga, 1998):

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

- Promotores de aderência  
Geralmente constituídos por resinas, destinando-se a promover a melhoria da aderência sem aumentar o teor de ligante. Conduzem geralmente a um aumento da resistência à tração simples e à tração por flexão uma vez que melhoram a ligação entre os grãos e contribuem para a diminuição do módulo de elasticidade;
- Hidrófugos de massa  
São geralmente constituídos por finas partículas insolúveis e destinam-se a preencher os capilares impedindo a penetração de água ou a circulação de água. A redução da capilaridade provocada por este tipo de adjuvantes resulta numa melhoria da capacidade de impermeabilização;
- Introdutores de ar  
Provocam a formação de pequenas bolhas de ar durante a amassadura, atuando como um corte de capilaridade. Melhoram a capacidade de impermeabilização do revestimento, a resistência ao gelo-degelo e a resistência aos sais;
- Plastificantes  
Aumentam a trabalhabilidade da argamassa e diminuem a segregação. Conduzem a uma menor retração, uma vez que possibilitam a diminuição da quantidade de água de amassadura e do teor de ligante. Como efeito secundário, podem retardar a presa e reduzir as resistências iniciais;
- Retentores de água  
Limitam o risco de dessecação prematura da argamassa por absorção de água do suporte ou evaporação em tempo quente.
- Fungicidas  
Impedem a fixação de microrganismos na argamassa. Quando o reboco não é pigmentado, a introdução deste tipo de adjuvantes é feita na tinta.

As adições são materiais inorgânicos finamente divididos que podem ser adicionados à argamassa com o intuito de obter ou melhorar propriedades específicas. Estas podem ser divididas em 2 grupos:

- Adições praticamente inertes (Fillers minerais, pigmentos inorgânicos)
- Adições pozolânicas ou hidráulicas

### 2.2.3 Componentes pozolânicos

Uma pozolana pode ser definida como um material finamente dividido que pode ser adicionado às argamassas por forma a conferir-lhes hidráulidade e aumentar a sua durabilidade. São materiais siliciosos ou sílico-aluminosos que, embora não apresentem por si só propriedades aglomerantes hidráulicas, quando finamente divididos e em presença de água podem reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar compostos de propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem ser classificadas como pozolanas naturais e artificiais. As primeiras são em geral de origem vulcânica, sendo encontradas em zonas onde ocorrem ou ocorreram fenómenos vulcânicos. As pozolanas artificiais são obtidas através do tratamento de materiais com base siliciosa a temperaturas de cozedura específicas, induzindo a formação de sílica amorfa (Velosa, 2006).

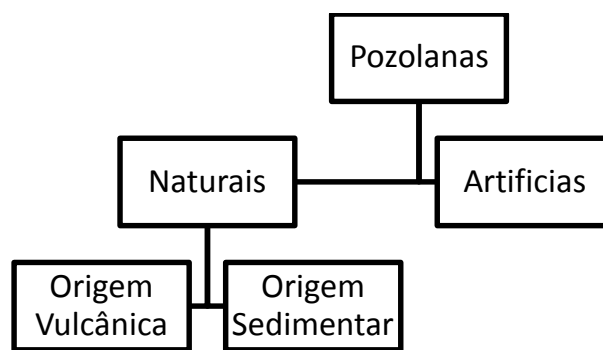


Figura 2.3 - Classificação das pozolanas

#### 2.2.3.1 Pozolanas naturais

As pozolanas naturais são constituídas por rochas que por si só apresentam propriedades pozolânicas, não necessitando de qualquer tratamento para além da extração e moagem (Rodrigues, 2004). São materiais com elevada percentagem de sílica amorfa que podem ser divididas consoante a sua origem em:

- Origem vulcânica – a sua existência dissemina-se por locais onde existe ou existiu atividade eruptiva, sendo deste modo um material abundante presente em todos os continentes. São exemplos as pozolanas dos Açores, pozolanas do Porto Santo, pozolanas de Santo Antão, pozolanas Italianas entre outras. Como são materiais naturais, e portanto formados sob condições diferentes e com diferentes

composições, as pozolanas apresentam características diversas tanto ao nível da composição como da coloração.

- Origem Sedimentar – outra fonte de sílica reativa na natureza é a terra diatomácea ou diatomito, que pode ser encontrada no seu estado puro ou incorporado na argila (Velosa, 2006).

### **2.2.3.2 Pozolanas artificiais**

As pozolanas artificiais são obtidas por processos industriais que envolvem tratamentos térmicos (calcinação) de materiais rochosos com constituição predominantemente siliciosa ou através de subprodutos industriais. São exemplos o metacaulino, as cinzas volantes, as argilas cozidas, pó de vidro ou lamas industriais (Pontes, 2011).

Durante a época Romana eram utilizados os resíduos cerâmicos como adições pozolânicas derivadas de argila cozida a baixas temperaturas. Atualmente o processo de fabrico industrial de produtos cerâmicos utiliza temperaturas de cozedura elevadas que impossibilitam a sua utilização como pozolana. Por forma a induzir reatividade pozolânica nos materiais argilosos é necessário efetuar a cozedura a uma temperatura adequada, por forma a destruir as ligações químicas e a produzir material reativo, mas que não seja demasiado alta para formar novas fases cristalinas (Velosa, 2006).

### **2.2.3.3 Reatividade pozolânica**

A reatividade pozolânica pode designar-se como a capacidade que as pozolanas têm para se combinar quer com o hidróxido de cálcio, quer com os constituintes do cimento hidratado na presença de água, para formarem silicatos ou aluminatos de cálcio hidratados. Para a ocorrência da reação é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade (Coutinho, 2006). A extensão desta reação determina o grau de pozolanicidade de um dado material.

Os principais fatores que influenciam a reação pozolânica são (Massazza, 1993; Velosa, 2006):

➤ Composição

A quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em estado amorfo, capazes de reagir com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em presença de água, é um fator determinante para o sucesso da reação;

➤ Superfície específica

A reatividade a curto prazo depende essencialmente da superfície específica da pozolana. Uma maior superfície específica implica uma maior área de reação, conduzindo a um aumento da reatividade;

➤ Temperatura de cozedura/formação

A temperatura de cozedura/formação das pozolanas artificiais é um fator determinante para garantir a reatividade, visto estar interligada com a quantidade de sílica amorfa presente no material. A temperatura ideal deve promover a formação de uma estrutura desordenada e reativa. Relativamente às pozolanas naturais de origem vulcânica, o baixo grau de cristalinidade é conseguido através do aquecimento seguido do rápido arrefecimento, característico das erupções vulcânicas;

➤ Relação cal/pozolana

A relação cal/pozolana deve ser determinada de acordo com a sílica e alumina reativas presentes nos materiais pozolânicos. Deste modo a razão cal/pozolana deve variar de acordo com o tipo de pozolana utilizada;

➤ Condicionamento

O aumento da temperatura enfatiza a velocidade de ocorrência da reação, mas não modifica as diferenças de comportamento devidas à natureza de cada pozolana. Em relação à humidade, alguns estudos apontam para a melhoria das características das argamassas com o aumento da humidade relativa.

#### **2.2.4 Efeito de filler**

O efeito de filler acontece quando os finos preenchem os vazios entre as partículas maiores, e como consequência, reduzem o tamanho desses vazios através da segmentação dos poros maiores e a porosidade (Bezerra, 2010).

## 2.2.5 Propriedades das argamassas

O desempenho das argamassas de revestimento está diretamente relacionado com as suas características tanto no estado endurecido como no estado fresco. O presente capítulo tem como objetivo a caracterização das principais propriedades das argamassas de revestimento em ambos os estados, sendo estas:

- Trabalhabilidade;
- Resistência à fendilhação;
- Capacidade de impermeabilização;
- Aderência e compatibilidade com o suporte;
- Durabilidade.

### 2.2.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma das características mais importantes, quando se avalia o desempenho da argamassa no estado fresco. Esta deve ter a capacidade de ser facilmente aplicada e apresentar boa aderência, compacidade e bom rendimento (Silva & Costa, 2006).

A trabalhabilidade resulta da conjugação de diversas propriedades, descritas na *tabela 2.4*. As propriedades abaixo descritas estão interligadas, não podendo ser tratadas independentemente ao avaliar a trabalhabilidade das argamassas. Os fatores que influenciam a trabalhabilidade são o teor de água, a relação quantitativa entre ligante e agregado, o tipo de agregado, a natureza e teor dos aditivos. O aumento do teor de finos da areia, do teor de ligante e da quantidade de água de amassadura são fatores que permitem melhorar a trabalhabilidade, mas apresentam consequências gravosas para outras características da argamassa (Silva & Costa, 2006).

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Tabela 2.4 - Propriedades que influenciam a trabalhabilidade das argamassas (Sousa & Lara, 2007)

<b>Propriedade</b>	<b>Descrição</b>
Consistência	Capacidade que a argamassa tem para resistir às deformações impostas
Plasticidade	Capacidade de deformação sem rotura, mantendo-se deformada após a retirada das tensões de deformação
Retenção de água e de consistência	Capacidade de retenção de água no estado fresco, quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água (evaporação, absorção de água pelo suporte)
Coesão	Forças de atracção entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante
Exsudação	Tendência de separação entre a água e a pasta da argamassa, de modo a que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade

### 2.2.5.2 Resistência à fendilhação

A resistência de uma argamassa à fendilhação é função da capacidade da mesma para resistir às tensões de tração nela induzidas pelo efeito da restrição da retração. A retração será tanto maior quanto mais água e mais ligante se utilizar. Imediatamente após a aplicação do revestimento sobre o suporte inicia-se a retração, envolvendo o desenvolvimento de tensões de tração no revestimento e de corte no plano de contacto entre o suporte e o revestimento (Silva & Costa, 2006).

Para se obter boa trabalhabilidade, boa aderência e boa compacidade ser-se-ia levado a optar por uma argamassa fortemente doseada em ligante, o que em contrapartida conduziria a elevada tendência para fissuração por retração (Lucas, 1999).



### 2.2.5.3 Capacidade de impermeabilização

A capacidade de impermeabilização do revestimento confere o complemento de impermeabilidade necessário para que o conjunto parede-revestimento seja estanque. Deste modo o revestimento deve limitar a quantidade de água que atinge o suporte, mas será o conjunto parede-revestimento que globalmente irá assegurar a estanquidade requerida (Lucas, 1999).

As argamassas são materiais de porosidade aberta, onde a água pode penetrar principalmente por permeabilidade ou por capilaridade. A absorção capilar depende da finura do ligante, da relação a/c (aumenta quando a/c aumenta), da idade (diminui quando a idade aumenta), da duração da cura húmida (diminui quando a duração aumenta) e da compactidade (Silva & Costa, 2006).

### 2.2.5.4 Aderência e compatibilidade com o suporte

Uma boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento das funções de impermeabilização do revestimento e é condicionante para a sua durabilidade. Além disso influencia bastante a resistência à fendilhação, na medida em que condiciona a distribuição de tensões na argamassa. A aderência da argamassa ao suporte é devida essencialmente à penetração da água carregada de ligante e da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades do suporte (Veiga, 1998).

Por forma a promover a aderência entre a argamassa e o suporte devem ser seguidos um conjunto de procedimentos de preparação do suporte. Este deve estar limpo e isento de poeiras, ser humedecido de modo a evitar a absorção excessiva de água de amassadura e ser suficientemente rugoso facilitando a aderência da argamassa (Gonçalves, 2010).

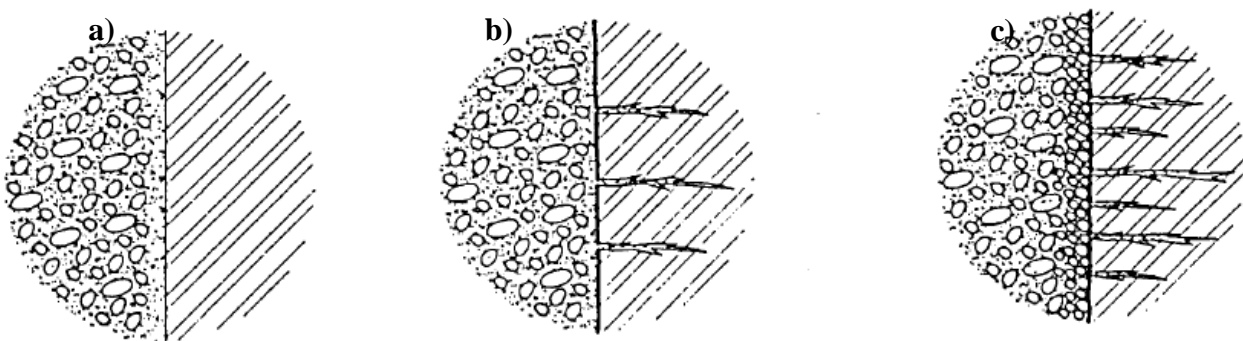


Figura 2.4 - a) Suporte Liso; b) Suporte rugoso e não excessivamente absorvente; c) Suporte rugoso excessivamente absorvente (Veiga, 1998)

A aderência é função do tipo de suporte em que a argamassa será aplicada. Assim os suportes rugosos permitem maior grau de ligação mecânica, sendo melhores que os lisos. Porém um suporte rugoso que seja excessivamente absorvente pode tender a secar rapidamente o revestimento (Veiga, 1998). Sempre que o suporte não proporcionar por si só boa aderência ao revestimento, será necessário realizar o crespido (salpico, chapisco ou salpisco), obedecendo as restantes camadas à regra da degressividade do teor em ligante (Lucas, 1999).

A argamassa de revestimento deve ter coeficiente de condutibilidade térmica idêntico ao do material de suporte e permitir que as trocas de humidade entre a alvenaria e o ar exterior se efetuem normalmente, sendo desta forma permeável ao vapor de água. Em termos mecânicos, quando aplicado sobre um suporte de baixa resistência, o revestimento não deve ser muito forte nem rígido, para não transmitir tensões elevadas que possam deteriorar o suporte. É também importante a compatibilidade química, resistindo por um lado aos sais que possam existir no suporte e por outro lado não contendo sais solúveis evitando a degradação do suporte (Veiga, 1998).

#### **2.2.5.5 Durabilidade**

A durabilidade dos revestimentos implica boa resistência mecânica, nomeadamente aos choques, boa coesão interna, boa aderência ao suporte e entre camadas, boa resistência química e bom comportamento à água. A absorção de água deve ser relativamente lenta e a secagem rápida.

É uma característica essencial para assegurar a qualidade da fachada ao longo da sua vida útil e está dependente de muitos fatores, dos quais se destacam os seguintes:

- Compatibilidade entre materiais;
- Fendilhação;
- Perdas de aderência;
- Ascensão capilar;
- Técnicas de aplicação;
- Ataque de sais;
- Topografia do terreno, eventuais assentamentos;
- Localização e clima na zona de implantação.

Assim um revestimento exterior será mais durável quanto menos suscetível estiver ao aparecimento deste tipo de patologias (Carreira, 2013).

### **2.2.6 Requisitos das argamassas de reabilitação/reparação**

As argamassas são elementos da construção que podem ter vários tipos de utilização. A escolha do tipo de argamassa a utilizar depende das ações a que esta vai estar sujeita consoante a sua função, que no caso da reabilitação/reparação pode ser:

- Reboco exterior;
- Reboco interior;
- Juntas.

Embora seja necessário tratar o sistema parede-revestimento como um todo, existem funções que são da responsabilidade apenas de um dos elementos.

As argamassas utilizadas em reabilitação em relação às utilizadas em construção nova devem satisfazer a um conjunto de exigências funcionais e estéticas adicionais que visam garantir o respeito por exigências básicas de autenticidade, compatibilidade e durabilidade (Magalhães & Veiga, 2005).

Para a escolha do tipo de argamassa de substituição a aplicar é necessário fazer uma análise detalhada, garantindo que a argamassa é a mais adequada de acordo com critérios de compatibilidade, funcionais, de aspeto e de comportamento em conjunto com os materiais pré-existentes. Pretende-se desta forma evitar a aceleração da degradação das paredes e também do surgimento de fenómenos de envelhecimento diferencial entre novos e velhos revestimentos (Veiga, 2003).

As argamassas devem contribuir primeiramente para a preservação das alvenarias onde vão ser aplicadas, atribuindo especial atenção à avaliação da compatibilidade da argamassa com os materiais existentes na alvenaria. (Henriques & Rodrigues, 2006)

De facto a escolha de uma argamassa de substituição inadequada pode induzir a degradação dos elementos pré-existentes onde foi aplicada. Esta degradação pode ocorrer devido à introdução de tensões excessivas no suporte, à tendência de retenção de água em lugar de facilitar a sua secagem, à alteração ou criação de caminhos preferenciais de circulação de água e vapor de água ou devido à introdução de sais solúveis nos elementos pré-existentes (Veiga, 2003) .

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

As argamassas de revestimento devem também proteger a parede da ação da água, dos agentes climáticos, do choque e erosão, da ação química da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo.

De uma forma geral as argamassas utilizadas em atividades de conservação e reabilitação, nomeadamente em substituições devem apresentar as seguintes características:

- Módulo de elasticidade baixo;
- Coeficientes de dilatação térmica e higrométrica semelhantes aos elementos antigos;
- Absorção de água moderada;
- Permeabilidade ao vapor de água;
- Não conter materiais ricos em sais solúveis;
- Resistência mecânica suficiente;
- Boa aderência ao suporte;
- Facilidade de secagem.

A *tabela 2.5* apresenta valores genéricos para as características das argamassas de substituição aos 90 dias, em obras de reabilitação e conservação de edifícios antigos, servindo de base para comparação com o presente estudo.

**Tabela 2.5 - Requisitos estabelecidos para argamassas de substituição (Veiga et al., 2001)**

Função	Características Mecânicas			Aderência [MPa]	Comportamento à água
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Med [MPa]		Cc [Kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ]
<b>Reboco Exterior</b>	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000	0,1 – 0,3	]1,0;1,5[
<b>Reboco Interior</b>	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000	0,1 – 0,3	-----
<b>Juntas</b>	0,2 – 0,8	0,6 – 3	3000 - 6000	0,1 – 0,5	]1,0;1,5[

Onde:  $R_t$  – resistência à tracção;  $R_c$  – resistência à compressão;  $Med$  – módulo de elasticidade dinâmico;  $C_c$  – coeficiente de absorção capilar.

### 2.2.7 Mecanismos de degradação

As argamassas de revestimento estão sujeitas a um conjunto de ações que potenciam o aparecimento dos mais variados tipos de patologias, sendo um dos primeiros elementos das construções a evidenciar degradação. Desta forma torna-se relevante perceber os mecanismos de degradação a que os revestimentos estão sujeitos, atribuindo especial atenção à ação da água e em particular à presença de sais solúveis característicos do ambiente marinho.

As principais causas de degradação dos rebocos são a ação da água, agentes biológicos, ações mecânicas e ação do homem, podendo ocorrer a ação simultânea destes, condicionando o desempenho de todo o revestimento. Na *figura 2.5* estão sistematizadas os principais mecanismos de degradação dos rebocos (Sousa et al., 2005).

A ação da água é o maior agente de degradação dos rebocos, condicionando ainda a manifestação de outras causas, como é o caso de diversos agentes biológicos.

As argamassas em estudo no presente trabalho estão sujeitas à ação da água do mar, a qual provoca processos de deterioração química e física, os quais podem ocorrer simultaneamente provocando acentuada degradação (Borges et al., 2011).

A degradação dos revestimentos neste tipo de ambientes dá-se devido à cristalização de sais no interior dos rebocos, conduzindo a um aumento de volume que induz o aumento das tensões internas, destruindo a estrutura porosa do material. Para além da cristalização de sais nos poros pode também ocorrer o ataque químico devido à ação combinada entre a penetração da humidade e a ação dos sulfatos (Hossain et al., 2009). A cristalização de sais é um dos tipos de anomalia de correção mais difícil, ou até inexequível devido à impossibilidade física de remoção desses sais do interior dos materiais porosos onde existam.

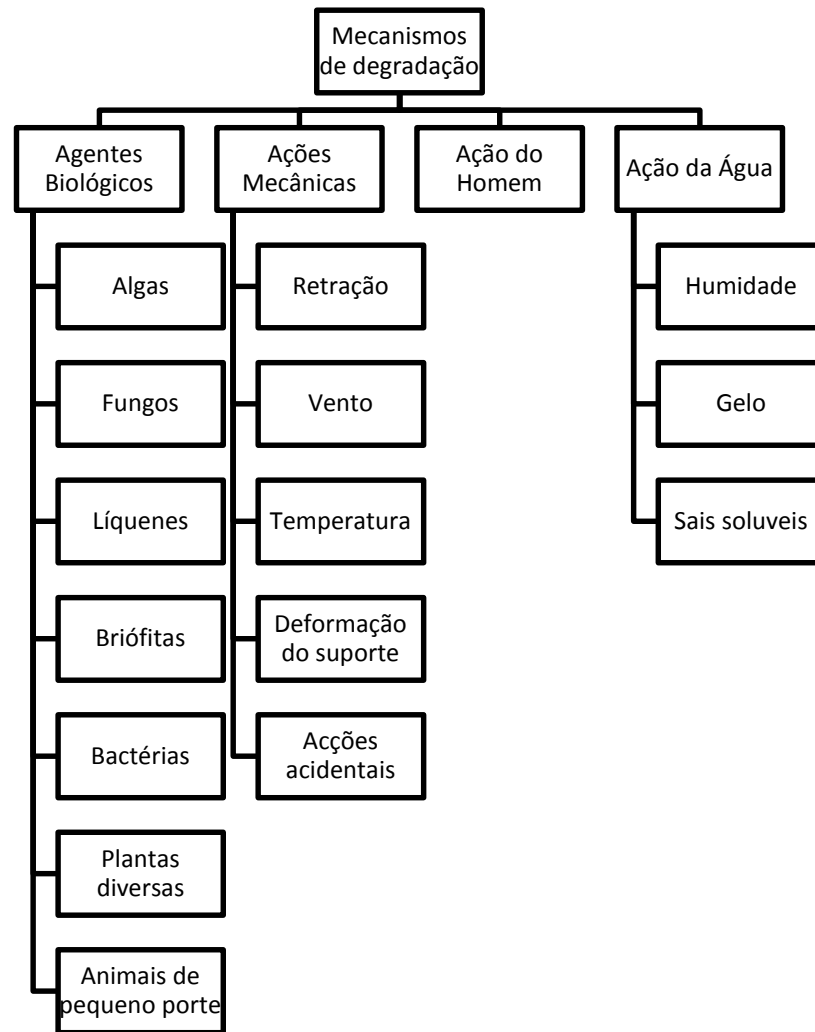


Figura 2.5 - Principais causas de degradação (Sousa, et al., 2005)

As condições ambientais num determinado espaço podem variar bastante e várias vezes ao longo dum único dia, propiciando dessa forma a ocorrência de vários ciclos de dissolução-cristalização dos sais, os quais vão exercendo uma ação de degradação que pode originar anomalias de grande significado. Os sais solúveis que se encontram frequentemente associados à ocorrência de manifestações patológicas são os sulfatos, os carbonatos, os cloretos, os nitritos e os nitratos (Henriques, 2007).

No que respeita ao ambiente marinho, os sais de cloreto são os que se apresentam em maior abundância, sendo o cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>) e cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>). Nas zonas costeiras é comum a formação de eflorescências devido à presença do cloreto de sódio, também denominado por halite, uma vez que é um sal muito solúvel e higroscópico que se infiltra em grande escala nos materiais. Para uma argamassa de revestimento ter bom comportamento face aos cloretos é necessário ter boa resistência

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

mecânica ou uma elevada porometria, que permita a dissolução e cristalização sucessiva sem se desenvolverem tensões internas na argamassa (Barreto, 2010).

A *figura 2.6* apresenta de forma esquemática o mecanismo de degradação por cristalização de sais solúveis (Gonçalves & Rodrigues, 2010).

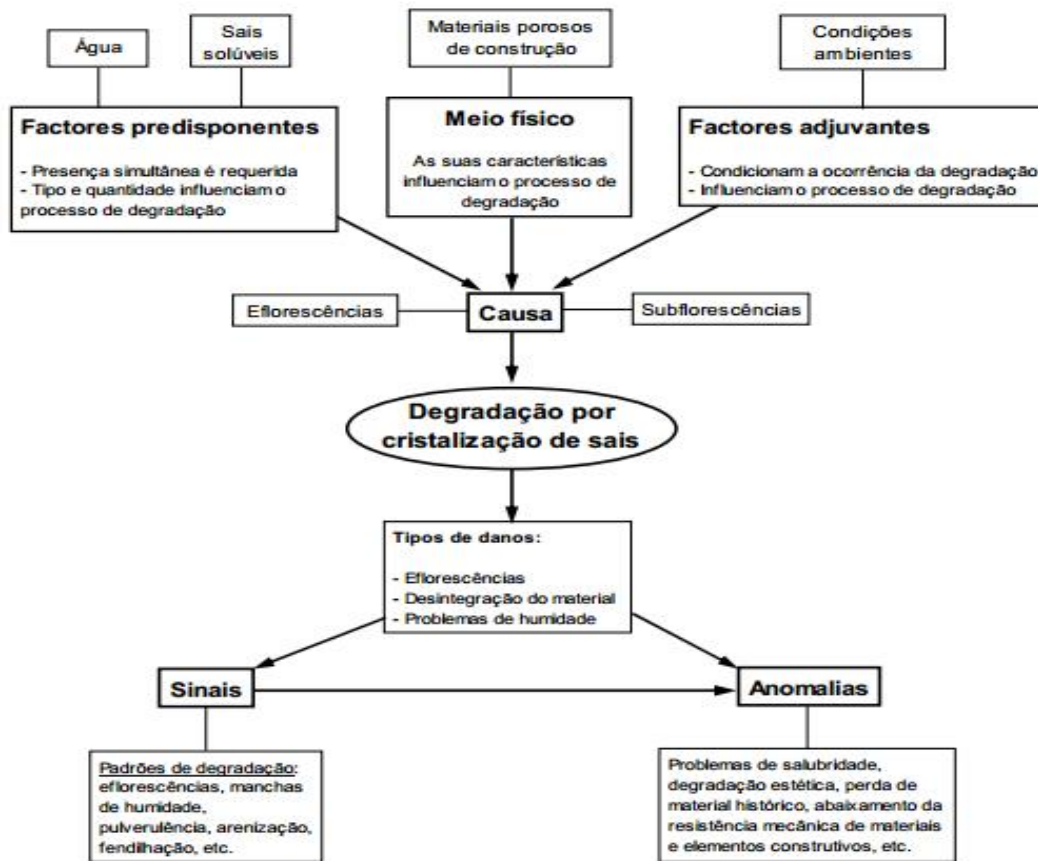


Figura 2.6 - Mecanismo de degradação por cristalização de sais solúveis (Gonçalves & Rodrigues, 2010)

A forma de cristalização mais comum é a prismática ou em forma de agulhas, sendo menos comum a forma de grão isométrico. A deterioração mais nefasta ocorre quando os cristais se desenvolvem dentro dos poros do reboco. Na *figura 2.7* apresenta-se um modelo de desenvolvimento do processo de cristalização (Silveira, 2008).



Figura 2.7 - Desenvolvimento do processo de cristalização (Silveira, 2008)





**3 APRESENTAÇÃO DA  
CAMPANHA EXPERIMENTAL**



### 3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve a campanha experimental, que visa avaliar e caracterizar o comportamento das argamassas de cal em estudo, determinando-se desta forma o efeito da substituição efetuada.

De seguida é apresentada a planificação de toda a campanha experimental, caracterizados os constituintes das argamassas, as formulações estudadas, descritas as condições ambientais de cura bem como o modo de preparação de todos os provetes.

São descritos todos os ensaios e seus procedimentos de uma forma esquemática, onde se indica o equipamento utilizado, a normalização aplicável e o modo de tratamento de resultados.

### 3.2 PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental é composta por ensaios aos constituintes das argamassas, ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido. Na *tabela 3.1* são apresentados todos os ensaios realizados, bem como as normas que lhes são aplicáveis.

Tabela 3.1 - Planificação da campanha experimental

Ensaio	Elemento	Norma
Análise Granulométrica	Areia, Resíduo Cerâmico, Cal	EN 1015-1 (1998)
Massa Volúmica Aparente		Cahier 2669-4
Avaliação da atividade pozolânica (Método de Chappelle)	Resíduo Cerâmico	NF P18-513 (2009)
Consistência por espalhamento	Argamassa no estado fresco	EN 1015-3 (1999)
Módulo de elasticidade dinâmico	Argamassa no estado endurecido	NF B10-511 (1975)
Resistência à flexão e Compressão		EN 1015-11 (1999)
Absorção de Água por capilaridade		EN 1015-18 (2002)
Secagem		Não normalizado
Aderência ao Suporte		EN 1015-12 (2000)
Permeabilidade à água		EN 1015-21

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

O trabalho experimental compreende a realização de 108 provetes prismáticos ( $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup>), dos quais 54 se destinam à realização do ensaio de absorção de água por capilaridade e ao ensaio de secagem, enquanto os restantes provetes se destinam à realização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências à flexão e compressão.

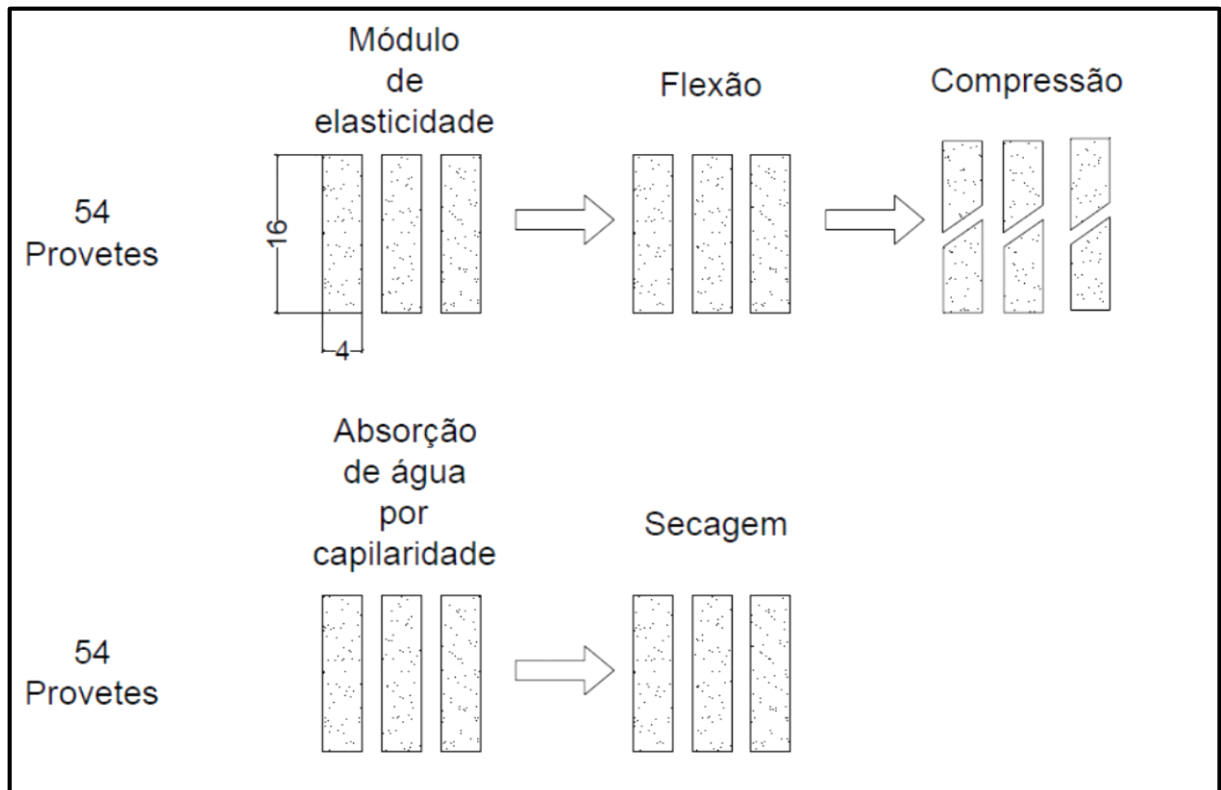


Figura 3.1 - Planificação da campanha experimental com provetes prismáticos

Para os ensaios de permeabilidade à água e aderência ao suporte foram rebocados 12 tijolos, 6 para cada ensaio.

Todos os ensaios foram realizados aos 60, 90 e 120 dias com exceção dos ensaios de aderência ao suporte e permeabilidade à água, os quais foram feitos apenas aos 90 dias. Para a realização das difrações de raios X foi utilizado o material resultante do ensaio de compressão.

### **3.3 CONSTITUIÇÃO DAS ARGAMASSAS**

Durante a campanha experimental foram ensaiados três tipos de argamassas, sendo estas constituídas por cal aérea hidratada em pó, areia de rio e resíduo cerâmico com duas percentagens de incorporação.

#### **3.3.1 Cal**

O ligante utilizado no fabrico das argamassas foi a cal aérea hidratada sob a forma de pó, *Lusical H100*. Durante todo o processo de fabrico das argamassas o saco de cal foi mantido em local seco e isento de humidades. Procurou-se manter o saco aberto o menor tempo possível evitando desta forma fenómenos de carbonatação da cal.

#### **3.3.2 Areia**

A areia utilizada ao longo de todo o trabalho experimental foi a areia de rio Tejo, que é atualmente a mais utilizada em construção.

É uma areia comercializada a granel que não foi sujeita a qualquer tipo de tratamento, apresentando desta forma algumas impurezas apesar de ser uma areia lavada. Antes da sua utilização no fabrico das argamassas realizou-se uma peneiração por forma a remover o material com granulometria superior a 5mm. Posteriormente secou-se a areia numa estufa a  $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24h.

#### **3.3.3 Resíduo cerâmico**

O resíduo incorporado nas formulações de argamassas é um resíduo industrial da fábrica Viúva Lamego. Trata-se de um material cerâmico resultante do fabrico de azulejos vidrados. O vidrado dos azulejos não contém chumbo na sua constituição pelo que não apresenta perigosidade.

O resíduo foi incorporado em substituição parcial do ligante, tendo sido finamente dividido através de um processo de moagem.

A *figura 3.2* mostra as etapas de fabrico dos azulejos.

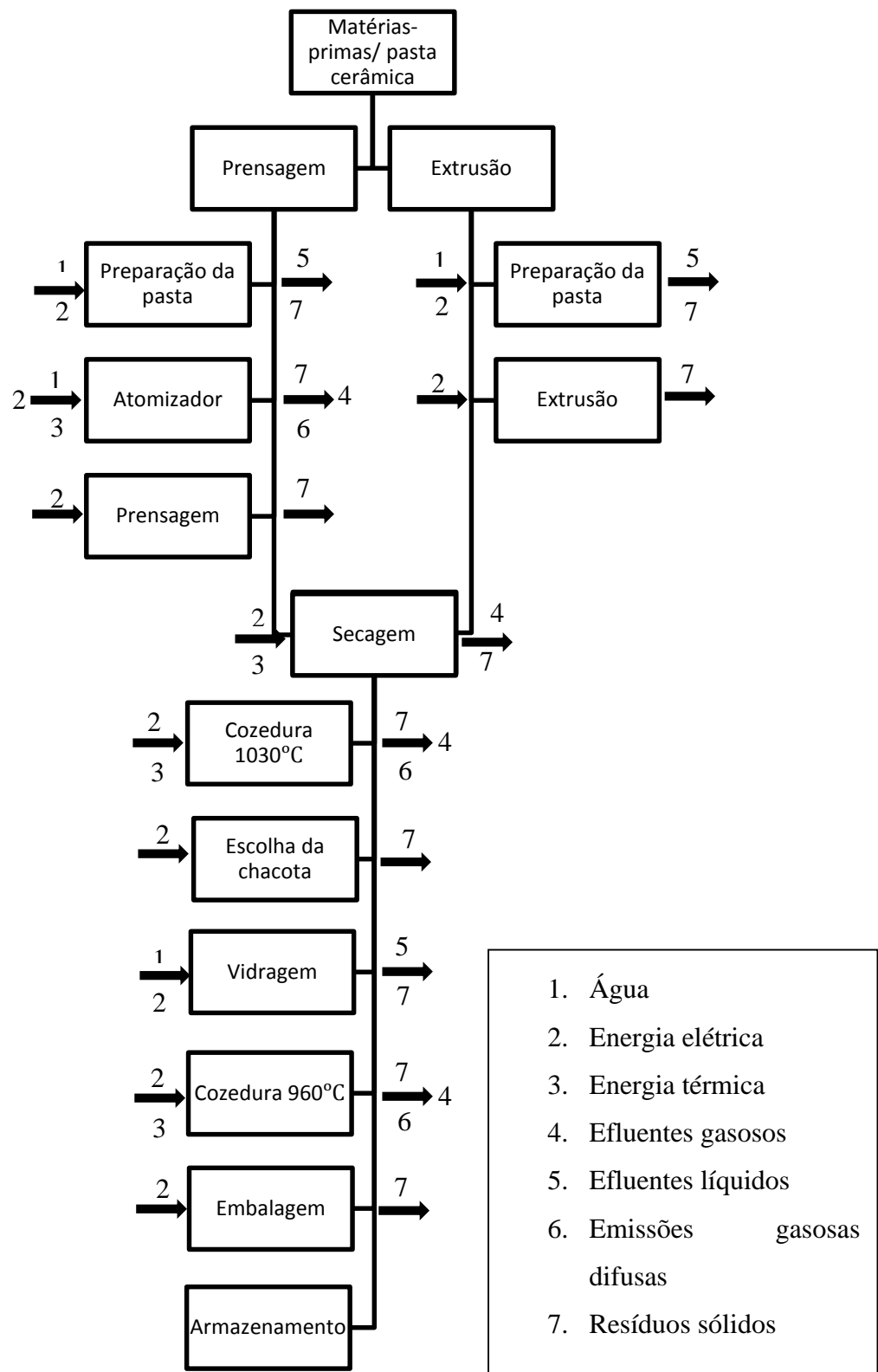


Figura 3.2 - Processo de fabrico dos azulejos vidrados

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

O processo de moagem foi efetuado utilizando a máquina de Ensaio de Desgaste de Los Angeles, do laboratório de Materiais de Construção do ISEL. Posteriormente à moagem foi realizada uma peneiração mecânica, garantindo-se desta forma que o material moído possuía uma granulometria inferior a 0,075 mm.



**Figura 3.3 - Máquina de Ensaio de Desgaste de Los Angeles**



**Figura 3.4 - Moagem do resíduo cerâmico**



**Figura 3.5 - Resíduo após os ciclos de desgaste**



**Figura 3.6 - Peneiração mecânica**

### 3.3.4 Água

A água utilizada nas amassaduras foi a da rede de abastecimento público, tendo sido determinada a quantidade a utilizar na produção das argamassas através do ensaio de consistência por espalhamento. A aferição da quantidade de água necessária corresponde a um processo iterativo, com vista a obter o nível de trabalhabilidade desejado.

### 3.4 FORMULAÇÕES E CONDIÇÕES DE CURA

Durante a campanha experimental foram estudadas três formulações de argamassas. A primeira formulação é a formulação que serve de referência e corresponde a uma argamassa constituída apenas por cal e areia com uma relação mássica de 1:3. A segunda formulação estudada corresponde à substituição em 20% do ligante pelo resíduo cerâmico, sendo desta forma constituída por cal, areia e resíduo cerâmico. A terceira e última composição corresponde à substituição em 40% do ligante pelo resíduo cerâmico, sendo constituída por cal, areia e resíduo.

Uma parte bastante importante do presente trabalho passa pela simulação de condições severas de humidade e salinidade, características do ambiente marinho. Desta forma foram realizados dois tipos de cura distintos, cura laboratorial em ambiente controlado e cura em ambiente natural junto ao mar, os quais visam determinar a influência das diferentes condições de cura.

A cura em ambiente marinho foi realizada na estação do LNEC situada no farol do Cabo Raso. A cura em laboratório foi efetuada numa sala a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  de temperatura e humidade relativa respetivamente.



Figura 3.7 - Estação experimental no Cabo Raso



Figura 3.8 - Provetes em ambiente marinho

A identificação dos provetes foi feita utilizando uma nomenclatura que pretende evidenciar os materiais constituintes da argamassa, o número do provete e a percentagem de incorporação do resíduo cerâmico. Os provetes constituídos apenas por cal e areia são identificados pelas siglas CA, os provetes em que a percentagem de substituição é de 20% são identificados com as siglas  $\text{CAC}_1$  e os provetes em que a percentagem de substituição é de 40% são identificados pelas siglas  $\text{CAC}_2$ .



## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

A *tabela 3.2* sintetiza a identificação das formulações estudadas bem como as condições de cura a que os provetes foram sujeitos.

Tabela 3.2 – Nomenclatura e condições de cura

Identificação	Constituintes	Relação Mássica	Percentagem de substituição	Cura
R <sub>i3/13</sub> -CA-1 a 18	Cal + areia	1:3	0%	Marítima
R <sub>i3/13</sub> -CA-19 a 36	Cal + areia	1:3	0%	20±2°C/ 65 ±5% HR
R <sub>i3/13</sub> -CAC <sub>1</sub> -1 a 18	Cal + areia + resíduo	1:3	20%	Marítima
R <sub>i3/13</sub> -CAC <sub>1</sub> -19 a 36	Cal + areia + resíduo	1:3	20%	20±2°C/ 65 ±5% HR
R <sub>i3/13</sub> -CAC <sub>2</sub> -1 a 18	Cal + areia + resíduo	1:3	40%	Marítima
R <sub>i3/13</sub> -CAC <sub>2</sub> -19 a 36	Cal + areia + resíduo	1:3	40%	20±2°C/ 65 ±5% HR

### 3.5 PRODUÇÃO DE PROVETES

#### 3.5.1 Preparação das argamassas

A preparação das argamassas foi realizada de acordo com o referido na norma EN 1015-2:1998/A1:2006, embora com tempos de amassadura ligeiramente diferentes, como se pode verificar no procedimento descrito de seguida.

#### Procedimento

- 1) Seca-se a cal a uma temperatura de 40°C e a areia a uma temperatura de 105°C, durante 24 horas;
- 2) De acordo com o traço definido pesa-se a areia, a cal e o resíduo cerâmico, colocando-os na cuba metálica da misturadora (*Figura 3.9*);
- 3) Mistura-se mecanicamente e a seco durante 30 segundos;
- 4) Adiciona-se a água e homogeneiza-se durante 2 minutos (*Figura 3.11*);
- 5) Mistura-se manualmente, com o auxílio de uma colher de pedreiro (*Figura 3.12*);
- 6) Coloca-se novamente na misturadora e homogeneiza-se durante 30 segundos;

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



Figura 3.9 - Pesagem dos constituintes sólidos



Figura 3.10 - Medição da quantidade de água de amassadura



Figura 3.11 - Homogeneização mecânica da argamassa



Figura 3.12 - Homogeneização manual da argamassa

### 3.5.2 Provetes Prismáticos

Cada molde possibilita a produção de 3 provetes prismáticos de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , sendo estes utilizados nos ensaios de determinação da resistência à flexão, da resistência à compressão, do coeficiente de capilaridade, do índice de secagem e módulo de elasticidade. O procedimento para a sua execução é apresentado de seguida.

#### Procedimento

- 1) Aplica-se óleo desmoldante nas superfícies internas do molde;
- 2) Coloca-se a argamassa realizada de acordo com o procedimento descrito em 3.5.1, no interior dos moldes até meia altura, com uma colher de pedreiro (*Figura 3.14*);
- 3) Aplicam-se 25 pancadas, com um pilão para o efeito, compactando a superfície;
- 4) Enche-se o resto do molde com a mesma argamassa e realiza-se novamente a compactação com 25 pancadas;

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- 5) Levanta-se cada um dos quatro lados do molde, e deixa-se cair por forma a concluir a compactação;
- 6) Alisa-se a superfície dos provetes com uma talocha metálica;
- 7) Colocam-se os provetes nas condições de cura pretendidas.
- 8) Desmoldam-se passados os dias de cura definidos (*Figura 3.16*).

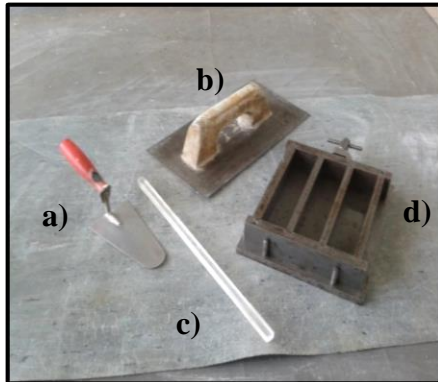


Figura 3.13 - Equipamento: a) colher de pedreiro; b) talocha; c) pilão; d) molde



Figura 3.14 - Enchimento até meio e compactação

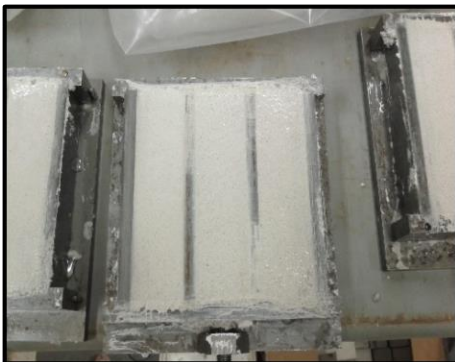


Figura 3.15 - Molde totalmente preenchido



Figura 3.16 - Desmolde dos provetes

### 3.5.3 Tijolos

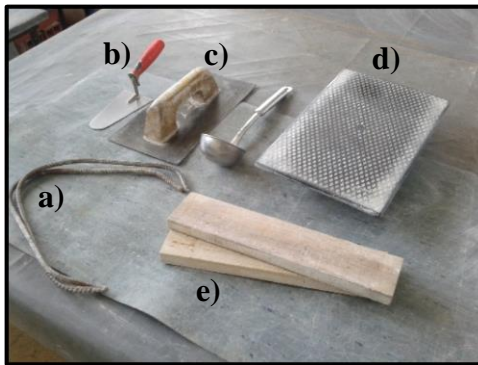
A aplicação de argamassa em tijolos correntes tem como objetivo simular o reboco com 1,5 cm de espessura numa parede de alvenaria. Os ensaios a realizar nos referidos tijolos são o ensaio de aderência e de permeabilidade à água. A aplicação do reboco compreende as etapas enumeradas no procedimento abaixo apresentado.

#### Procedimento

- 1) Humedece-se o suporte, evitando desta forma a absorção da água de amassadura;

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- 2) Salpica-se a superfície dos tijolos com uma argamassa que tenha o mesmo traço da que se vai aplicar na camada de acabamento, mas com uma quantidade maior de água por forma a permitir o salpico (*Figura 3.18*);
- 3) Colocam-se réguas de madeira nas arestas do tijolo com maior comprimento, fixando-as com grampos de aço (*Figura 3.19*);
- 4) Aplica-se a argamassa, realizada de acordo com o procedimento descrito em 3.5.1, por forma a fazer os 1,5 cm de reboco pretendidos;
- 5) Sarrafa-se a superfície com o auxílio de uma régua de madeira e alisa-se com a talocha;
- 6) Realiza-se o aperto da argamassa, enquanto esta se encontra trabalhável, evitando assim o aparecimento de fendas.



**Figura 3.17 - Equipamentos: a) grampos de aço; b) colher de pedreiro; c-d) talochas; e) réguas de madeira**



**Figura 3.18 - Salpico**



**Figura 3.19 - Colocação das réguas de madeira**



**Figura 3.20 - Camada de acabamento**

## 3.6 ENSAIOS AOS CONSTITUINTES

### 3.6.1 Análise por difração raios X

O ensaio de difração de raios X foi efetuado apenas para a fração fina das amostras. Foram realizadas 13 difrações, das quais 12 pertencem às amostras resultantes do ensaio de compressão, aos 60 e 120 dias de idade, e a última pertence ao resíduo cerâmico

#### Equipamento

- Peneiro com 106  $\mu\text{m}$  de abertura de malha;
- Martelo de borracha;
- Porta-amostras;
- Difratómetro.

#### Procedimento

- 1) Seleciona-se uma fração do provete e desagrega-se através de movimentos de fricção, evitando dar pancadas, com o auxílio de um martelo de borracha (*Figura 3.21*);
- 2) Faz-se passar a amostra desagregada pelo peneiro com abertura de malha de 106  $\mu\text{m}$ , e continua-se o processo de desagregação até se obter quantidade suficiente para a realização do ensaio (*Figura 3.22*);
- 3) Preenche-se o porta-amostras, tendo o cuidado de realizar uma correta compactação, garantido uma superfície lisa e livre de irregularidades (*Figura 3.23*);
- 4) Coloca-se o porta-amostras preenchido no difratómetro;
- 5) Analisa-se o difratograma obtido recorrendo a uma base de dados instalada no computador.

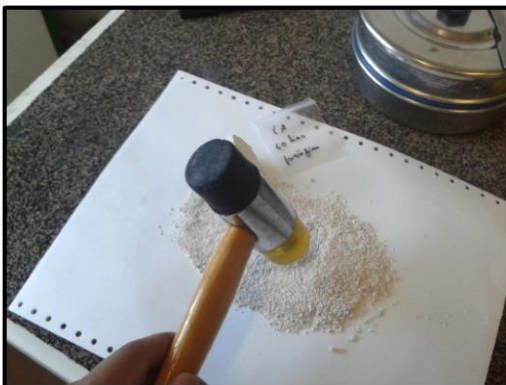


Figura 3.21 - Preparação da fração fina



Figura 3.22 - Passagem pelo peneiro de 106  $\mu\text{m}$

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



Figura 3.23 - Preparação da amostra



Figura 3.24 - Amostras para difração

### 3.6.2 Avaliação da pozolanicidade (Método de Chapelle)

O ensaio de Chapelle foi realizado de acordo com a norma NF P 18-513 e permite avaliar a atividade pozolânica do resíduo cerâmico. É um ensaio químico em solução aquosa, numa mistura de pozolana e cal, medindo-se a quantidade de hidróxido de cálcio consumida.

#### Equipamento

- Copo de INOX;
- Cadinhos de platina;
- Coluna de refrigeração;
- Termómetro eletrónico;
- Balança, com precisão de 0,0001g;
- Rolha de Cortiça;
- Espátula metálica;

#### Reagentes

- Carbonato de cálcio;
- Água destilada sem CO<sub>2</sub>;
- Sacarose (açúcar granulado);
- Ácido Clorídrico (HCl 0,1M);
- Indicador de Fenolftaleína;

### Procedimento

O procedimento indicado em baixo é realizado duas vezes, sendo que numa delas não se adiciona o resíduo cerâmico, correspondendo à solução em branco.

- 1) Coloca-se o resíduo cerâmico na estufa a 40°C durante 24 horas;
- 2) Preparação do Óxido de Cálcio (CaO):
  - Pesam-se 3,6g de Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e colocam-se no cadinho de platina;
  - Coloca-se o conjunto na mufla a 1000°C durante 30 minutos (*Figura 3.25*);  $CaCO_3 \xrightarrow{\Delta_t=1000^\circ C} CaO + CO_2$
  - Retira-se o conjunto na mufla e coloca-se no exsiccador (*Figura 3.26*);
  - Verifica-se a perda de massa em 44%± 0,1 correspondentes ao CO<sub>2</sub>.
- 3) Pesa-se 1 g de resíduo cerâmico e coloca-se no copo de INOX (não se adiciona o resíduo para a solução em branco);
- 4) Adicionam-se 250 ml de água isenta de CO<sub>2</sub> e de seguida colocam-se 2 g do CaO preparado anteriormente;
- 5) Liga-se o agitador magnético, mantendo a solução em agitação constante a uma temperatura de 85±5°C durante 16 horas;
- 6) Arrefece-se a solução até à temperatura ambiente (*Figura 3.30*);
- 7) Pesam-se 60 g de sacarose, misturando com 250 ml de água;
- 8) Adiciona-se a solução açucarada à solução preparada anteriormente e agita-se durante 15 minutos;
- 9) Prepara-se o sistema de filtração a vácuo e filtram-se 200 ml de solução (*Figura 3.32*);
- 10) Colocam-se 25 ml de solução no erlenmeyer, juntamente com 3 gotas de indicador de fenolftaleína;
- 11) Realiza-se a titulação ácido-base medindo a quantidade de HCl 0,1 M necessário;
- 12) Proceda-se à validação do branco através da seguinte inequação:

$$\frac{56}{2} \times V_1 < 1000 \quad (\text{Equação 3.1})$$

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Onde:

- V1 – volume de HCl 0,1 M obtido para a solução em branco.

13) Calcula-se a quantidade de hidróxido de Cálcio gasto através da seguinte expressão:

$$2 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \frac{74}{56} \times 1000 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

- V1 – volume de HCl 0,1 M obtido para a solução em branco;
- V2 – volume de HCl 0,1 M obtido para a mistura.

O ensaio acima descrito é repetido 3 vezes tanto para a solução em branco como para a mistura, devendo ser obtida uma variação máxima de 10 % entre resultados.



Figura 3.25 - Colocação dos cadinhos na mufla



Figura 3.26 - Cadinhos no exsiccador



Figura 3.27 - Pesagem do CaO



Figura 3.28 - Agitação da solução



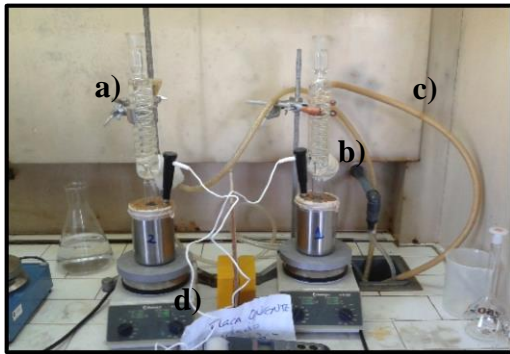


Figura 3.29 - Equipamento: a) coluna de refrigeração; b) entrada de água; c) saída de água; d) placa de aquecimento



Figura 3.30 - Arrefecimento até à temperatura ambiente



Figura 3.31 - Pesagem da sacarose



Figura 3.32 - Filtragem a vácuo



Figura 3.33 - Titulação

### 3.6.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi efetuada às areias e de acordo com a norma de ensaios EN 1015-1 (1998). Todo o resíduo cerâmico utilizado apresenta granulometrias inferiores a 75  $\mu\text{m}$ .

#### Equipamento

- Série de peneiros com abertura de 0,074-0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5 [mm];
- Agitador mecânico;
- Balança com precisão de 0,1g.

### **Procedimento**

- 1) Colocam-se os peneiros por ordem decrescente de abertura da malha no sentido descendente;
- 2) Introduce-se o material a peneirar no peneiro com maior abertura de malha;
- 3) Colocam-se os peneiros em agitação mecânica durante 5 minutos;
- 4) Pesa-se a massa retida em cada um dos peneiros;
- 5) Determina-se a percentagem de material retido através da equação:

$$\%retida = \frac{m_{retida}}{m_{total}} \times 100 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

$m_{retida}$  – massa retida em cada peneiro [g];

$m_{total}$  – massa total da amostra inserida nos peneiros [g].

- 6) Uma vez determinadas as percentagens de material retido em cada peneiro, calculam-se as percentagens acumuladas de material retido e passado, procedendo-se seguidamente ao traçado da curva granulométrica.

## **3.7 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO**

### **3.7.1 Consistência por espalhamento**

O ensaio de consistência por espalhamento permite avaliar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco. A consistência por espalhamento traduz o valor da fluidez da argamassa, medindo a sua deformabilidade quando sujeita a uma determinada solicitação. O valor de espalhamento pretendido é de  $150 \pm 5$  mm, garantindo-se desta forma a facilidade de aplicação. Este valor de espalhamento é inferior ao recomendado para argamassas de cimento, uma vez que as argamassas de cal são mais trabalháveis. A obtenção do espalhamento pretendido resulta de um processo iterativo onde se varia a quantidade de água de amassadura, seguindo a metodologia de ensaio definida na norma EN 1015-3 (1999).

### **Equipamento**

Para a realização do ensaio é necessário o seguinte equipamento:

- Mesa de espalhamento;

- Colher de Pedreiro;
- Molde Cônico;
- Pilão;
- Craveira.

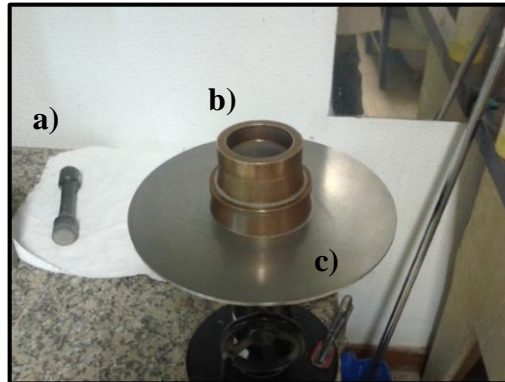


Figura 3.34 -Equipamentos: a) pilão; b) molde cônico; c) mesa de espalhamento

### **Procedimento**

- 1) Limpa-se a superfície da mesa com um pano seco;
- 2) Posiciona-se o molde no centro da mesa de espalhamento;
- 3) Enche-se o molde em duas camadas, compactando-as com 10 pancadas do pilão, obtendo-se uma superfície com distribuição uniforme;
- 4) Retira-se a alonga e rasa-se a superfície com o auxílio da colher de pedreiro;
- 5) Retira-se o molde;
- 6) Roda-se a manivela da mesa de espalhamento, por forma a perfazer 15 rotações com a frequência de uma por segundo;
- 7) Mede-se o espalhamento em duas direções ortogonais entre si, utilizando a craveira.

## **3.8 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO**

### **3.8.1 Massa volúmica aparente no estado endurecido**

O cálculo da massa volúmica aparente no estado endurecido é feito seguindo o procedimento descrito na norma EN 1015-10 (1999), com exceção da determinação do volume dos provetes, o qual foi conseguido através de cálculo geométrico.

### **Equipamento**

- Balança com precisão de 0,01g;
- Craveira digital.

### Procedimento

- 1) Realiza-se 1 medição da dimensão longitudinal do provete e 3 medições (uma em cada ponta e uma ao centro) da largura e da altura do provete. A medida final da largura e da altura resulta da média dos 3 valores obtidos (*Figura 3.31*);
- 2) Pesa-se o Provete;
- 3) Calcula-se o volume de cada um dos provetes através da seguinte expressão:

$$V = c \times l \times a \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

- V – volume do prisma [mm<sup>3</sup>];
- c – comprimento do provete [mm];
- l – largura média do provete [mm];
- a – altura média do provete [mm].

- 4) Calcula-se a massa volúmica através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde:

- $\rho$  – massa volúmica aparente [g/mm<sup>3</sup>];
- m – massa do provete [g];
- V – volume do provete [mm<sup>3</sup>].



Figura 3.35 - Medição da dimensão longitudinal

### 3.8.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é uma medida de rigidez, que traduz a capacidade de absorção de tensões.

O ensaio consiste na medição da frequência própria de vibração longitudinal de um provete, sendo o módulo de elasticidade função dessa frequência.

A metodologia de ensaio segue o definido na NF B10-511 (1975).

#### **Equipamento**

O equipamento de ensaio emite vibração aos provetes prismáticos medindo a frequência de ressonância, a qual pode ser visualizada no software específico. Assim sendo são necessários os seguintes equipamentos:

- Craveira;
- Equipamento para determinação de frequências fundamentais;
- Software para processamento de dados.

#### **Procedimento**

- 1) Introduzem-se os dados correspondentes ao peso e dimensões do provete no software de ensaio;
- 2) Coloca-se o provete a ensaiar no suporte do equipamento de medição e aproximam-se as suas extremidades da fonte emissora e da unidade de receção;
- 3) Liga-se o oscilador de frequência, que transmite uma vibração ao provete, e verifica-se a frequência e amplitude no software de ensaio;
- 4) Através da análise da representação gráfica obtém-se o valor da frequência fundamental de ressonância, que corresponde ao valor mínimo de frequência para o qual se dá uma amplitude máxima;
- 5) Calcula-se o valor do módulo de elasticidade através da seguinte expressão:

$$Med = \frac{4L^2 \times F^2 \times \rho}{g} \times 10^{-6} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

- Med – Módulo de elasticidade dinâmico [MPa];
- L - Comprimento do provete [m];

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- $F$  – Frequência de ressonância longitudinal [Hz];
- $\rho$  – Massa volúmica do provete [ $\text{N}/\text{m}^3$ ];
- $g$  – Aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

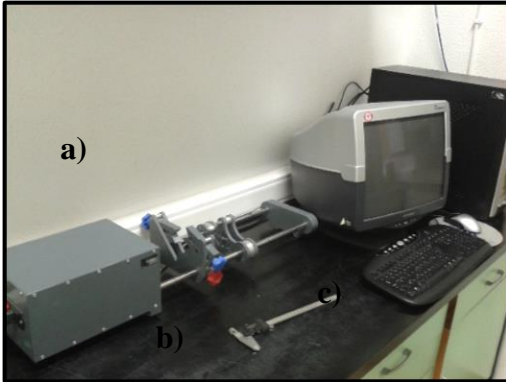


Figura 3.36 - Equipamentos: a) equipamento de medição de frequências; b) craveira; c) software de processamento de dados.

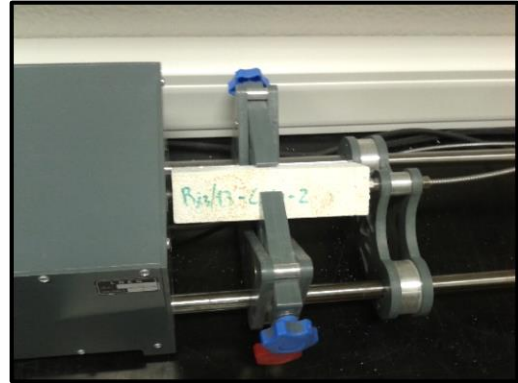


Figura 3.37 - Provete no suporte do equipamento de medição

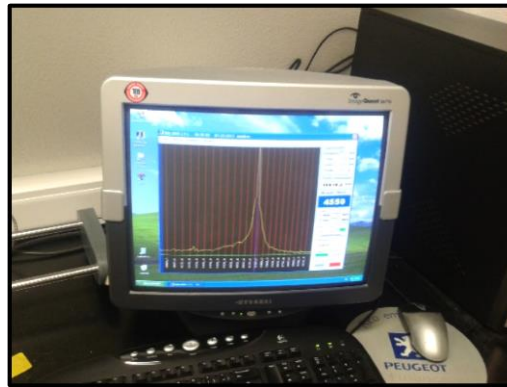


Figura 3.38 - Representação Gráfica

### 3.8.3 Resistência à flexão e compressão

Os ensaios de determinação da resistência à flexão e compressão permitem aferir a capacidade resistente das argamassas em estudo. As resistências são determinadas levando os provetes à rotura, através da aplicação de cargas gradualmente crescentes, obtendo-se desta forma a tensão de rotura.

O ensaio segue a Norma Europeia EN 1015-11 (1999).

#### Equipamento

- Prensa de ensaios universal (EQE 89);



Figura 3.39 - Prensa de ensaios universal

### 3.8.3.1 Resistência à flexão

#### Procedimento

- 1) Introduzem-se os dados do provete no software de análise;
- 2) Coloca-se o provete na prensa, por forma a ficar centrado e perpendicular aos apoios;
- 3) Aplica-se gradualmente a carga a meio vão, com uma velocidade entre os 10 e os 50 N/s, por forma a ocorrer rotura entre os 30 e os 90s. Caso a rotura não se dê neste intervalo deve ser alterada a velocidade de aplicação da carga;
- 4) Regista-se o valor da força máxima aplicada e calcula-se o valor da resistência à flexão através da seguinte expressão:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b \times d^2} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde:

- $R_f$  – resistência à flexão [MPa];
- $F_f$  – Força máxima aplicada [N];
- $l$  – distância entre apoios [mm];
- $b$  – largura do prisma [mm];
- $d$  – espessura do prisma [mm].



Figura 3.40 - Apoios para o ensaio de flexão

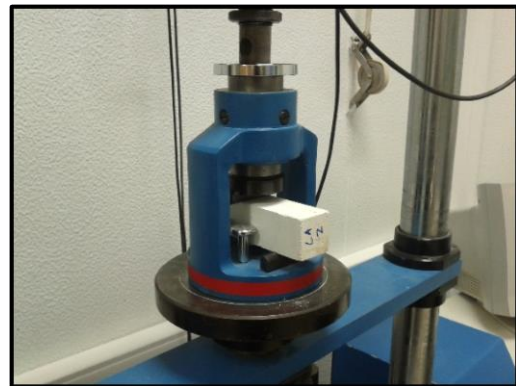


Figura 3.41 - Aplicação da carga

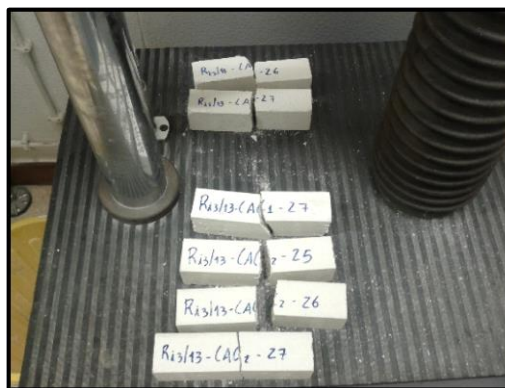


Figura 3.42 - Rotura a meio vão

### 3.8.3.2 Resistência à compressão

Após a rotura dos provetes quando submetidos ao ensaio de flexão, resultam 2 metades que são utilizadas para o ensaio de compressão.

#### Procedimento

- 1) Coloca-se o suporte para ensaios de compressão;
- 2) Colocam-se as metades dos provetes na prensa com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de aplicação da carga;
- 3) Aplica-se gradualmente a força, com uma velocidade de aplicação de 100 N/s até ser atingida a tensão de rotura, a qual deverá ocorrer entre os 30 e os 90 segundos;
- 4) Regista-se o valor da força máxima aplicada e calcula-se o valor da resistência à flexão através da seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_f}{A} \quad (\text{Equação 3.8})$$



Onde:

- $R_c$  – Resistência à compressão [Mpa];
- $F_c$  – força máxima aplicada [N];
- $A$  – área da secção [ $\text{mm}^2$ ].



Figura 3.43 - Aplicação da carga

### 3.8.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade mede o acréscimo de massa de água que ascende por capilaridade, ao longo do tempo, pela secção do provete que se encontra em contacto com a água.

O procedimento de ensaio segue o definido na norma EN 1015-18 (2002), e tem como principal objetivo a determinação do coeficiente de capilaridade.

#### Equipamento

- Régua graduada;
- Craveira;
- Balança com precisão de 0,01g;
- Cronómetro.

#### Procedimento

- 1) Realiza-se 1 medição da dimensão longitudinal do provete e 3 medições (uma em cada ponta e uma ao centro) da largura e da altura do provete. A medida final da largura e da altura resulta da média dos 3 valores obtidos;
- 2) Pesa-se a massa inicial de cada provete ( $t=0$  minutos);

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- 3) Colocam-se os provetes numa tina com 1 cm de água acima da face inferior do provete;
- 4) Pesagem dos provetes aos 10 min, 30min, 60 min, 90 min, 180min, 300 min, 480 min, 1440 min. Após o primeiro dia de ensaio, as pesagens deverão ser efetuadas com uma frequência diária até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,1% da massa inicial.
- 5) Calcula-se a massa absorvida por unidade de área, em cada instante, através da seguinte expressão:

$$M_a = \frac{M_i - M_0}{S} \quad (\text{Equação 3.9})$$

Onde:

- $M_a$  – Massa absorvida por unidade de área [ $\text{Kg}/\text{m}^2$ ];
  - $M_i$  – Massa do provete no instante  $i$  [ $\text{Kg}$ ];
  - $M_0$  – Massa do provete no instante inicial [ $\text{Kg}$ ];
  - $S$  – Área da face do provete [ $\text{m}^2$ ].
- 6) Representa-se graficamente a relação entre a absorção capilar [ $\text{Kg}/\text{m}^2$ ] e os períodos de tempo [ $\text{min}^{1/2}$ ], obtendo-se a curva de absorção;
  - 7) Determina-se o valor do coeficiente de absorção capilar através da seguinte expressão:

$$C_c = 0,1 \times (M_{90} - M_{10}) \quad (\text{Equação 3.10})$$

Onde:

- $C_c$  – Coeficiente de absorção capilar [ $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ];
- $M_{10}$  – Massa do provete aos 10 minutos [ $\text{g}$ ];
- $M_{90}$  – Massa do provete aos 90 minutos [ $\text{g}$ ].



Figura 3.44 - Tina de ensaio

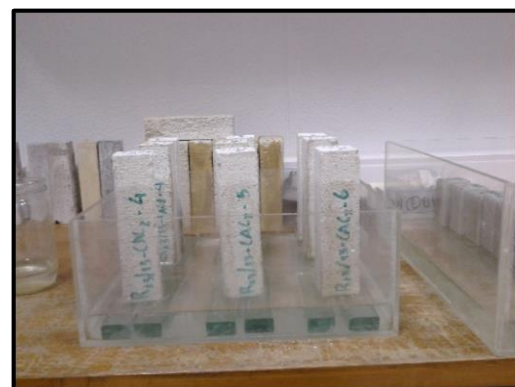


Figura 3.45 - Provetes no interior da tina com água

### 3.8.5 Ensaio de secagem

O ensaio de secagem é feito logo após o ensaio de absorção de água por capilaridade, utilizando os mesmos prismas do ensaio anterior. Este ensaio permite verificar a capacidade de secagem da água em excesso, pelo que se pretende avaliar a influência da incorporação dos resíduos cerâmicos na rapidez de secagem das argamassas de revestimento.

#### Equipamento

- Balança com precisão de 0,01g;
- Apoios de vidro para os provetes.

#### Procedimento

- 1) Realiza-se a última medição do ensaio de absorção de água por capilaridade e retiram-se os provetes da tina, colocando-os nos apoios;
- 2) Realizam-se pesagens aos 30 min, 60 min, 90 min, 270 min, 450 min e 1440 min. Após o primeiro dia de ensaio realizam-se pesagens com frequência diária até se atingir massa constante.



Figura 3.46 - Provetes em secagem

### 3.8.6 Aderência ao Suporte (Pull-off)

A aderência ao suporte é uma característica que assume grande importância nas argamassas de revestimento. O ensaio consiste na determinação da força de aderência a partir da tensão máxima aplicada por tração direta perpendicular a superfície da argamassa. A metodologia de ensaio segue o definido na norma EN 1015-12 (2000).

### Equipamento

- Máquina caroteadora;
- Acessórios de arrancamento;
- Pastilhas com 50 mm;
- Resina epoxídica.

### Procedimento

- 1) Nos tijolos rebocados através do procedimento descrito em 3.5.3, realizam-se as marcações dos locais onde serão feitos os entalhes;
- 2) Realizam-se os entalhes circulares com o auxílio da máquina caroteadora, limpando de seguida as zonas de teste (*Figura 3.47*);
- 3) Colam-se as pastilhas circulares nas zonas de ensaio com a resina epoxídica, deixando secar durante 24 horas (*Figura 3.48*);
- 4) Aplica-se a força de tração ortogonal à pastilha, com o aparelho de arrancamento;
- 5) Regista-se o valor e analisa-se o tipo de rotura ocorrida. A rotura pode ocorrer de 3 tipos diferentes:
  - Rotura do tipo adesivo – ocorre na interface entre a argamassa e o suporte;
  - Rotura do tipo coesivo – ocorre na zona interna do reboco ou do suporte;
  - Cedência na zona colada entre a pastilha e a argamassa – ensaio inválido.
- 6) A tensão de cedência é dada por:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Onde:

- $f_u$  – tensão de aderência [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ];
- $F_u$  – carga de rotura [ $\text{N}$ ];
- $A$  – área de contacto entre a pastilha e o reboco [ $\text{mm}^2$ ].



Figura 3.47 - Realização dos carotes

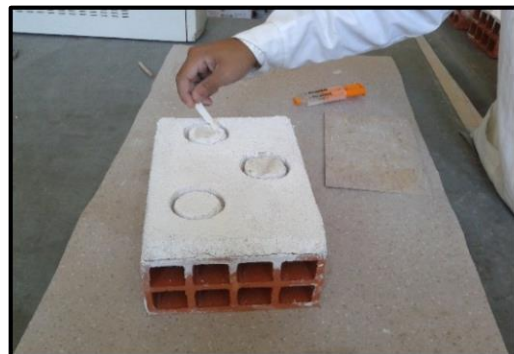


Figura 3.48 - Colagem das Pastilhas



Figura 3.49 - Acessório de Arrancamento



Figura 3.50 - Rotura após ensaio

### 3.8.7 Ensaio de Permeabilidade à água (Tubos de Karsten)

O ensaio de permeabilidade à água permite extrair informação ao nível da porosidade dos revestimentos, determinando-se a quantidade de água absorvida numa dada área ao longo do tempo. O ensaio foi realizado nos tijolos preparados de acordo com o procedimento descrito em 3.5.3, tendo sido feitas 3 medições para cada tijolo. O procedimento de ensaio segue o definido na norma EN-1015-21.

#### Equipamento

- Tubos de Karsten;
- Cronómetro;
- Mástique.

#### Procedimento

- 1) Definem-se as zonas a ensaiar;
- 2) Fixam-se os tubos aos tijolos com mástique, isolando a zona de contacto entre os tubos e o suporte (*Figura 3.52*);
- 3) Coloca-se a água nos tubos até ao 0 cm<sup>3</sup> e realizam-se as medições aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos;
- 4) Calcula-se para cada instante de leitura o coeficiente médio de absorção expresso através da seguinte expressão:

$$C_{abs} = \frac{m}{A} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

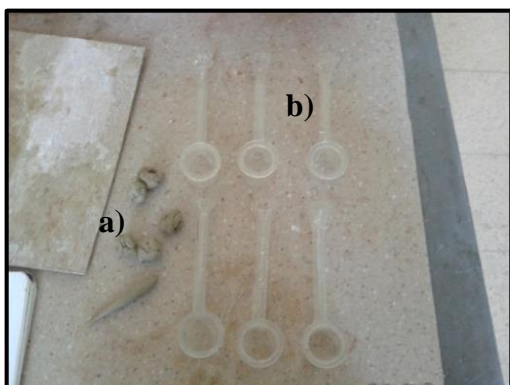
$C_{abs}$  – coeficiente médio de absorção [g/cm<sup>3</sup>]

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

$m$  – massa de água absorvida em cada instante [g];

$A$  – área de absorção [ $\text{cm}^2$ ].



**Figura 3.51 - Equipamentos: a) mástique; b) tubos de Karsten**



**Figura 3.52 - Fixação dos tubos de Karsten**

**4 APRESENTAÇÃO DOS  
RESULTADOS**





## 4.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo procede-se à apresentação dos resultados obtidos durante toda a campanha experimental, descrita anteriormente no terceiro capítulo. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos e tabelas, permitindo desta forma a sua fácil compreensão e análise. São referidos para cada ensaio os aspetos negativos e positivos resultantes da incorporação dos resíduos cerâmicos, em substituição parcial do ligante, bem como do tipo de cura, em meio laboratorial controlado ou em ambiente natural marítimo. Para cada ensaio e por cada formulação de argamassa foram realizados três provetes, com os quais se determinou a média aritmética entre os resultados.

Importa referir que as siglas CA referem-se às argamassas constituídas por cal e areia, as siglas CAC1 referem-se às argamassas com 20% de substituição pelo pó cerâmico e as siglas CAC2 referem-se às argamassas com 40 % de substituição pelo pó cerâmico.

Todos os dados resultantes da realização dos ensaios podem ser consultados com maior detalhe nos anexos.

## 4.2 ENSAIOS AOS CONSTITUINTES

### 4.2.1 Análise por difração raios X

O ensaio de difração de raios X foi efetuado ao resíduo cerâmico, seguindo o procedimento descrito em 3.6.1. Este ensaio permitiu obter informação acerca dos compostos cristalinos presentes nas amostras, com base em difractogramas conhecidos.

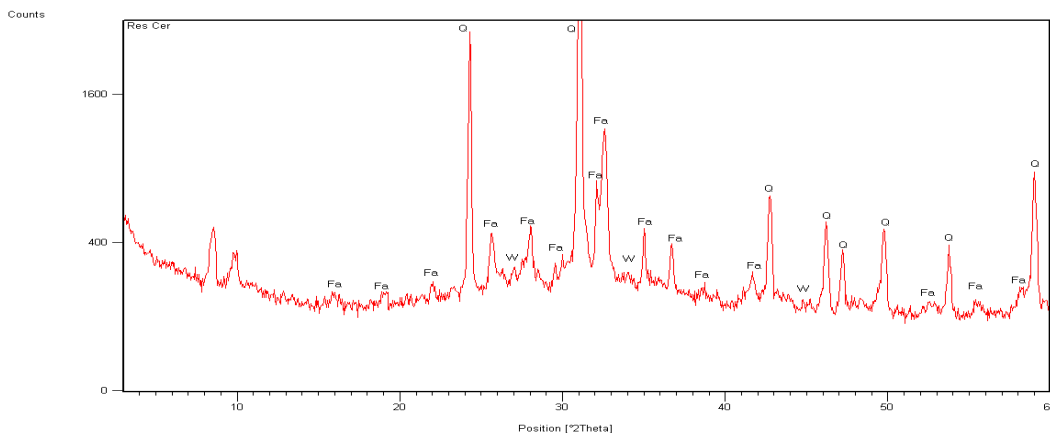


Figura 4.1 - Difractograma do resíduo cerâmico: Q - quartzo; Fa – feldspato sódico; W – wollastonite.

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Pela análise da *figura 4.1* pode-se afirmar que o resíduo cerâmico é composto maioritariamente por quartzo, apresentando ainda na sua composição feldspato sódico e wollastonite, sendo expectável o aumento do teor de quartzo nas argamassas com maior percentagem de substituição.

### 4.2.2 Análise Granulométrica

Tal como referido em 3.6.3 a análise granulométrica foi efetuada de acordo com a norma de ensaio EN 1015-1 (1998). Na *tabela 4.1* e na *figura 4.1* é apresentada a distribuição granulométrica da areia utilizada ao longo do trabalho experimental.

Tabela 4.1 -Distribuição granulométrica da areia

Identificação da amostra	Areia tejo	
	% Material retido	% Material passado
5	0,51	99,49
2,5	1,12	98,37
1,25	10,69	87,68
0,63	47,79	39,89
0,315	35,36	4,53
0,16	4,37	0,16
0,074	0,08	0,08
0	0,08	0,00

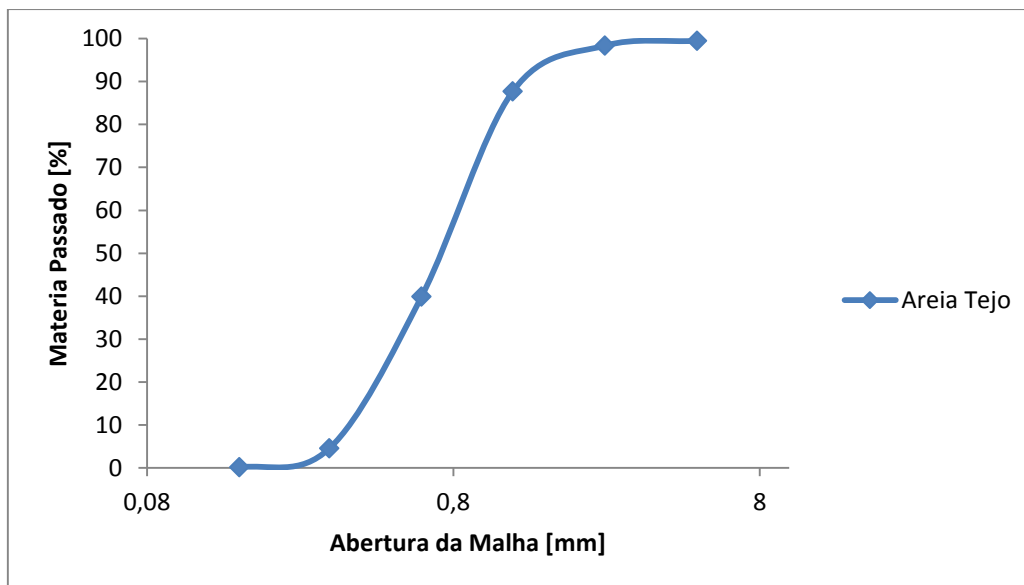


Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia do Rio Tejo

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Pela análise da *tabela 4.2* verifica-se que a areia utilizada apresenta uma granulometria contínua, caracterizada pela existência de grãos distribuídos por todas as dimensões.

### 4.2.3 Avaliação da pozolanicidade (Método de Chapelle)

Por forma a avaliar a atividade pozolânica do resíduo cerâmico foi utilizado o método de Chapelle, cujo procedimento se encontra descrito em 3.6.2. Os resultados do ensaio são expressos em mg de hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  consumidos por 1 grama de resíduo cerâmico. Os resultados obtidos foram comparados com o valor padronizado de 700 mg de consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , apresentados na norma de ensaio para os metacaulinos. A *tabela 4.2* apresenta os valores obtidos no ensaio.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de Chapelle

Elemento	Ensaio	Consumo em mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Resíduo Cerâmico	1	333,75
	2	366,16

Pela análise do quadro podemos concluir que o pó cerâmico apresenta valores de reatividade bastante inferiores aos valores padrão definidos na norma (para metacaulinos), pelo que não evidencia grande reatividade pozolânica.

Para induzir reatividade pozolânica a cozedura deve ser efetuada a uma temperatura que destrua as ligações químicas, mas que não seja suficientemente alta para proporcionar novas fases cristalinas. Os minerais, principais responsáveis pela formação da fase amorfa e reativa libertam a água absorvida a cerca de  $100^\circ\text{C}$ , e desidroxilam entre os  $500^\circ\text{C}$  e os  $600^\circ\text{C}$ . Entre os  $800^\circ\text{C}$  e os  $1000^\circ\text{C}$  dá-se a nucleação de novas fases cristalinas (Velosa, 2006).

A elevada temperatura de cozedura a que os azulejos foram submetidos, superiores a  $1000^\circ\text{C}$ , não favorece a reatividade pozolânica.

### 4.3 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

#### 4.3.1 Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento permite avaliar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco e foi realizado de acordo com o descrito em 3.7.1. O ensaio teve como principal objetivo a determinação da quantidade de água necessária por forma a garantir um espalhamento de  $150 \pm 5$  mm.

A determinação da quantidade de água necessária à realização das amassaduras permitiu extrair informações acerca da influência das substituições efetuadas na trabalhabilidade das argamassas.

Tabela 4.3 - Quantidade de água e valores de espalhamento

Argamassas	Quantidade de água [ml]	Espalhamento [mm]	Espalhamento médio [mm]
CA	712	154	154,5
		155	
CAC <sub>1</sub>	660	152	151,5
		151	
CAC <sub>2</sub>	600	153	152,5
		152	

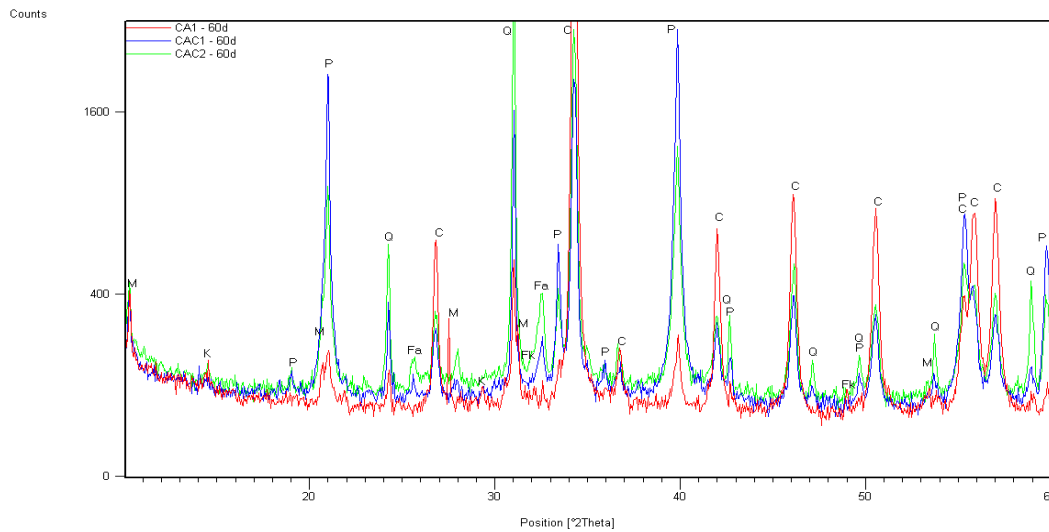
A análise à tabela anterior permite retirar algumas conclusões acerca da quantidade de água em relação à consistência pretendida. De facto, podemos concluir que as argamassas com substituição de cal pelo pó cerâmico têm menor necessidade de água para obtenção do espalhamento pretendido. Tal facto pode dever-se à maior superfície específica da cal em relação ao resíduo cerâmico.

### 4.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

#### 4.4.1 Análise por difração raios x

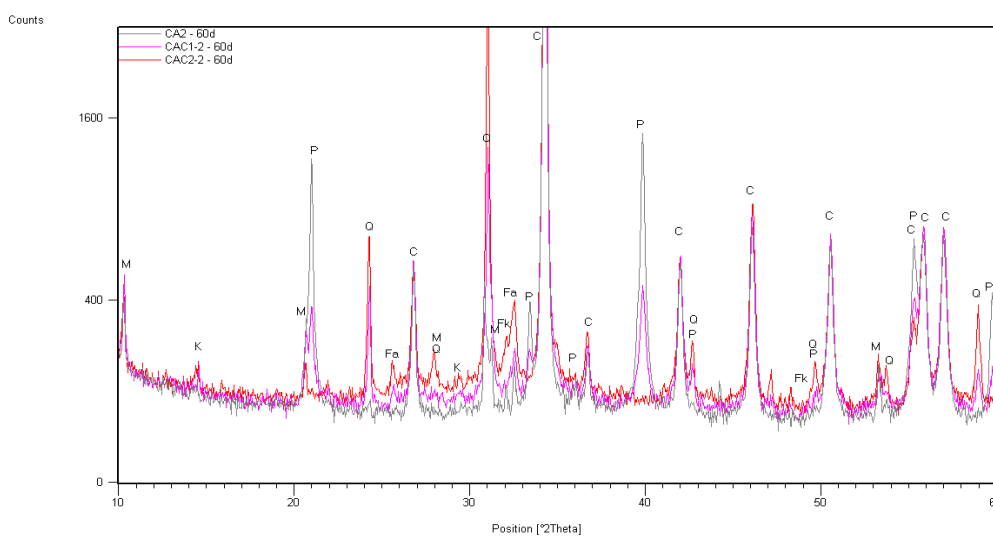
As figuras 4.3, 4.4 e 4.5 demonstram os difractogramas obtidos para as diversas composições de argamassa nos ambientes de cura laboratorial e marítimo.

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



**Figura 4.3 - Diffractogramas aos 60 dias em cura laboratorial: C – calcite; Q – quartzo; P – portlandite; Fk – feldspato potássico; Fa – Feldspato sódico; M – micas; K – caulinite.**

Ao analisar os diffractogramas obtidos aos 60 dias de idade em cura laboratorial, verifica-se que as argamassas de referência apresentam valores de calcite superiores às argamassas substituídas, em contrapartida a quantidade de portlandite é inferior. Os teores de quartzo das argamassas substituídas são significativamente superiores aos da argamassa de referência, resultado do elevado teor de quartzo do resíduo cerâmico. Pode ainda verificar-se a presença de micas, caulinite, feldspato sódico e potássico.

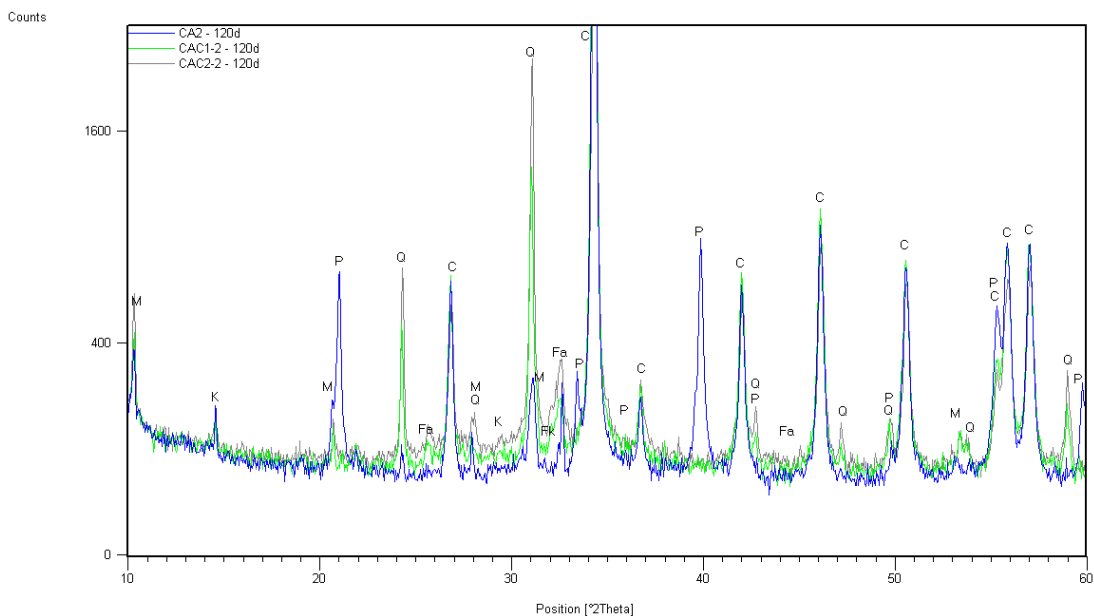


**Figura 4.4 - Diffractogramas aos 60 dias em cura marítima: C – calcite; Q – quartzo; P – portlandite; Fk – feldspato potássico; Fa – Feldspato sódico; M – micas; K – caulinite.**

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Os difractogramas realizados aos 60 dias para cura em ambiente marítimo apresentam bastantes diferenças em relação aos obtidos para cura laboratorial. As argamassas de referência apresentam quantidades de portlandite superiores às argamassas substituídas, contrariamente ao que se verificou para a cura laboratorial. Este aumento poderá estar relacionado com as diferentes condições de ocorrência do processo de carbonatação.

Em relação à quantidade de quartzo, as argamassas substituídas apresentam valores superiores, estando em conformidade com o que seria expectável. Existe também a presença de feldspato sódico e potássico, micas e caulinite em todas as composições. Contrariamente ao que se esperava para uma cura em ambiente marítimo, não se verificou a presença de sais solúveis.



**Figura 4.5 - Diffractogramas aos 120 dias em cura marítima**

Ao passar para os 120 dias de idade de cura, as argamassas submetidas a cura laboratorial apresentam teores de portlandite inferiores aos que se verificaram inicialmente aos 60 dias, e teores de calcite superiores. Este efeito está em conformidade com o esperado, correspondendo ao avanço da carbonatação.

Na cura em ambiente marítimo verifica-se igualmente o avanço da carbonatação, estando as argamassas com 40% de substituição completamente carbonatadas. Tal como nas argamassas aos 60 dias, não apresentam sais solúveis na estrutura porosa.

#### 4.4.2 Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica no estado endurecido foi efetuada de acordo com o descrito em 3.8.1, aos 60, 90 e 120 dias. Os resultados são apresentados de acordo com a cura a que os provetes estiveram sujeitos, com o objetivo de verificar a influência da mesma ao longo do tempo.

A tabela 4.4 e as figuras 4.6 e 4.7 demonstram os valores de massa volúmica para os diferentes tipos e idades de cura.

Tabela 4.4 - - Massas volúmicas [kg/m<sup>3</sup>]

Idade [dias]	Tipo de Cura	CA	CAC1	CAC2
60	Marítima	1702,86	1745,92	1775,51
	Laboratorial	1703,24	1705,39	1761,60
90	Marítima	1714,88	1747,56	1778,12
	Laboratorial	1708,09	1712,34	1772,31
120	Marítima	1728,52	1749,40	1769,02
	Laboratorial	1711,17	1728,66	1768,63

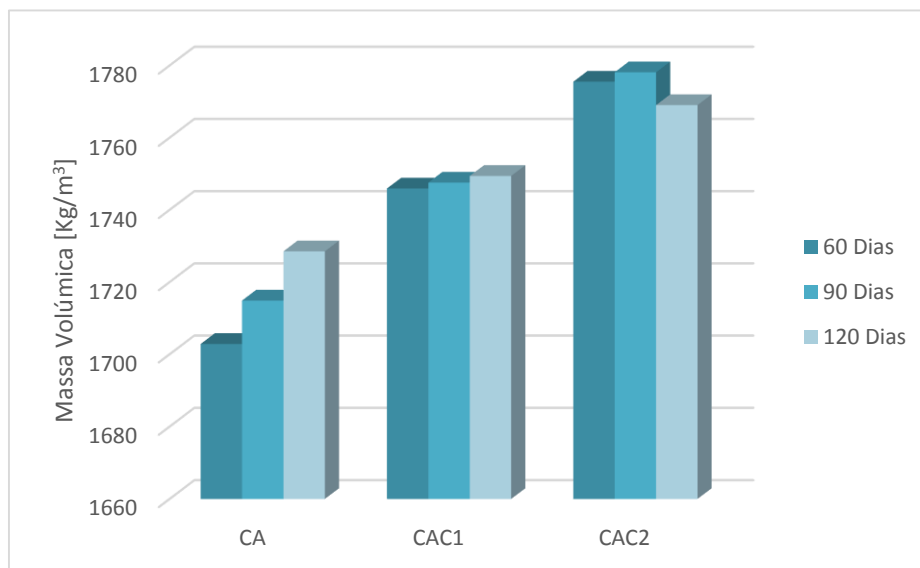


Figura 4.6 - Massa volúmica das argamassas em ambiente marítimo

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

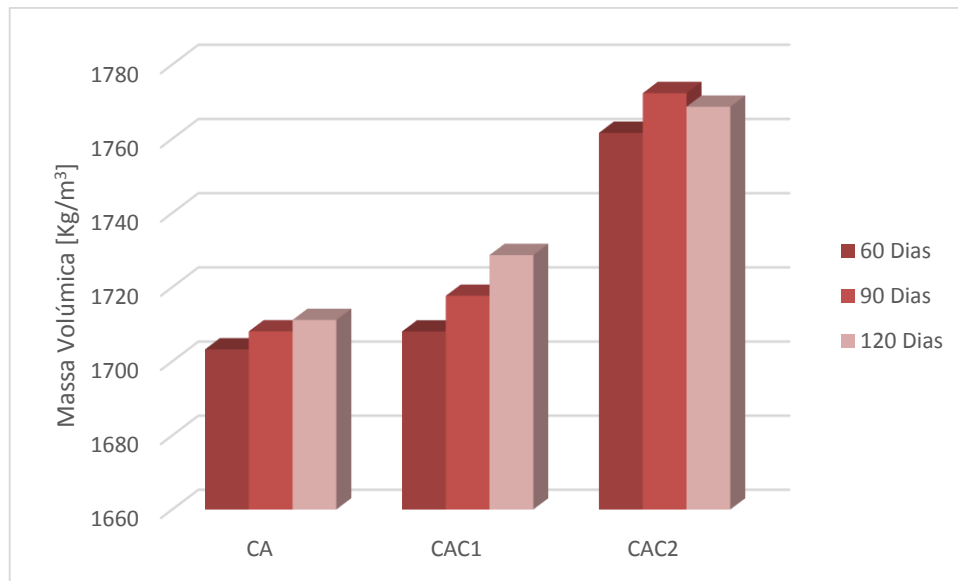


Figura 4.7 - Massa volúmica das argamassas em ambiente laboratorial

Pela análise dos gráficos podemos concluir que as argamassas com substituição apresentam massas volúmicas superiores às argamassas de referência, tanto em ambiente marítimo como em laboratório. Tal facto poderá ser causado pela substituição em massa do ligante pelo pó cerâmico, uma vez que este apresenta valores de massa volúmica superiores ao da cal e pelo aumento da compactidade provocado pelo preenchimento dos poros resultante do efeito de filler do pó cerâmico. Comparando as massas volúmicas das argamassas substituídas verifica-se que a percentagem de substituição em 40% apresenta valores superiores de massa volúmica, estando em conformidade com o esperado.

Em relação aos diferentes tipos de cura verifica-se que os provetes sujeitos a cura em meio marítimo apresentam valores ligeiramente superiores, os quais poderão estar associados a uma alteração da microestrutura, em resultado do tipo de cura.

Ao analisar a evolução ao longo do tempo verifica-se um aumento da massa volúmica com a idade de cura. Este fenómeno corresponderá à evolução do processo de carbonatação, havendo um aumento do carbonato de cálcio e consequentemente um aumento da massa volúmica uma vez que este é mais denso que a portlandite.



#### 4.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a rigidez das argamassas, extraindo informação acerca da sua capacidade de absorção de tensões. Tal como descrito em 3.8.2 o ensaio segue o definido na norma NF B10-511 (1975).

Na *tabela 4.5* e nas figuras 4.8 e 4.9 apresentam-se os valores médios obtidos no ensaio referente à determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 4.5 - Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]				
Idade [Dias]	Tipo de Cura	CA	CAC1	CAC2
60	Marítima	3293	4505	2611
	Laboratorial	2967	3639	3555
90	Marítima	4182	4836	2902
	Laboratorial	3097	4103	3806
120	Marítima	4458	4525	2752
	Laboratorial	2997	3955	3586

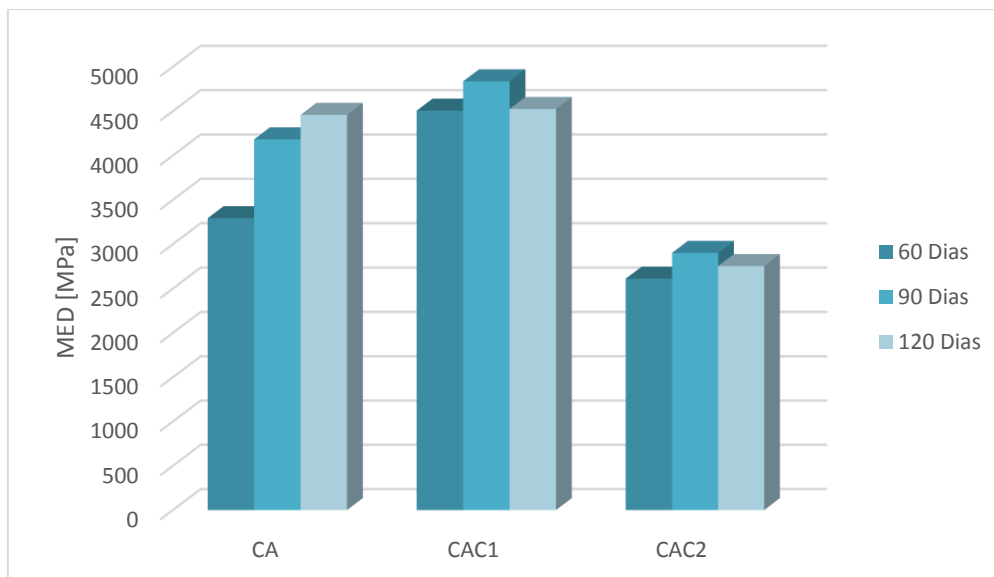
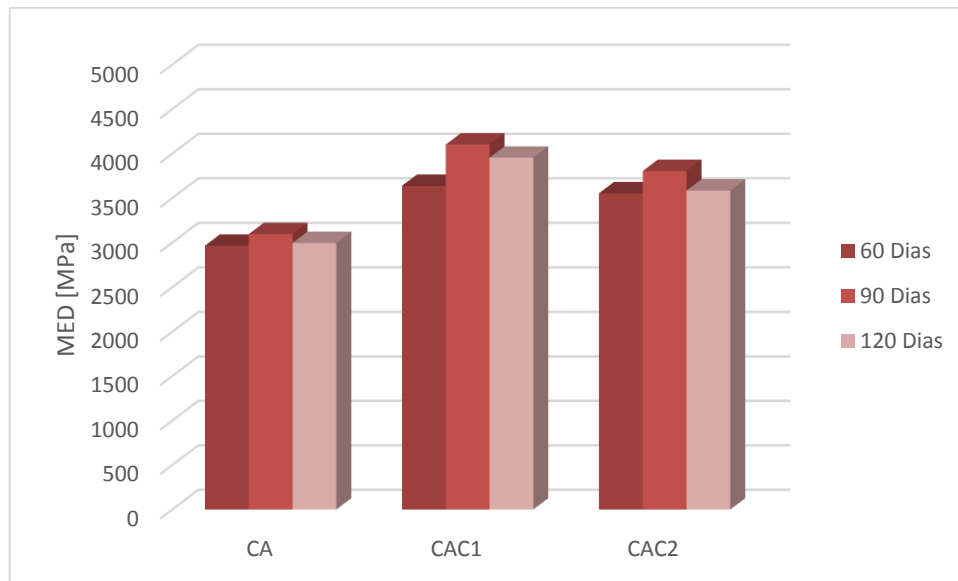


Figura 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em ambiente marítimo

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



**Figura 4.9 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em ambiente laboratorial**

Pela análise dos gráficos anteriores, conclui-se que o módulo de elasticidade dinâmico é superior nas argamassas com 20% de substituição do ligante pelo pó cerâmico, atingindo valores próximos de 5000 MPa. Todos os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos estão em conformidade com os valores genéricos recomendados apresentados em 2.2.4 de acordo com Veiga (2001), que variam entre os 2000 e os 5000 MPa.

Durante a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, observou-se alguma dificuldade em encontrar a curva mais adequada, havendo em alguns casos grande oscilação de valores. Estas oscilações podem ter origem em irregularidades existentes no interior e no exterior dos prismas.

Ao comparar os valores obtidos de acordo com o tipo de cura, verifica-se um aumento do módulo de elasticidade dos provetes sujeitos a cura em ambiente marítimo, para as argamassas de referência e com 20% de substituição, o qual poderá ser causado por alterações na microestrutura em resultado do ambiente de cura.

Nas argamassas com 40% de substituição observa-se que o módulo de elasticidade dinâmico é bastante superior em cura laboratorial. Esta diferença de valores pode estar associada à degradação dos provetes, a qual foi bastante visível durante a realização do ensaio.

A *figura 4.10* apresenta a síntese dos valores de MED obtidos para todas as idades e meios de cura.

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

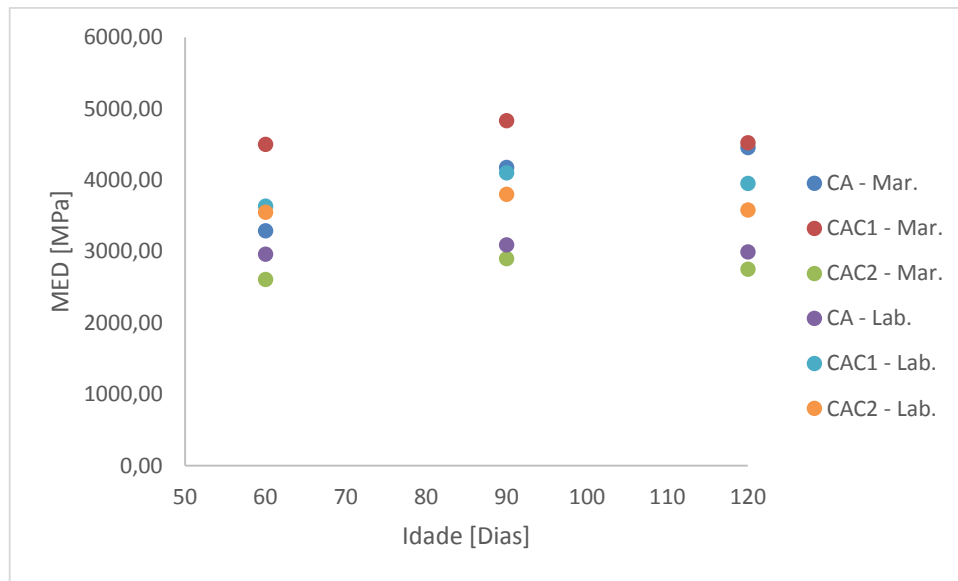


Figura 4.10 - Gráfico síntese do MED

As argamassas com 20% de substituição são menos deformáveis do que as de referência e com 40% de substituição, uma vez que apresentam módulos de elasticidade dinâmicos superiores sendo expectável a obtenção de valores de resistência mecânica superiores para essas argamassas.

### 4.4.4 Resistência à flexão e compressão

As resistências à flexão e à compressão são parâmetros de extrema importância na avaliação de uma argamassa de revestimento. Tal como descrito em 3.8.3 os ensaios seguem o definido na norma EN 1015-11 (1999). A realização destes ensaios permitiu extrair informação acerca da influência da introdução do resíduo cerâmico nas formulações de argamassa, bem como do tipo de cura a que os provetes foram sujeitos.

O processo de carbonatação é lento, podendo as condições atmosféricas desfavoráveis interferir no processo. Quanto maior for a presença de hidróxido de cálcio nas argamassas, menor será o grau de carbonatação, estando por isso a argamassa mais fraca.

#### 4.4.4.1 Resistência à tração por flexão

O ensaio para determinação da resistência à flexão foi realizado aos 60, 90 e 120 dias, sendo os resultados médios apresentados na *tabela 4.6* e nas *figuras 4.11* e *4.12*.

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Tabela 4.6 - Resistência à flexão [MPa]

Resistência à Flexão [MPa]				
Idade [Dias]	Tipo de Cura	CA	CAC1	CAC2
60	Marítima	0,73	0,89	0,30
	Laboratorial	0,28	0,68	0,52
90	Marítima	0,63	0,62	0,19
	Laboratorial	0,25	0,58	0,48
120	Marítima	0,72	0,64	0,20
	Laboratorial	0,50	0,82	0,55

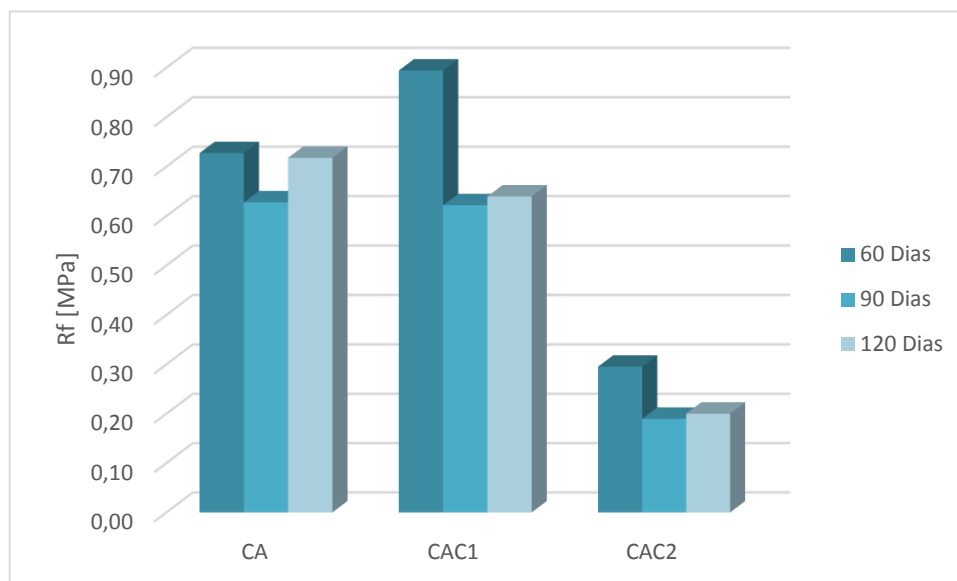


Figura 4.11 - Resistência à flexão das argamassas em ambiente marítimo

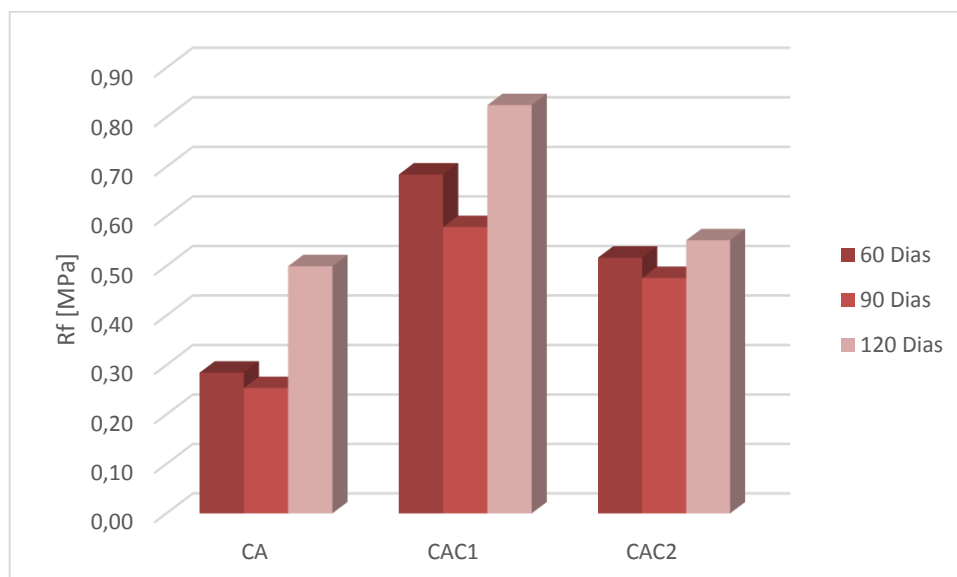


Figura 4.12 - Resistência à flexão das argamassas em ambiente laboratorial

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

Pela análise dos dados relativos à resistência à tração por flexão não existe, aparentemente, um padrão de comportamento quer no que respeita ao tipo de cura, quer relativamente ao tempo de cura.

Numa primeira análise pode-se verificar que as argamassas CAC1 (20% de substituição do ligante pelo pó cerâmico) apresentam valores de resistência à flexão superiores às restantes composições ao longo das várias idades e condições de cura. De facto esta composição apresenta, em alguns casos, valores superiores aos padronizados por Veiga (2001) que variam entre 0,2 e 0,7 MPa.

Este aumento de resistência dever-se-á ao efeito de filler, uma vez que a reatividade pozolânica determinada anteriormente é bastante fraca.

Ao passar dos 60 para os 90 dias existe uma diminuição da resistência em todas as composições, seguida de um novo aumento aos 120 dias.

As argamassas de referência apresentam resistências superiores em ambiente natural para as várias idades de cura, podendo estas alterações estar associadas a alterações na microestrutura das argamassas.

As argamassas com 40% de substituição apresentam valores de resistência bastante inferiores em ambiente marítimo. Tal deve-se ao estado de degradação visível na altura da realização dos ensaios, verificando-se em alguns casos perdas de massa.

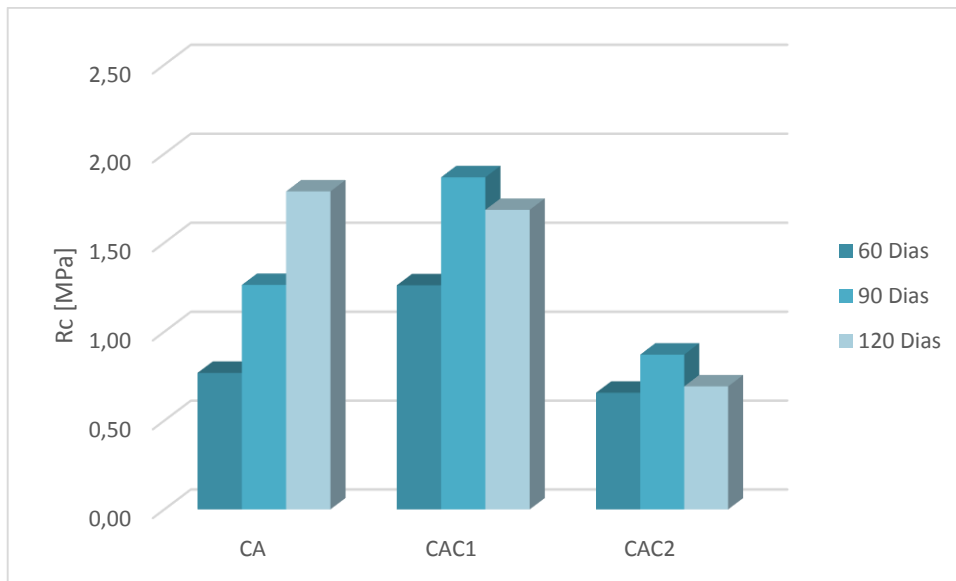
### 4.4.4.2 Resistência à compressão

O ensaio para determinação da resistência à compressão foi realizado aos 60, 90 e 120 dias sendo os resultados médios apresentados na *tabela 4.7* e nas *figuras 4.13* e *4.14*.

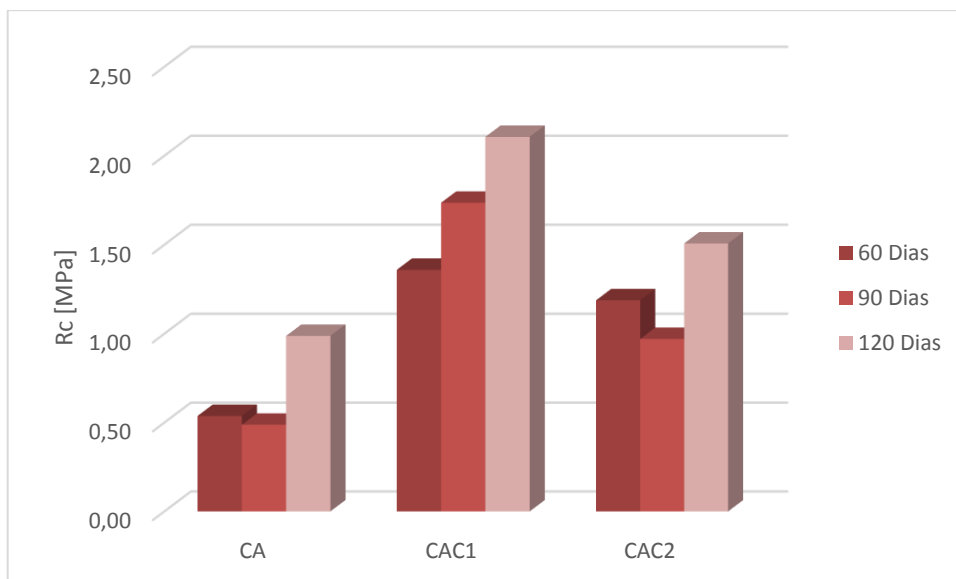
Tabela 4.7 - Resistência à compressão [MPa]

Resistência à Compressão [MPa]				
Idade [Dias]	Tipo de Cura	CA	CAC1	CAC2
60	Marítima	0,77	1,26	0,66
	Laboratorial	0,54	1,36	1,19
90	Marítima	1,26	1,87	0,87
	Laboratorial	0,49	1,74	0,97
120	Marítima	1,79	1,68	0,69
	Laboratorial	0,99	2,11	1,51

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



**Figura 4.13 - Resistência à compressão das argamassas em ambiente marítimo**



**Figura 4.14 - Resistência à compressão das argamassas em ambiente laboratorial**

Numa primeira análise aos resultados obtidos verifica-se que as argamassas com 20% de substituição pelo pó cerâmico apresentam valores de resistência à compressão superiores aos valores obtidos para as restantes composições. Tal deve-se ao efeito de filler que conduz a maiores valores de resistências.

As argamassas de referência apresentam valores significativamente superiores de resistência à compressão em meio marítimo do que em meio laboratorial. Este fenómeno pode ser explicado por alterações na microestrutura das argamassas provenientes do meio de cura.

Nas argamassas com 40% de substituição existe uma diminuição considerável da resistência à compressão para os provetes submetidos a cura em ambiente natural em relação aos laboratoriais. Esta diminuição está associada à visível degradação dos provetes aquando da realização dos ensaios.

Ao analisar os valores de resistência à compressão aos 90 dias verifica-se a conformidade dos valores com os estabelecidos por Veiga (2001), os quais variam entre os 0,4 e os 2,5 MPa. O valor máximo de resistência à compressão obtido foi de 2,11 MPa aos 120 dias para as argamassas CAC1.

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

O ensaio de absorção de água por capilaridade mede o acréscimo de massa de água que ascende por capilaridade, ao longo do tempo, pela secção do provete que se encontra em contacto com a água. Tal como descrito em 3.8.4 o ensaio segue o definido na norma EN 1015-18 (2002).

Este ensaio permite avaliar a capacidade das argamassas absorverem água ao longo do tempo. Quanto menor for o coeficiente de absorção de água por capilaridade de uma argamassa, mais protegida esta está de mecanismos de degradação. Em cada representação gráfica é possível determinar o coeficiente de absorção capilar através da inclinação do troço inicial, observando-se a velocidade com que a água é absorvida inicialmente.

Para o ensaio foram utilizados três provetes inteiros de cada tipo de formulação de argamassa tanto para cura laboratorial como para cura em meio natural, sendo o valor final de absorção em cada instante obtido através da média dos três valores. O ensaio foi realizado aos 60, 90 e 120 dias.

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

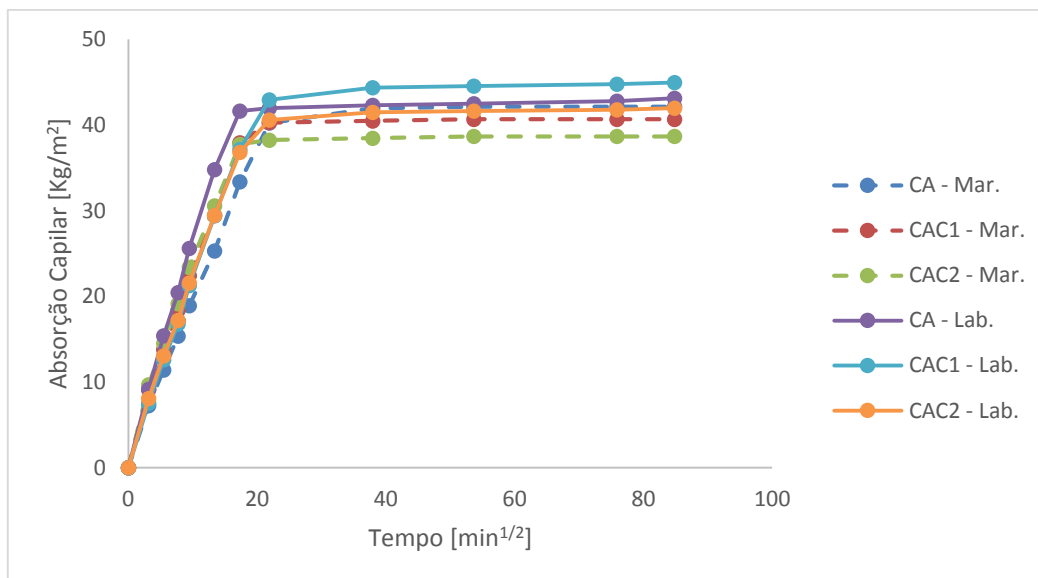


Figura 4.15 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade

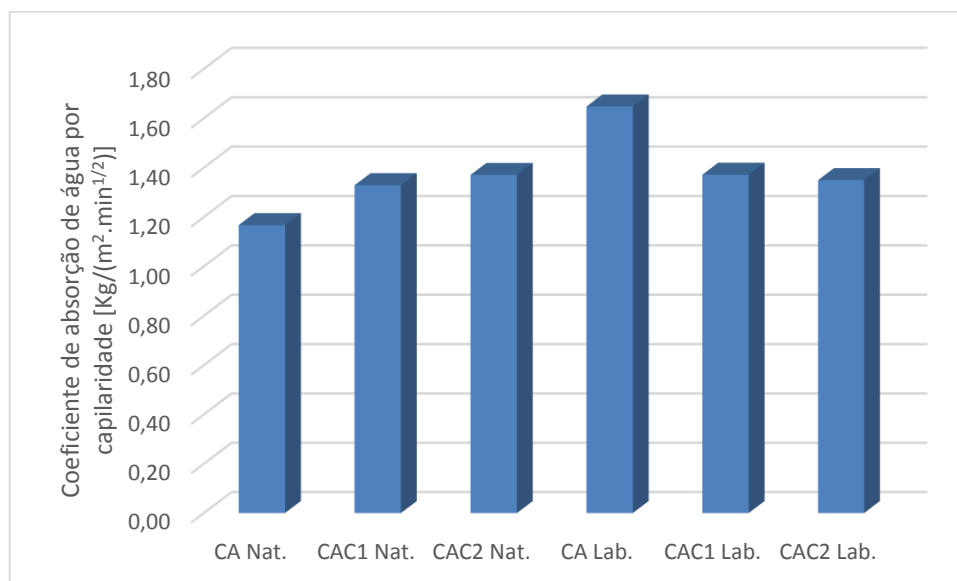


Figura 4.16 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade



Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

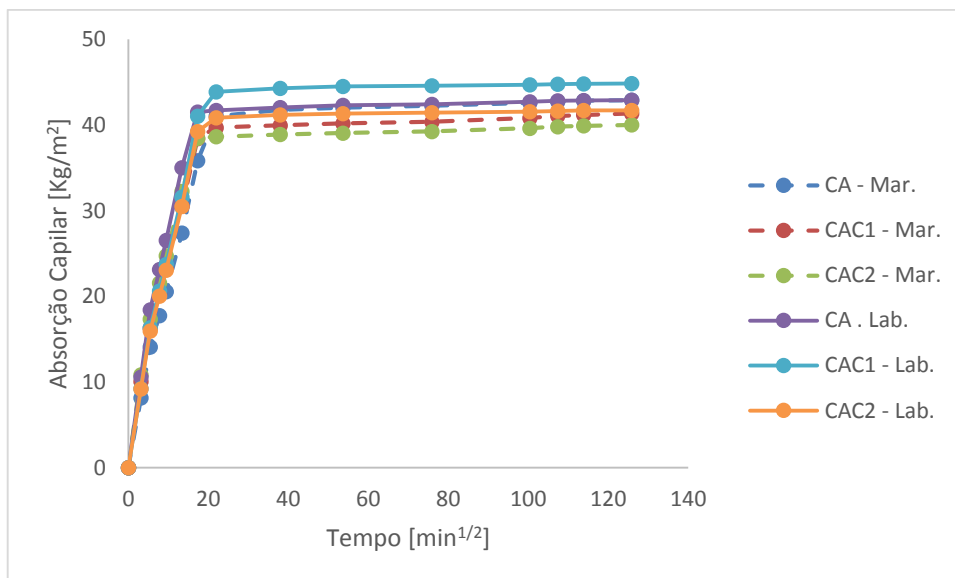


Figura 4.17 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade

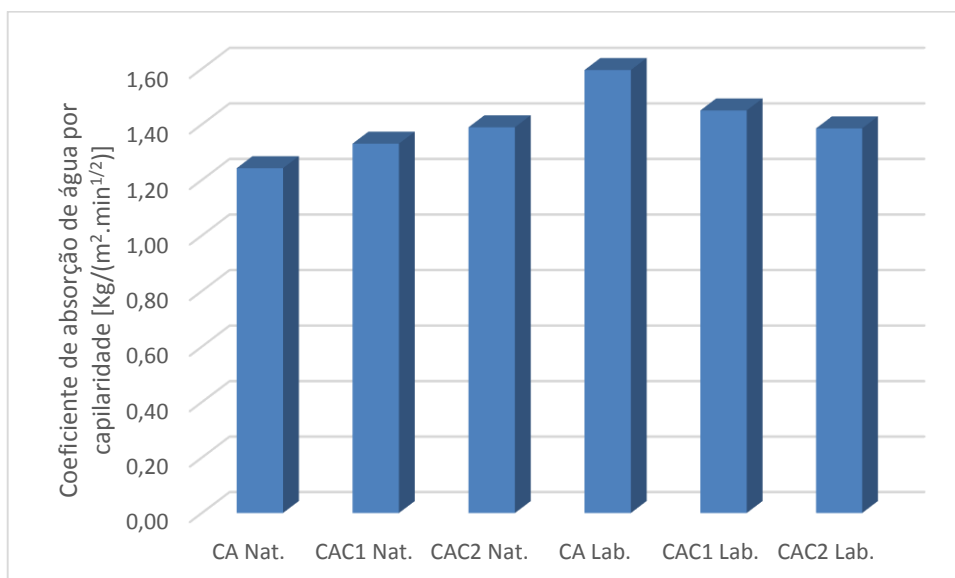


Figura 4.18 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de idade

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

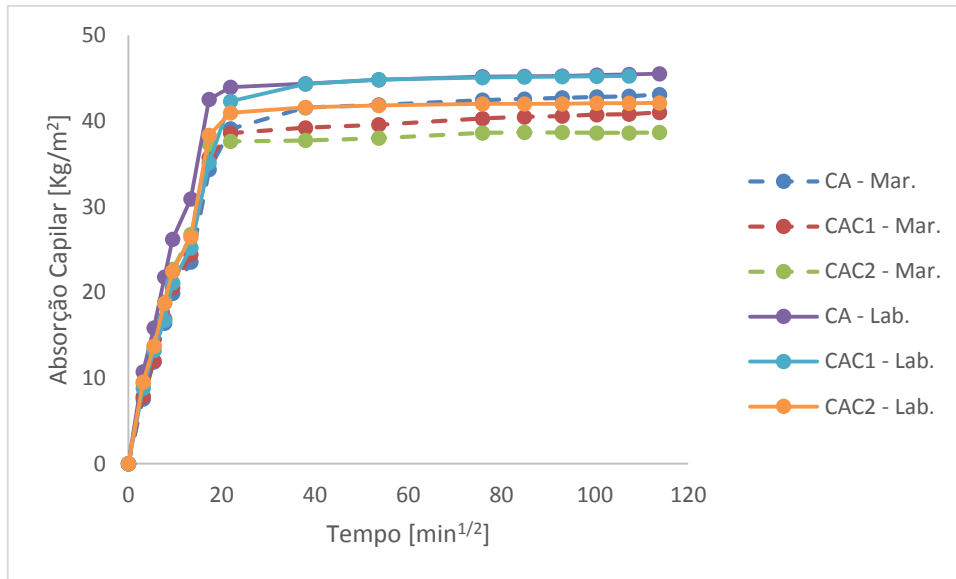


Figura 4.19 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias de idade

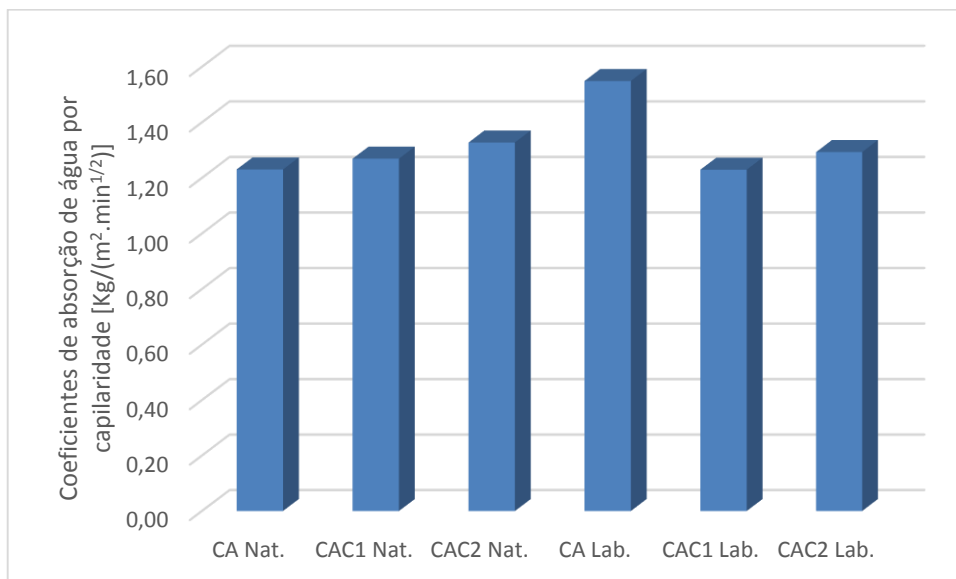


Figura 4.20 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade aos 120 dias de idade

Em termos de velocidade de absorção, verifica-se uma grande proximidade entre os valores em todas as composições e para as várias idades de cura. Ao comparar os meios de cura pode-se afirmar que a cura em meio marítimo apresenta velocidades de absorção ligeiramente inferiores à cura em meio laboratorial.

Nas argamassas de referência verifica-se uma grande discrepância de comportamento entre os diferentes meios de cura. Pela análise das *figuras 4.15, 4.17 e 4.19* conclui-se

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

que a cura em meio laboratorial apresenta valores de coeficiente de absorção bastante superiores, o que pode estar relacionado com alterações na microestrutura das argamassas sujeitas a cura marítima.

Aos 90 dias verifica-se que a argamassa que absorve água mais rapidamente é a argamassa de referência CA com cura em meio laboratorial. A capacidade de absorção está relacionada com a estrutura porosa do material, estando este resultado em conformidade com o que seria expectável uma vez que as argamassas de referência serão, em princípio, mais porosas do que as argamassas com substituição.

Comparando os valores de coeficientes de absorção capilar obtidos aos 90 dias, com os valores padronizados por Veiga (2001) para argamassas de substituição, os quais variam entre 1,0 e os 1,5 Kg/m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>, verifica-se que as argamassas de referência sujeitas a cura em ambiente laboratorial estão ligeiramente acima do intervalo definido apresentando um valor de coeficiente de 1,6 Kg/m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>. As restantes composições de argamassas apresentam valores que oscilam entre os 1,24 e os 1,45 Kg/m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>.

A *tabela 4.8* apresenta os valores assintóticos obtidos durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Tabela 4.8 - Valores assintóticos aos 60, 90 e 120 dias de idade

Idade	Valor Assintótico (Kg/m <sup>2</sup> )					
	CA		CAC1		CAC2	
	Nat.	Lab.	Nat.	Lab.	Nat.	Lab.
60	42,14	43,11	40,68	44,96	38,67	41,97
90	42,9	42,91	41,34	44,83	40,03	41,71
120	43,1	45,54	41,1	45,31	38,68	42,11

Em termos de quantidade total de água absorvida, verifica-se que as argamassas sujeitas a cura laboratorial apresentam valores superiores aos verificados para cura em ambiente natural. Esta diferença justifica-se pela alteração da estrutura porosa das argamassas sujeitas a cura marítima.

As argamassas de referência apresentam valores assintóticos superiores às argamassas com substituição, podendo este aumento estar relacionado com a expectável maior porosidade associada às argamassas de referência.

#### 4.4.6 Ensaio de Secagem

Tal como referido em 3.8.5 este ensaio permite aferir o desempenho das argamassas no que diz respeito à capacidade de secagem por evaporação. É realizado após o ensaio de absorção de água por capilaridade ao 60, 90 e 120 dias para as várias composições.

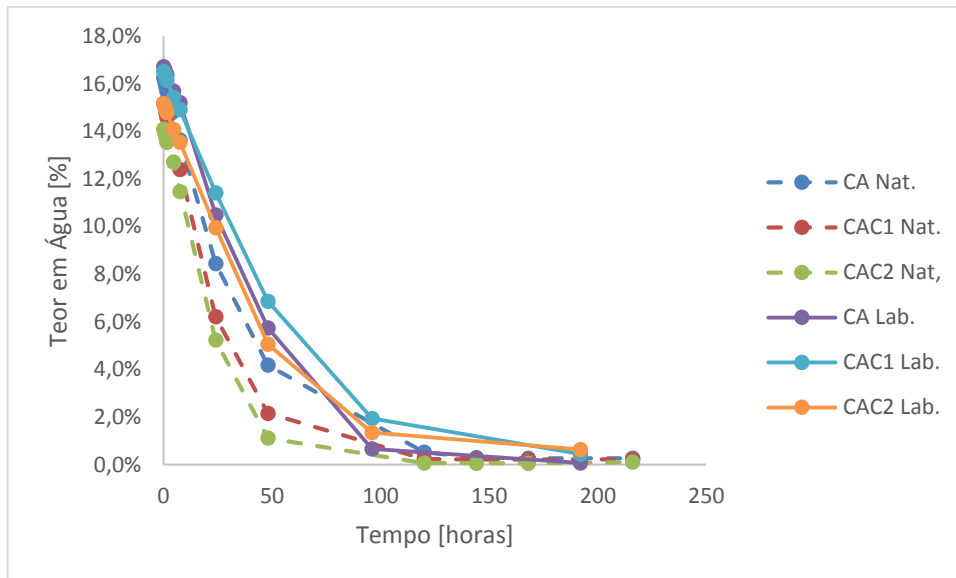


Figura 4.21 - Curvas de evaporação das argamassas aos 60 dias de idade

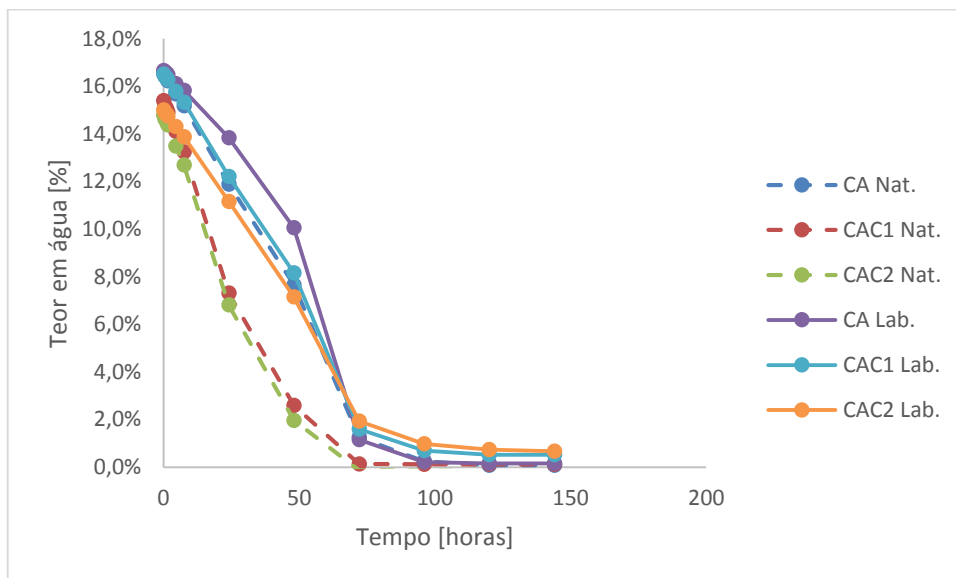


Figura 4.22 - Curvas de evaporação das argamassas aos 90 dias de idade

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

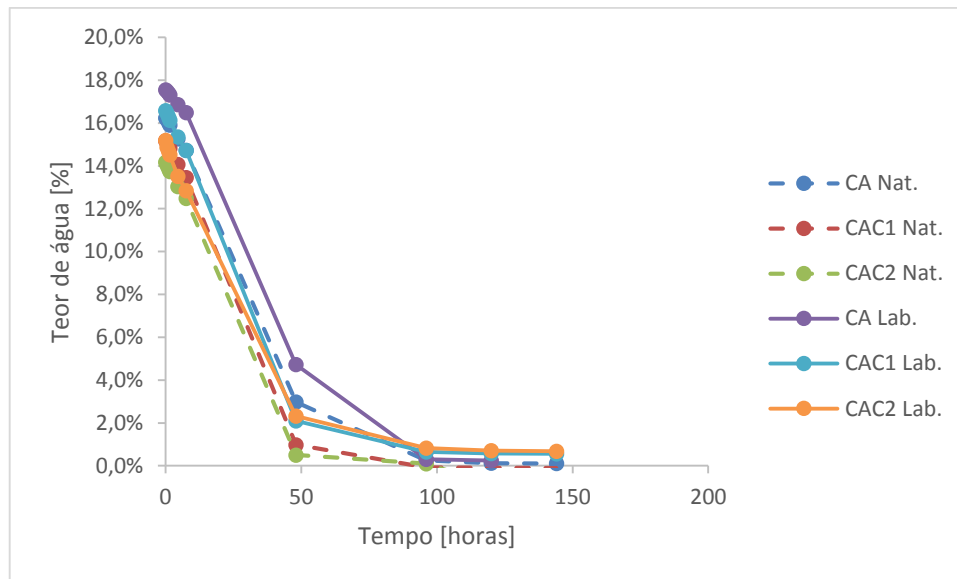


Figura 4.23 - Curvas de evaporação das argamassas aos 120 dias de idade

Ao analisar as curvas de evaporação verifica-se maior rapidez de secagem nas argamassas com substituição. Em relação aos meios de cura verifica-se maior rapidez de secagem nas argamassas sujeitas a cura marítima.

### 4.4.7 Aderência ao suporte

O ensaio de aderência permite determinar a força de aderência da argamassa ao suporte, seguindo o procedimento descrito em 3.8.6, em conformidade com a norma EN 1015-12 (2000).

Durante a realização dos ensaios de aderência ao suporte verificou-se grande dificuldade na realização dos carotes, havendo em muitos casos destacamento durante este processo. Deste modo os carotes foram realizados por um processo manual, evitando o destacamento inicial provocado pela caroteadora mecânica.

A realização do ensaio não permitiu extrair valores coerentes de tensão de aderência, devido à grande discrepância dos mesmos. De facto podemos concluir que as argamassas em estudo são pouco aderentes ao suporte, que no caso foi tijolo cerâmico. Nos rebocos efetuados com as argamassas de referência não foi possível obter qualquer valor de tensão uma vez que o destacamento era imediato, apesar de ter sido realizado o salpico.

#### 4.4.8 Ensaio de permeabilidade à água (Karsten)

Tal como descrito em 3.8.7 este ensaio permite extrair informação acerca da porosidade dos revestimentos. Durante a realização do ensaio verificou-se uma grande rapidez de absorção de água em todas as composições. Esta velocidade de absorção pode estar associada à elevada porosidade das argamassas, em especial no caso das argamassas de referência.

### 4.5 ANÁLISE RELACIONAL ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Após avaliar individualmente os resultados, apresenta-se de seguida uma análise que pretende correlacionar os resultados obtidos em alguns ensaios. Esta análise permite extrair alguma informação acerca da influência da substituição efetuada e das condições de cura a que os provetes foram submetidos.

#### 4.5.1 Ductilidade

Após a determinação da resistência à tração e à compressão das diferentes formulações de argamassas é possível obter o valor da ductilidade, expressa pelo quociente  $R_f/R_c$ . Este parâmetro traduz a capacidade das argamassas em se deformarem. Nas *figuras 4.24* e *4.25* apresentam-se os valores obtidos relacionando as resistências.

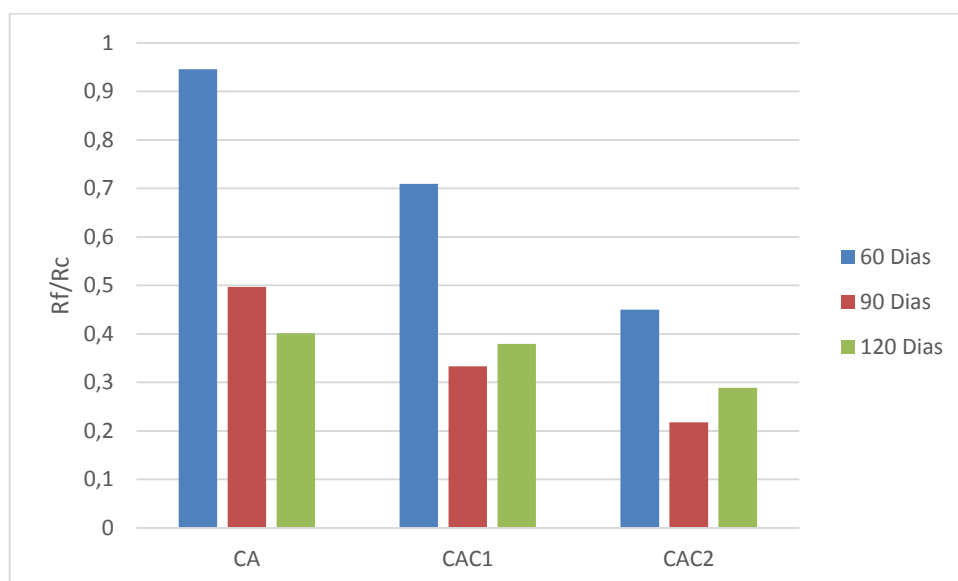
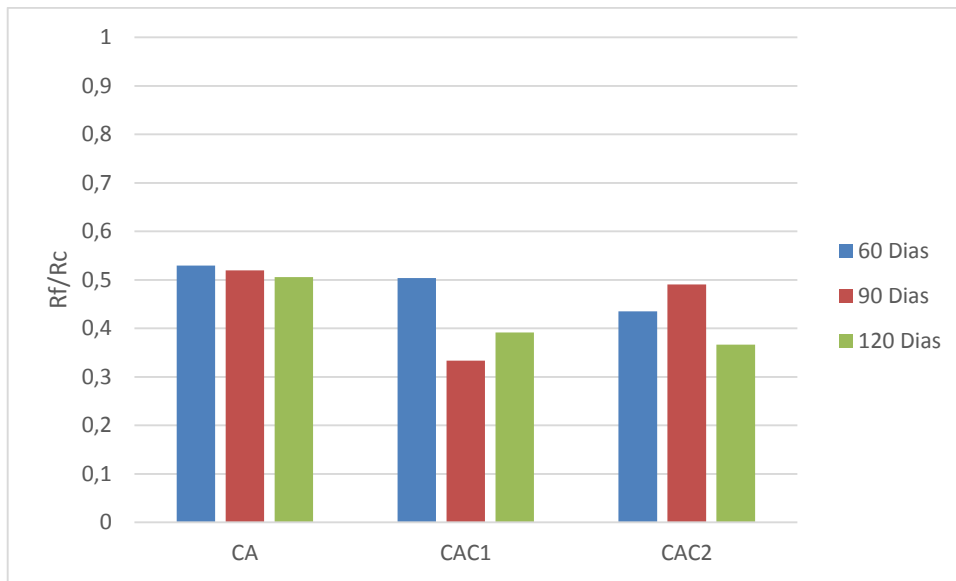


Figura 4.24 - Quociente entre resistência à flexão e resistência à compressão das argamassas sujeitas a cura marítima

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade



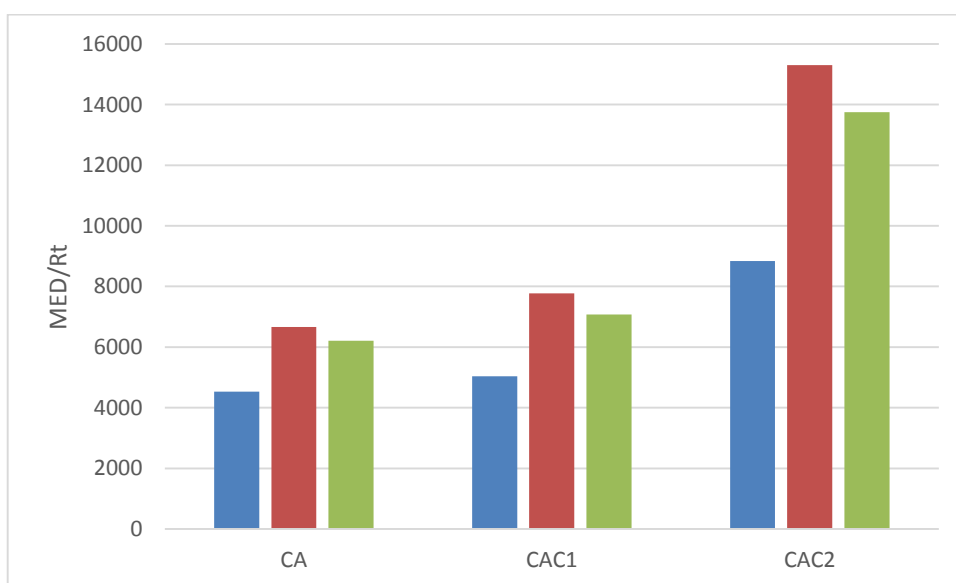
**Figura 4.25 - Quociente entre resistência à flexão e resistência à compressão das argamassas sujeitas a cura laboratorial**

Ao analisar os gráficos anteriores verifica-se que a relação Rf/Rc vai diminuindo ao longo do tempo, e portanto a ductilidade vai sendo tendencialmente mais baixa.

As argamassas de referência são as que apresentam maior ductilidade, evidenciando desta forma melhor capacidade para absorver deformações.

### 4.5.2 Módulo de elasticidade dinâmico / Resistência à tração

Nos gráficos 4.26 e 4.27 apresentam os valores correspondentes ao quociente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração.



**Figura 4.26 - Quociente entre MED e resistência à tração das argamassas sujeitas a cura marítima**

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

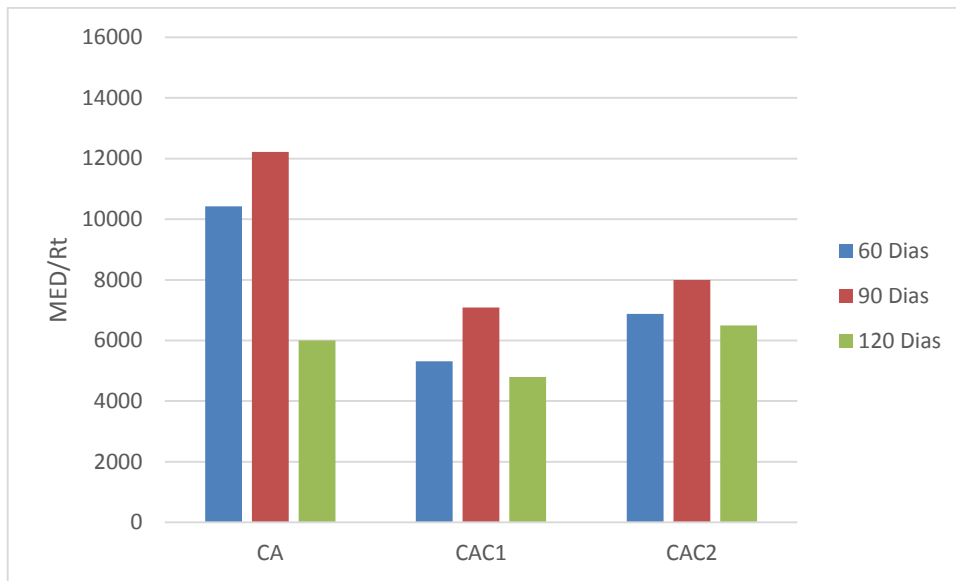


Figura 4.27 - Quociente entre MED e resistência à tração das argamassas sujeitas a cura Laboratorial

Ao analisar os gráficos anteriores verifica-se que as argamassas com 20% de substituição apresentam valores menores, sendo mais favoráveis. Em relação aos diferentes meios de cura verifica-se que a marítima apresenta valores mais favoráveis em todas as composições com exceção das argamassas com 40% de substituição.

### 4.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas

De seguida são relacionados os valores obtidos nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências mecânicas aos 60, 90 e 120 dias de idade.

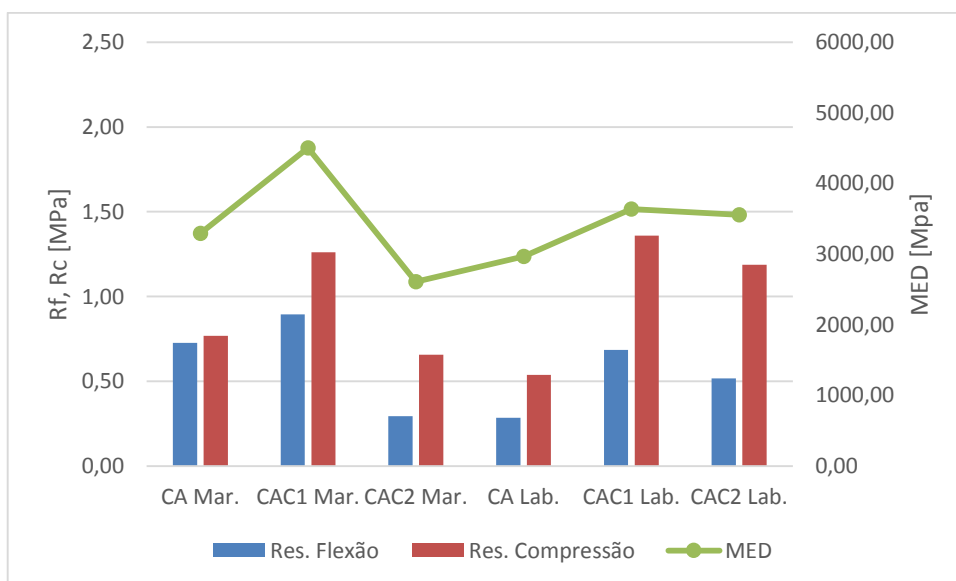


Figura 4.28 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias



## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

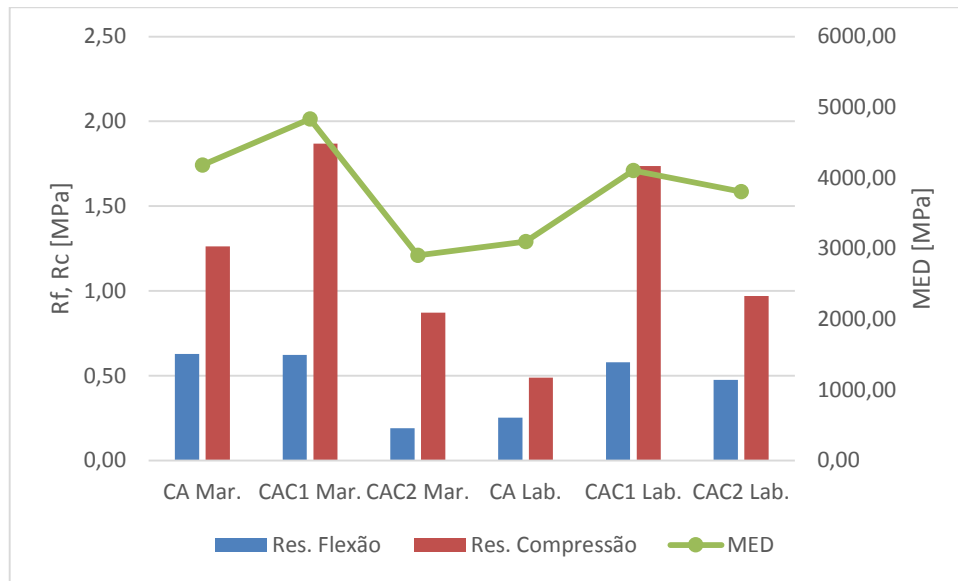


Figura 4.29 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias

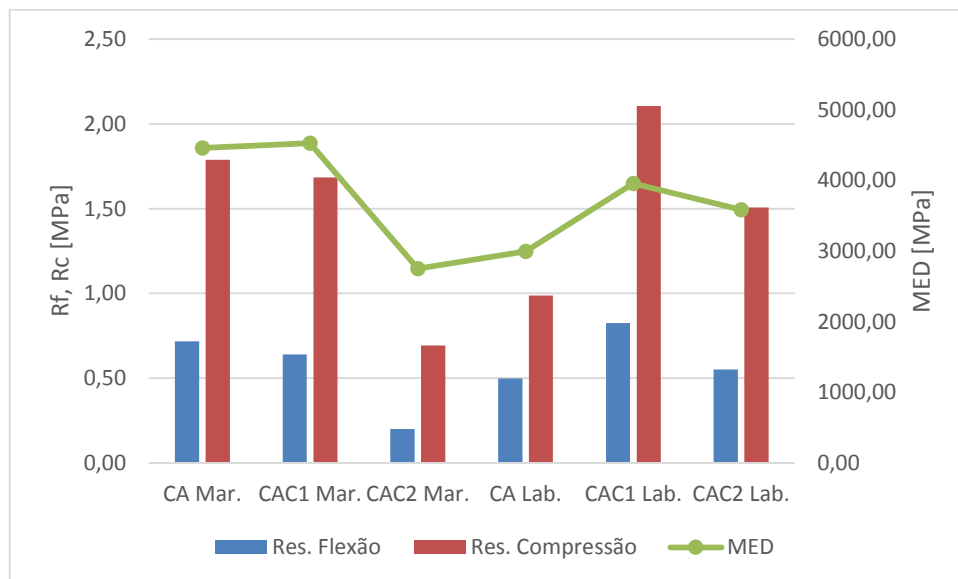


Figura 4.30 - Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico aos 120 dias

Pela análise das *figuras 4.28, 4.29 e 4.30*, pode-se verificar que as argamassas com 20% de substituição da cal pelo pó cerâmico apresentam valores de resistências mecânicas e módulos de elasticidade superiores. De facto podemos concluir que as argamassas mais rígidas são as que apresentam valores de resistências superiores.

Nas argamassas com 40% de substituição, sujeitas a cura marítima verifica-se que o módulo de elasticidade é bastante inferior às restantes composições. Este fenómeno pode

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

estar associado ao estado de degradação dos provetes, nomeadamente de microfissuração interna.

### 4.5.4 Massa volúmica e resistências mecânicas

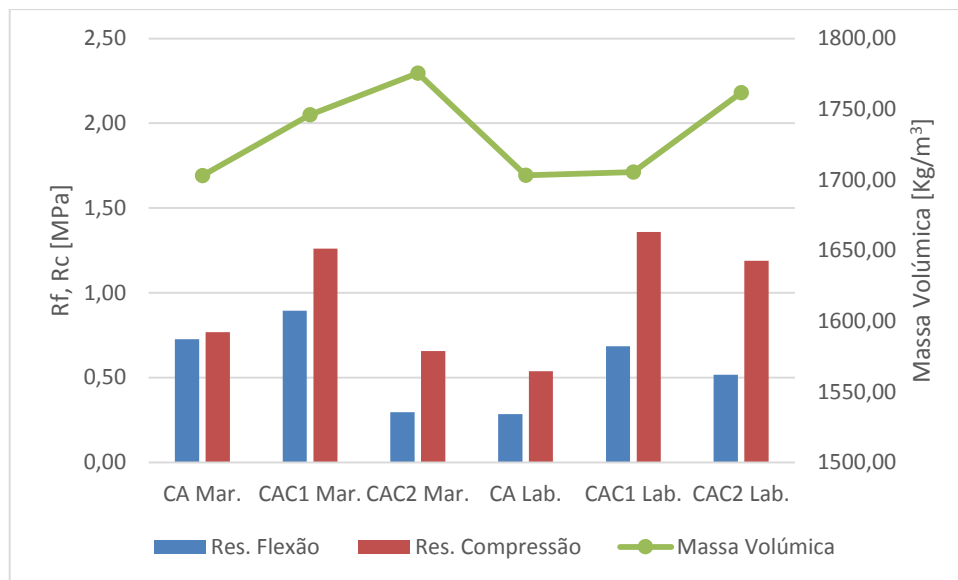


Figura 4.31 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 60 dias

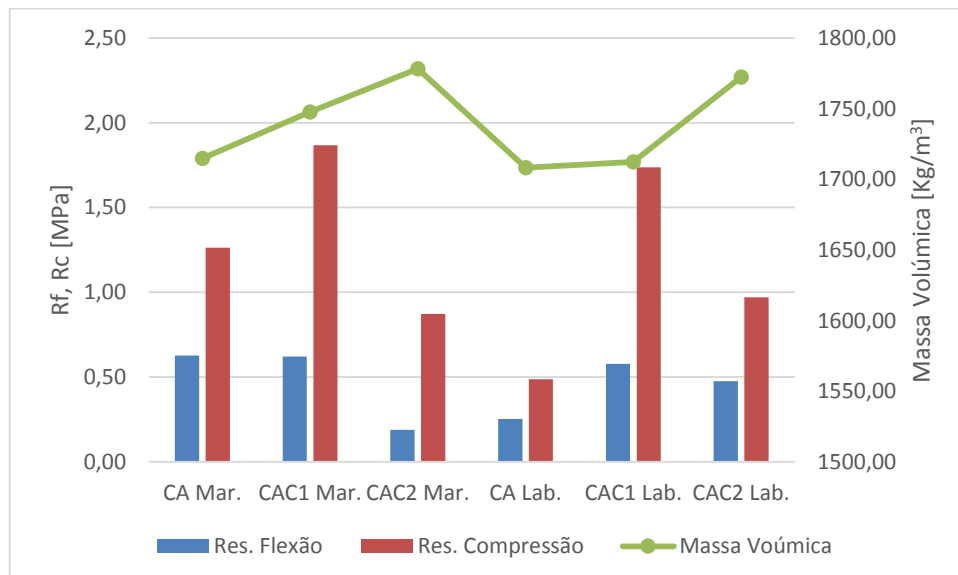


Figura 4.32 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 90 dias

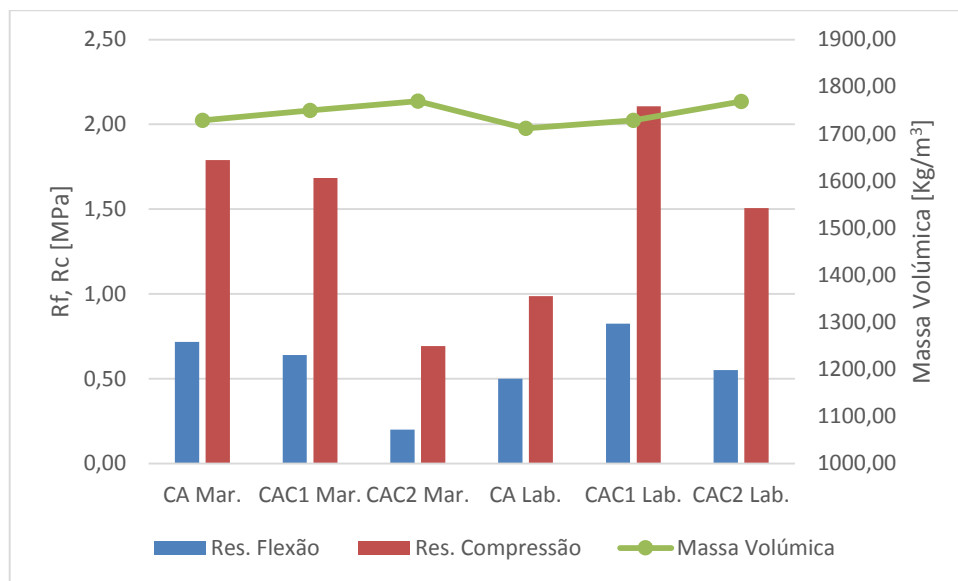


Figura 4.33 - Resistências mecânicas e massa volúmica aos 120 dias

Ao comparar as massas volúmicas com as resistências mecânicas, verifica-se que à medida que se aumentam as massas volúmicas também se verifica um incremento das resistências mecânicas, com exceção das argamassas com 40 % de substituição. Nas argamassas com 40% de substituição a quantidade de finos é bastante elevada, pelo que o efeito de filler não se faz evidenciar.

Esta tendência está em conformidade com o que seria de esperar, uma vez que a partir de uma determinada percentagem de substituição o efeito de filler, que provoca aumento das resistências, deixa de ser predominante.

Ao comparar os meios de cura é possível verificar que as argamassas sujeitas a cura marítima apresentam valores de massas volúmicas ligeiramente superiores. Este fenómeno é mais visível ao analisar as argamassas de referência, as quais apresentam massas volúmicas superiores em ambiente marítimo, às quais correspondem resistências superiores. Este fenómeno pode ser explicado por uma alteração na microestrutura das argamassas em resultado do ambiente de cura.

Analisando de uma forma global os resultados obtidos verifica-se que as condições de cura influenciam fortemente o desempenho das argamassas ou seja obtiveram-se resultados tendencialmente diferentes para a cura laboratorial e marítima. Assim, será de

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

considerar que as condições de cura afetam de forma importante a microestrutura formada.

Considerando que as argamassas de cal aérea sofrem um endurecimento inicial por secagem e consolidam inteiramente por carbonatação é importante analisar as condições em que esta decorre.

Para a ocorrência da carbonatação é essencial a presença de água uma vez que é necessária a dissolução do  $\text{CO}_2$ . De uma forma geral o processo ocorre em 5 passos:

- 1) Difusão do  $\text{CO}_2$  dos poros da argamassa;
- 2) Dissolução da água nos poros;
- 3) Dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  na água dos poros;
- 4) Formação da solução entre  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CO}_2$ ;
- 5) Precipitação do carbonato de cálcio.

Nos diferentes ambientes de cura as condições de ocorrência destes passos são diferentes podendo ser originadas diferentes microestruturas com diferente distribuição do tamanho dos poros originando propriedades mecânicas e de transporte distintas (Lawrence, et al., 2007).

**5 CONCLUSÕES E  
DESENVOLVIMENTOS  
FUTUROS**



## 5.1 CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Neste último capítulo é feita uma avaliação geral dos resultados, são apresentadas pequenas conclusões acerca da influência da substituição efetuada e da cura a que os provetes foram sujeitos.

Ao concluir-se esta dissertação, pode-se afirmar que foram cumpridos os objetivos inicialmente apresentados. Numa primeira fase procedeu-se a um levantamento da bibliografia existente acerca de argamassas de revestimento, em particular argamassas de cal aérea, nomeadamente dos materiais constituintes, propriedades das argamassas, exigências funcionais, componentes pozolânicos e mecanismos de degradação. Na segunda fase definiram-se e realizaram-se os ensaios laboratoriais, tendo por base a normalização aplicável, garantindo a comparabilidade e representatividade dos resultados obtidos. Na última fase procedeu-se à análise e discussão dos resultados obtidos.

Foram estudadas argamassas de cal aérea com uma relação mássica de 1:3, com percentagens de substituição do ligante em 20% e 40% pelo pó cerâmico, cuja granulometria é inferior a 75 $\mu$ m.

A avaliação da pozolanicidade do resíduo cerâmico revelou valores de reatividade bastante baixos, pelo que o resíduo não tem comportamento pozolânico. A baixa reatividade pode estar associada às elevadas temperaturas de cozedura a que os azulejos foram submetidos.

No que diz respeito às características mecânicas verificou-se um aumento das resistências nas argamassas com 20% de substituição. Uma vez que a reatividade pozolânica do resíduo é bastante baixa, o aumento da resistência mecânica é devido essencialmente ao efeito de filler. Este aumento de resistência não se verifica para as argamassas com 40% de substituição, uma vez que o teor de finos supera o valor necessário e portanto o efeito de filler deixa de ser predominante.

Em relação aos diferentes tipos de cura verifica-se um ligeiro aumento das resistências mecânicas nas argamassas sujeitas a cura marítima, com exceção das formulações com 40% de incorporação. Este fenómeno é mais predominante nas argamassas de referência. Inicialmente podia-se ser levado a pensar que este aumento estivesse relacionado com a cristalização de sais no interior das argamassas de referência, mas através da análise aos difractogramas verifica-se a inexistência de sais solúveis. Posto isto a diferença de valores pode ser explicada por alterações na microestrutura dos provetes.

## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

Em relação ao comportamento à água pode-se verificar que o coeficiente de absorção capilar é semelhante em todas as formulações e condições de cura, embora nas argamassas de referência exista um ligeiro aumento nos provetes submetidos a cura laboratorial. Em termos de valor assintótico podemos verificar que as argamassas sujeitas a cura marítima apresentam valores mais baixos, o que é um indício da alteração da estrutura porosa, devido ao ambiente de cura. No que diz respeito a argamassas substituídas verifica-se uma diminuição do valor assintótico em relação às argamassas de referência, estando esta diminuição associada ao efeito de filler que leva ao aumento da compacidade.

Em termos de velocidade de secagem as argamassas substituídas secam mais rapidamente do que as de referência, tanto em meio laboratorial como em meio marítimo. Os provetes sujeitos a cura em meio marítimo apresentam velocidades de secagem ligeiramente superiores aos provetes sujeitos a cura laboratorial.

Quanto à aderência ao suporte todas as formulações apresentaram mau desempenho, em especial as argamassas de referência, para as quais não foi possível obter qualquer valor de tensão de arrancamento. Deste modo pode-se concluir que as argamassas substituídas apresentam uma ligeira melhoria em termos de aderência.

O facto de não existir uma mudança de comportamento significativa, nos provetes sujeitos a cura marítima, pode estar relacionado com o período em que os provetes estiveram na estação marítima de cura. De facto a idade de cura máxima estudada no presente trabalho foram 120 dias, pelo que as argamassas podem não ter sofrido um número significativo de ciclos de cristalização dissolução.

Um dos objetivos iniciais do presente trabalho passou pela avaliação da durabilidade das argamassas de substituição submetidas a cura em ambiente marítimo. De facto podemos concluir que a substituição parcial do ligante até aos 20% conduziu a valores de resistências mecânicas bem como de comportamento à água melhores do que as argamassas de referência.

As argamassas estudadas são fortemente doseadas em ligante, o que pode provocar fenómenos consideráveis de retração inicial, pelo que a aplicação do revestimento deve ser bem planeada englobando o aperto das argamassas em intervalos frequentes de tempo.

Ao comparar os valores obtidos com os valores padronizados por Veiga (2001), referentes a argamassas de substituição, constata-se a concordância de todos os parâmetros com



exceção da tensão de aderência. Deste modo as argamassas podem ser consideradas adequadas para atividades de reabilitação.

O presente trabalho mostra a viabilidade da incorporação de resíduos da indústria cerâmica, finamente divididos em argamassas de cal aérea. Esta incorporação apresenta melhorias em todos os parâmetros avaliados até uma percentagem de substituição de 20%. Estas melhorias estão associadas ao efeito de filler que provoca um aumento da compacidade das argamassas.

## **5.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

A realização da presente dissertação deixa em aberto vários caminhos para desenvolvimentos futuros. Apesar de ser comprovada a viabilidade da incorporação dos resíduos cerâmicos, existem muitas mais abordagens que poderiam ter sido exploradas no âmbito desta temática, nomeadamente a realização de diferentes ensaios ou até mesmo o estudo de diferentes formulações com diferentes traços e percentagens de substituição.

De seguida apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros, os quais podem melhorar a caracterização e desempenho dos revestimentos com incorporação do resíduo cerâmico.

- 1) Incorporação dos resíduos de azulejos vidrados com granulometrias inferiores à do presente estudo, em substituição parcial do ligante;
- 2) Substituição da cal pelo pó cerâmico em percentagens inferiores a 20% (valor mínimo estudado e que apresenta melhor comportamento);
- 3) Estudo da substituição parcial do agregado pelo resíduo cerâmico, reproduzindo a curva granulométrica da areia;
- 4) Estudo de traços mais fracos em ligante, com a incorporação do resíduo cerâmico;
- 5) Aumento do período de cura marítima;
- 6) Desenvolvimento de estudos de rentabilidade económica e financeira da incorporação dos resíduos cerâmicos em formulações de argamassas.



## 6 BIBLIOGRAFIA

AECOPS, 2009. *O Mercado da Reabilitação. Enquadramento, Relevância e Perspectivas*. [Online] Disponível em :

[http://prewww.aecops.pt/pls/daecops3/WEB\\_EXTRACT\\_EXTERNAL.GET\\_EXTERNAL?code=29390781&col\\_ext=FILE1&tab=blist\\_downloads](http://prewww.aecops.pt/pls/daecops3/WEB_EXTRACT_EXTERNAL.GET_EXTERNAL?code=29390781&col_ext=FILE1&tab=blist_downloads)

[Acesso em 2013].

Algarvio, M., 2010. *Influência da razão água/ligante nas características das argamassas de cal aérea para rebocos de edifícios antigos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: IST.

APA, 2013. *Gestão de Resíduos*. [Online] Disponível em :

<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=254>

[Acesso em 2013].

Bandeira, A., 2012. *Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: FCT.

Barreto, M., 2010. *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: FCT.

Bezerra, I. M., 2010. *Cinza de casca de arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento*, Dissertação de pós graduação em Engenharia Civil: Universidade federal de Campina Grande.

Borges, C., Veiga, R. & Silva, A. S., 2011. Natural consolidation of ancient historic buildings mortars submitted to humid and marine environment: a microscopy study. *13th Euroseminar on microscopy applied building materials*, Volume Slovenia, pp. 12-14.

Carreira, J. M., 2013. *Soluções de reabilitação de rebocos exteriores em edifícios antigos*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: ISEL.

Casarek, H., 2007. *Argamassas*. São Paulo: Materiais de Construção Civil.

Coutinho, J., 2002. *Ciência de Materiais - 1ª Parte*. s.l.:s.n.

Coutinho, J. S., 2006. *Materias de Construção 2 : 1º Parte - Ligantes e Caldas*. Porto: FEUP.

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

EMO, 2011. *EMOdicó - Dicionário Técnico*. [Online] Disponível em:

<http://www.euromortar.com/home/> [Acesso em 9 Agosto 2013].

Fontes, A., 2011. *Influência das condições de cura na carbonatação de argamassas tradicionais com ligante à base de cal aérea*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: IST.

Gonçalves, A. N., 2010. *Estudo da influência dos factores aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio in-situ*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: IST.

Gonçalves, T. & Rodrigues, J., 2010. *Argamassas de revestimento para paredes afectadas por cristalização de sais solúveis: influência no substrato*, Lisboa: LNEC.

Henriques, F., 2007. *Humidade em paredes*. 4<sup>o</sup> ed. Lisboa: LNEC.

Henriques, F. & Rodrigues, P. F., 2006. Argamassas de substituição na conservação do património. *Construção Magazine*, Volume 16.

Hossain, K., Lachemi, M. & Sahmaran, M., 2009. Performance of cementitious building renders incorporation natural and industrial pozzolans under aggressive airborne marine salts. *Cement and Concrete Composites*, pp. 358-368.

INE, 2012. *Estatísticas da Construção e Habitação*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.

Kanan, M. I., 2008. *Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos à Base de Cal*. s.l.:s.n.

Lawrence, R. et al., 2007. Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, Volume 37, pp. 1059 - 1069.

Lucas, J., 1999. *Classificação e descrição geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou de betão - ITE24*. Lisboa: LNEC.

Magalhães, A. C. & Veiga, M. R., 2005. *Estudo Comparativo de possíveis soluções de argamassas de revestimentos de paredes de edifícios antigos*, Lisboa: LNEC.

Margalha, M. G., 2009. *Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil: IS.

Massazza, F., 1993. Cement & Concrete Composites 15. Em: *Pozzolanic Cements*. England: s.n., pp. 185-214.

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

- Matias, G. et al., 2012. *Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica*, Lisboa: FCT.
- Matias, G., Paulina, F. & Torres, I., 2012. *Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica - Influência da granulometria dos resíduos*, s.l.: s.n.
- Matias, G., Torres, I. & Faria, P., 2010. *Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico*, s.l.: s.n.
- Oliveira, R., 2012. *Desempenho de argamassas com incorporação de finos de vidro*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: IST.
- Paulo, R., 2006. *Caracterização de Argamassas Industriais*. Dissertação para obrtensão do grau de Mestre em Gestão Ambiental ed. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Pontes, J. M., 2011. *Reactividade de pozolanas para argamassas e betões*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil ed. Lisboa: FCT.
- Rodrigues, M. P. F., 2004. *Argamassas De Revestimento Para Alvenarias Antigas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil ed. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, J., Brito, J. & Veiga, M. R., 2009. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials* , Volume 23, pp. 556-564.
- Silva, P. M. & Costa, J. B., 2006. *Argamassas - Rebocos Tradicionais*. Lisboa: ISEL.
- Silveira, P. M., 2008. *Eflorescências em estuques antigos*, Lisboa: ISEL.
- Sousa, J. & Lara, P. L., 2007. Reologia e Trabalhabilidade das Argamassas. Em: *Revestimentos de Argamassa: Característias e Propriedades*. Brasília: s.n., pp. 23-28.
- Sousa, V., Pereira, F. & Brito, J., 2005. *Rebocos tradicionais: principais causas de degradação*, Lisboa: s.n.
- Veiga, M. R., 1998. *Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes - Contribuição para o estudo da resistência à fendilhação*. Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas ed. Lisboa: LNEC.
- Veiga, M. R., 2003. *As argamassas na conservação. Atas das 1<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro..* s.l., LNEC.
- Veiga, M. R., 2007 . *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais*. Programa de Investigação e Programa de Pós-graduação apresentados para a obtenção do título de Habilitação para o Exercício de Funções de Coordenação de Investigação Científica ed. Lisboa: LNEC.

Veiga, M. R., Aguiar, J., Silva, A. S. & Carvalho, F., 2001. *Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings*, Lisboa: LNEC.

Veiga, R. et al., 2008. *Substitution mortars for application in historical buildings exposed to the sea environment. Analysis of the viability of several types of compositions*, Lisboa: LNEC.

Velosa, A., 2006. *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil ed. Aveiro: Universidade de Aveiro.

**Referências normativas:**

EN 1015-1 (1998), *Methods of test for mortar for masonry part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*.

EN 1015-3 (1999), *Methods of test for mortar for masonry part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.

EN 1015-11 (1999), *Methods of test for mortar for masonry part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.

EN 1015-12 (2000), *Methods of test for mortar for masonry part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*.

EN 1015-18 (2002), *Methods of test for mortar for masonry part 18: Determination of water-absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*.

EN 1015-21 (2002), *Methods of test for mortar for masonry part 18: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates*.

NF P18-513 (2009), *Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Définitions, spécifications, critères de conformité*.

NF B10-511 (1975), *Mesure du Module d'élasticité dynamique*.

NP EN 459-1 (2011), *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*.



**ANEXOS – RESULTADOS DA  
CAMPANHA EXPERIMENTAL**

## ANEXO A – ENSAIOS AOS CONSTITUINTES

### A1. Análise Granulométrica

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados obtidos na análise granulométrica efetuada à areia do rio Tejo.

Identificação da amostra	Areia tejo	
	% Material retido	% Material passado
5	0,51	99,49
2,5	1,12	98,37
1,25	10,69	87,68
0,63	47,79	39,89
0,315	35,36	4,53
0,16	4,37	0,16
0,074	0,08	0,08
0	0,08	0,00

### A2. Avaliação da reatividade pozolânica

- Preparação do CaO

Pesagens	Ensaio 1		Ensaio 2	
	Branco	Amostra	Branco	Amostra
m. cadinho [g]	23,8911	21,0807	17,3281	17,0807
m. CaCO <sub>3</sub> [g]	3,6542	3,6521	3,6300	3,6448
m. conjunto [g]	27,5453	24,7328	20,9581	20,7255
Após mufla a 1000°C				
m. conjunto [g]	25,9503	23,1354	19,3736	19,1347
m. CaO [g]	2,0592	2,0547	2,0455	2,054
m. CO <sub>2</sub> evaporada [g]	1,5950	1,5974	1,5845	1,5908
% perdida	43,66%	43,74%	0,4343	0,4365

- Titulações

Elemento	Ensaio	Consumo em mg de Ca(OH) <sub>2</sub>
Resíduo Cerâmico	1	333,75
	2	366,16



## **ANEXO B – ENSAIO NO ESTADO FRESCO**

### **B1. Consistência por espalhamento**

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados obtidos na determinação da quantidade de água de amassadura.

Argamassas	Quantidade de água [ml]	Espalhamento [mm]	Espalhamento médio [mm]
CA	712,5	154	154,5
		155	
CAC <sub>1</sub>	660	152	151,5
		151	
CAC <sub>2</sub>	600	153	152,5
		152	

## ANEXO C – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

### C1. Massa volúmica

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores de massa volúmica no estado endurecido.

- Ensaio aos 60 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-1	157,2	39,5	39,51	40,06	39,76	422,23	1709,50
		39,52		39,6			
		39,52		39,63			
CA-2	157,33	39,76	39,65	39,58	39,35	417,23	1699,42
		39,59		39,17			
		39,61		39,31			
CA-3	157,36	39,51	39,46	39,76	39,56	417,51	1699,64
		39,41		39,2			
		39,47		39,71			
CAC1-1	158,22	39,53	39,54	40,74	39,50	432,82	1751,21
		39,48		38,81			
		39,62		38,96			
CAC1-2	158,11	39,52	39,57	40,48	39,31	429	1744,33
		39,65		38,86			
		39,53		38,6			
CAC1-3	157,94	39,76	39,79	39,89	39,29	430,25	1742,20
		39,88		39,28			
		39,74		38,71			
CAC2-1	158,61	39,71	39,67	40,21	39,38	439	1771,72
		39,66		38,87			
		39,65		39,05			
CAC2-2	158,48	39,71	39,63	39,91	39,54	441,07	1776,41
		39,63		39,3			
		39,54		39,4			
CAC2-2	158,49	39,59	39,57	39,19	39,22	437,42	1778,37
		39,67		39,34			
		39,45		39,13			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 60 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-19	157,55	39,55	39,59	38,85	38,70	410,42	1700,4
		39,56		38,66			
		39,66		38,58			
CA-20	157,56	39,41	39,43	39,26	39,12	412,99	1699,14
		39,57		39,02			
		39,32		39,08			
CA-21	157,51	39,86	39,80	39,29	39,11	419,33	1710,17
		39,69		39,09			
		39,85		38,96			
CAC1-19	158,44	39,61	39,68	39,94	39,82	429,34	1715,14
		39,79		39,9			
		39,63		39,62			
CAC1-20	158,52	39,85	39,83	40,3	40,19	432,27	1703,78
		39,83		39,96			
		39,8		40,3			
CAC1-21	159,04	39,81	39,95	40,36	40,23	433,83	1697,25
		39,73		40,41			
		40,32		39,91			
CAC2-19	158,71	39,65	39,72	39,79	40,23	444,76	1753,87
		39,68		40,02			
		39,83		40,87			
CAC2-20	158,64	39,9	39,86	40,01	39,87	444,71	1763,78
		39,82		39,48			
		39,86		40,13			
CAC2-21	158,54	39,83	39,93	40,05	39,82	445,54	1767,15
		40,02		39,76			
		39,95		39,66			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 90 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-7	157,14	39,53	39,45	40,25	39,60	420,4	1712,37
		39,41		39,05			
		39,42		39,5			
CA-8	157,02	39,37	39,41	39,76	39,02	415,58	1720,95
		39,39		38,6			
		39,47		38,71			
CA-9	156,77	39,47	39,46	39,73	39,22	415,27	1711,31
		39,51		39,07			
		39,41		38,87			
CAC1-7	158,1	39,74	39,66	40,32	39,67	436,58	1755,16
		39,6		39,13			
		39,64		39,56			
CAC1-8	158,26	39,68	39,71	40,36	39,82	436,04	1742,13
		39,79		39,33			
		39,67		39,78			
CAC1-9	158,27	39,67	39,74	40,16	39,55	434,14	1745,39
		39,71		39,14			
		39,83		39,35			
CAC2-7	158,32	39,7	39,72	39,6	39,22	441,57	1790,54
		39,73		39,1			
		39,73		38,95			
CAC2-8	158,33	39,77	39,71	40,47	39,75	442,94	1772,48
		39,72		39,22			
		39,64		39,55			
CAC2-9	158,3	39,74	39,78	40,5	39,79	443,91	1771,34
		39,79		39,37			
		39,82		39,51			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 90 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-25	157,41	39,52	39,47	38,99	39,08	413,6	1703,58
		39,48		38,67			
		39,41		39,57			
CA-26	157,61	39,54	39,56	39,25	38,89	413,59	1705,80
		39,64		38,45			
		39,5		38,96			
CA-27	157,4	39,65	39,66	39,01	38,60	413,22	1714,89
		39,7		38,29			
		39,63		38,5			
CAC1-25	158,4	39,63	39,61	40,25	40,00	430,14	1714,06
		39,59		39,68			
		39,61		40,06			
CAC1-26	158,29	39,61	39,66	40,4	40,27	430,27	1701,83
		39,71		40,32			
		39,66		40,1			
CAC1-27	158,46	39,63	39,44	39,78	39,84	428,5	1721,12
		39,57		40,01			
		39,12		39,72			
CAC2-25	158,58	39,89	39,85	40,52	39,88	446,86	1772,83
		39,82		39,72			
		39,85		39,41			
CAC2-26	158,5	39,75	39,77	39,81	40,03	448,31	1776,82
		39,74		39,72			
		39,82		40,55			
CAC2-27	158,5	39,74	39,72	39,88	40,00	445,08	1767,27
		39,72		39,71			
		39,71		40,41			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 120 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-13	157,21	39,54	39,43	39,66	39,76	428,06	1736,81
		39,36		39,86			
		39,38		39,77			
CA-14	157,18	39,52	39,60	39,78	39,86	428,93	1728,70
		39,8		40,24			
CA-15	157,36	39,47	39,56	40,2	40,09	429,34	1720,05
		39,8		39,96			
		39,42		40,12			
CAC1-13	157,91	39,52	39,59	40,32	39,62	433,34	1749,37
		39,75		39,37			
		39,5		39,18			
CAC1-14	158,26	39,71	39,70	40,17	39,37	431,62	1744,62
		39,84		39,13			
		39,56		38,82			
CAC1-15	158,18	39,68	39,66	40,26	39,19	431,28	1754,20
		39,6		38,55			
		39,69		38,77			
CAC2-13	158,38	39,64	39,61	40,12	39,42	440,52	1781,18
		39,68		39,11			
		39,52		39,03			
CAC2-14	158,39	39,62	39,63	39,16	39,66	439,53	1765,57
		39,71		40,46			
		39,56		39,36			
CAC2-15	158,58	39,75	39,61	40,64	39,99	442,21	1760,30
		39,58		39,89			
		39,5		39,45			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 120 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]				Massa [g]	Massa Volúmica [Kg/m <sup>3</sup> ]	
	C	L		A			
CA-31	157,6	39,63	39,71	41,19	39,90	417,19	1671,00
		39,88		39,2			
		39,61		39,3			
CA-32	157,66	39,53	39,52	40,9	39,64	415,2	1681,07
		39,51		39,13			
		39,52		38,89			
CA-33	157,41	39,88	39,74	41,1	39,61	417,07	1683,23
		39,67		38,7			
		39,67		39,03			
CAC1-31	158,28	39,81	39,91	40,2	40,14	436,69	1722,07
		40,04		39,73			
		39,88		40,5			
CAC1-32	158,59	40,18	39,89	40,28	40,11	438,4	1727,59
		39,66		39,96			
		39,84		40,09			
CAC1-33	158,06	39,57	39,55	40,13	39,74	431,38	1736,31
		39,54		39,38			
		39,55		39,71			
CAC2-31	158,34	39,66	39,66	39,25	40,34	448,41	1770,09
		39,65		39,86			
		39,67		41,91			
CAC2-32	158,12	39,83	39,75	39,72	40,16	448,62	1777,60
		39,75		39,45			
		39,66		41,3			
CAC2-33	158,46	39,8	39,75	39,6	40,25	445,71	1758,19
		39,63		41,35			
		39,81		39,8			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

## C2. Módulo de elasticidade dinâmico

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores de módulos de elasticidade dinâmicos obtidos ao longo da campanha experimental.

- Ensaio aos 60 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-1	157,2	39,51	39,76	422,23	4442	3334,20	3293,07
CA-2	157,33	39,65	39,35	417,23	4396,5	3252,37	
CA-3	157,36	39,46	39,56	417,51	4422,5	3292,63	
CAC1-1	158,22	39,54	39,50	432,82	4996,9	4378,48	4504,86
CAC1-2	158,11	39,57	39,31	429	5123,8	4579,22	
CAC1-3	157,94	39,79	39,29	430,25	5119,9	4556,87	
CAC2-1	158,61	39,67	39,38	439	3878,5	2681,92	2610,59
CAC2-2	158,48	39,63	39,54	441,07	3785,2	2557,01	
CAC2-2	158,49	39,57	39,22	437,42	3809,3	2592,85	



Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 60 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-19	157,55	39,59	38,70	410,42	4073,1	2800,90	2966,61
CA-20	157,56	39,43	39,12	412,99	4258,8	3060,25	
CA-21	157,51	39,80	39,11	419,33	4231,4	3038,67	
CAC1-19	158,44	39,68	39,82	429,34	4528,8	3532,28	3638,84
CAC1-20	158,52	39,83	40,19	432,27	4683,2	3756,02	
CAC1-21	159,04	39,95	40,23	433,83	4596,6	3628,20	
CAC2-19	158,71	39,72	40,23	444,76	4506	3587,97	3554,61
CAC2-20	158,64	39,86	39,87	444,71	4480,1	3563,73	
CAC2-21	158,54	39,93	39,82	445,54	4446,1	3512,13	

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 90 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-7	157,14	39,45	39,60	420,4	4928,6	4108,45	4182,22
CA-8	157,02	39,41	39,02	415,58	4991,9	4229,32	
CA-9	156,77	39,46	39,22	415,27	5001,8	4208,89	
CAC1-7	158,1	39,66	39,67	436,58	5243,2	4824,29	4835,627
CAC1-8	158,26	39,71	39,82	436,04	5306	4913,81	
CAC1-9	158,27	39,74	39,55	434,14	5221,9	4768,78	
CAC2-7	158,32	39,72	39,22	441,57	4049,2	2943,43	2902,334
CAC2-8	158,33	39,71	39,75	442,94	3996,1	2838,18	
CAC2-9	158,3	39,78	39,79	443,91	4059,1	2925,39	

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de umidade e salinidade

---

- Ensaio aos 90 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-25	157,41	39,47	39,08	413,6	4275,9	3087,05	3097,03
CA-26	157,61	39,56	38,89	413,59	4272,3	3093,71	
CA-27	157,4	39,66	38,60	413,22	4278,1	3110,34	
CAC1-25	158,4	39,61	40,00	430,14	4817,7	3992,78	4102,67
CAC1-26	158,29	39,66	40,27	430,27	4942,1	4165,89	
CAC1-27	158,46	39,44	39,84	428,5	4899,3	4149,34	
CAC2-25	158,58	39,85	39,88	446,86	4670,2	3889,51	3805,56
CAC2-26	158,5	39,77	40,03	448,31	4544,5	3687,52	
CAC2-27	158,5	39,72	40,00	445,08	4649,8	3839,64	

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

- Ensaio aos 120 dias, cura marítima

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-13	157,21	39,43	39,76	428,06	5065,7	4406,06	4457,88
CA-14	157,18	39,60	39,86	428,93	5167,6	4561,97	
CA-15	157,36	39,56	40,09	429,34	5085,2	4405,62	
CAC1-13	157,91	39,59	39,62	433,34	5109,4	4555,14	4524,67
CAC1-14	158,26	39,70	39,37	431,62	5076,1	4503,64	
CAC1-15	158,18	39,66	39,19	431,28	5071,3	4515,24	
CAC2-13	158,38	39,61	39,42	440,52	3938,8	2772,65	2752,37
CAC2-14	158,39	39,63	39,66	439,53	3890,6	2681,84	
CAC2-15	158,58	39,61	39,99	442,21	3978,4	2802,60	

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 120 dias, cura laboratorial

Provete	Dimensões [mm]			Massa [g]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	
	C	L	A				
CA-31	157,6	39,71	39,90	417,19	4220,2	2956,76	2996,88
CA-32	157,66	39,52	39,64	415,2	4200,6	2949,25	
CA-33	157,41	39,74	39,61	417,07	4300	3084,65	
CAC1-31	158,28	39,91	40,14	436,69	4764,1	3916,75	3954,74
CAC1-32	158,59	39,89	40,11	438,4	4843,7	4077,63	
CAC1-33	158,06	39,55	39,74	431,38	4722,6	3869,84	
CAC2-31	158,34	39,66	40,34	448,41	4437,2	3495,07	3585,69
CAC2-32	158,12	39,75	40,16	448,62	4517,9	3628,61	
CAC2-33	158,46	39,75	40,25	445,71	4536	3633,39	

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

**C3. Resistência à flexão e compressão**

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores obtidos para as resistências à compressão e à flexão.

- Ensaio aos 60 dias, cura marítima

Provete	Flexão			Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]		Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-1	284	0,68	0,73	1395	0,83	0,77
				1203		
CA-2	285	0,70		1130	0,67	
				974		
CA-3	331	0,80		1386	0,81	
				1130		
CAC1-1	335	0,81	0,89	1664	1,07	1,26
CAC1-2	348	0,85		2269	1,44	
				2217		
CAC1-3	416	1,02		1798	1,28	
				2193		
CAC2-1	163	0,40		0,30	1111	
CAC2-2	92	0,22	1044			
			920		0,60	
CAC2-2	108	0,27	968			
			1102		0,68	
1004						

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 60 dias, cura laboratorial

Provete	Flexão		Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]	Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-19			789	0,51	0,54
			773		
CA-20	120	0,30	981	0,55	
			710		
CA-21	110	0,27	840	0,55	
			886		
CAC1-19	323	0,77	2195	1,35	1,36
			2077		
CAC1-20	286	0,67	2213	1,29	
			1920		
CAC1-21	266	0,62	2305	1,43	
CAC2-19	215	0,50	1735	1,14	1,19
			1909		
CAC2-20	254	0,60	1911	1,22	
			1973		
CAC2-21	189	0,45	1850	1,20	
			1974		

- Ensaio aos 90 dias, cura marítima

Provete	Flexão		Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]	Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-7	250	0,61	1631	1,07	1,26
			1720		
CA-8	252	0,63	1647	1,10	
			1748		
CA-9	262	0,65	2394	1,61	
			2598		
CAC1-7	241	0,58	3171	1,96	1,87
			2995		
CAC1-8	282	0,67	2937	1,84	
			2895		
CAC1-9	255	0,62	2827	1,80	
			2831		
CAC2-7	86	0,21	1346	0,85	0,87
			1300		
CAC2-8	75	0,18	1343	0,86	
			1376		
CAC2-9	75	0,18	1466	0,90	
			1395		

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 90 dias, cura laboratorial

Provete	Flexão			Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]		Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-25	84			738	0,48	
				753		
CA-26	103	0,26	0,25	734	0,46	0,49
				684		
CA-27	98	0,25		815	0,52	
				778		
CAC1-25	222	0,53		2938	1,74	
				2561		
CAC1-26	297	0,69	0,58	2845	1,78	1,74
				2837		
CAC1-27	216	0,52		2772	1,69	
				2550		
CAC2-25	190	0,45		2288	1,19	
				1492		
CAC2-26	214	0,50	0,48	1530	0,83	0,97
				1125		
CAC2-27	201	0,47		1556	0,89	
				1271		

- Ensaio aos 120 dias, cura marítima

Provete	Flexão			Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]		Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-13	246	0,59		2814	1,82	
				2883		
CA-14	336	0,80	0,72	2777	1,74	1,79
				2716		
CA-15	322	0,76		2827	1,81	
				2913		
CAC1-13	237	0,57		2644	1,67	
				2609		
CAC1-14	273	0,67	0,64	2712	1,73	1,68
				2702		
CAC1-15	277	0,68		2639	1,65	
				2484		
CAC2-13	76	0,18		1028	0,66	
				1026		
CAC2-14	87	0,21	0,20	1141	0,71	0,69
				1090		
CAC2-15	88	0,21		1054	0,71	
				1198		



Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 120 dias, cura laboratorial

Provete	Flexão		Compressão		
	Força [N]	Rf [N/mm <sup>2</sup> ]	Força [N]	Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	
CA-31			1484	0,95	0,99
			1531		
CA-32	207	0,50	1579	1,02	
			1619		
CA-33	208	0,50	1568	0,99	
			1555		
CAC1-31	333	0,78	3373	2,08	2,11
			3278		
CAC1-32	448	1,05	3385	2,11	
			3362		
CAC1-33	272	0,65	3246	2,13	
			3463		
CAC2-31	209	0,49	2374	1,49	1,51
			2380		
CAC2-32	251	0,59	2475	1,54	
			2448		
CAC2-33	251	0,59	2346	1,49	
			2433		

#### C4. Absorção de água por capilaridade

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtido no ensaio de absorção de água por capilaridade.

- Ensaio aos 60 dias

Valores médios de absorção Capilar [Kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Cura marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	7,26	9,13	9,70	9,15	7,56	8,09
30	11,41	13,81	14,52	15,39	12,60	13,06
60	15,37	18,40	19,15	20,46	16,79	17,19
90	18,93	22,42	23,41	25,63	21,27	21,58
180	25,32	29,44	30,58	34,81	29,43	29,47
300	33,39	37,95	37,77	41,65	37,17	36,83
480	40,24	40,28	38,24	41,98	42,95	40,58
1440	41,96	40,48	38,47	42,32	44,37	41,47
2880	42,13	40,67	38,66	42,50	44,56	41,62
5760	42,14	40,68	38,67	42,80	44,79	41,78
7200	42,14	40,68	38,67	43,11	44,96	41,97

- Ensaio aos 90 dias

Valores médios de absorção Capilar [Kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Cura marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	8,15	10,06	10,84	10,58	9,24	9,21
30	14,09	16,29	17,34	18,44	16,33	15,98
60	17,77	20,29	21,57	23,13	20,63	20,04
90	20,58	23,37	24,74	26,53	23,74	23,07
180	27,38	30,53	32,24	35,02	31,60	30,49
300	35,86	38,43	38,46	41,54	41,05	39,23
480	41,02	39,70	38,64	41,71	43,88	40,86
1440	41,77	39,97	38,89	42,03	44,28	41,20
2880	42,01	40,19	39,08	42,32	44,50	41,34
5760	42,24	40,37	39,25	42,44	44,60	41,43
10080	42,60	40,83	39,63	42,71	44,71	41,58
11520	42,76	41,07	39,81	42,82	44,78	41,64
12960	42,84	41,19	39,91	42,88	44,83	41,71
15840	42,90	41,34	40,03	42,91	44,83	41,71

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

---

- Ensaio aos 120 dias

Valores médios de absorção Capilar [Kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Cura marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	7,58	7,86	9,41	10,73	8,81	9,54
30	11,89	12,03	13,73	15,85	13,23	13,73
60	16,41	16,94	18,89	21,78	16,77	18,74
90	19,88	20,55	22,69	26,22	21,11	22,47
180	23,56	24,44	26,78	30,90	25,21	26,48
300	34,35	35,73	37,35	42,53	35,13	38,35
480	39,09	38,57	37,62	43,95	42,30	40,95
1440	41,56	39,22	37,75	44,34	44,34	41,61
2880	41,90	39,57	38,00	44,80	44,85	41,84
5760	42,45	40,30	38,62	45,20	45,08	42,00
7200	42,58	40,48	38,67	45,22	45,16	42,02
8640	42,70	40,58	38,68	45,26	45,19	42,02
10080	42,82	40,75	38,61	45,38	45,24	42,08
11520	42,90	40,80	38,62	45,44	45,26	42,09
12960	43,10	41,01	38,68	45,54	45,31	42,11

### C5. Secagem

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtido no ensaio de secagem.

- Ensaio aos 60 dias

Valores médios de Teor em água [%]						
Tempo	Cura Marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	16,3%	15,2%	14,1%	16,7%	16,5%	15,2%
0,5	16,0%	15,0%	13,9%	16,6%	16,4%	15,0%
1	15,9%	14,8%	13,7%	16,5%	16,3%	14,9%
1,5	15,7%	14,6%	13,6%	16,4%	16,2%	14,8%
4,5	14,9%	13,8%	12,7%	15,7%	15,4%	14,1%
7,5	13,6%	12,4%	11,5%	15,2%	14,9%	13,6%
24	8,5%	6,2%	5,2%	10,5%	11,4%	10,0%
48	4,2%	2,2%	1,1%	5,7%	6,9%	5,1%
120	0,5%	0,2%	0,1%	0,7%	1,9%	1,3%
144	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,4%	0,6%
168	0,3%	0,2%	0,1%			
216	0,3%	0,2%	0,1%			

Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Ensaio aos 90 dias

Valores médios de Teor em água [%]						
Tempo	Cura Marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	16,5%	15,4%	14,8%	16,7%	16,5%	15,0%
0,5	16,4%	15,2%	14,6%	16,6%	16,4%	14,9%
1	16,3%	15,1%	14,5%	16,5%	16,3%	14,8%
1,5	16,2%	14,9%	14,4%	16,5%	16,3%	14,8%
4,5	15,7%	14,1%	13,5%	16,1%	15,8%	14,3%
7,5	15,2%	13,2%	12,7%	15,8%	15,3%	13,9%
24	11,9%	7,3%	6,8%	13,8%	12,2%	11,2%
48	7,7%	2,6%	2,0%	10,0%	8,2%	7,2%
72	1,3%	0,1%	-0,1%	1,2%	1,6%	1,9%
96	0,2%	0,1%	-0,1%	0,2%	0,7%	1,0%
120	0,1%	0,1%	-0,2%	0,2%	0,5%	0,7%
144	0,1%	0,1%	-0,2%	0,2%	0,5%	0,7%

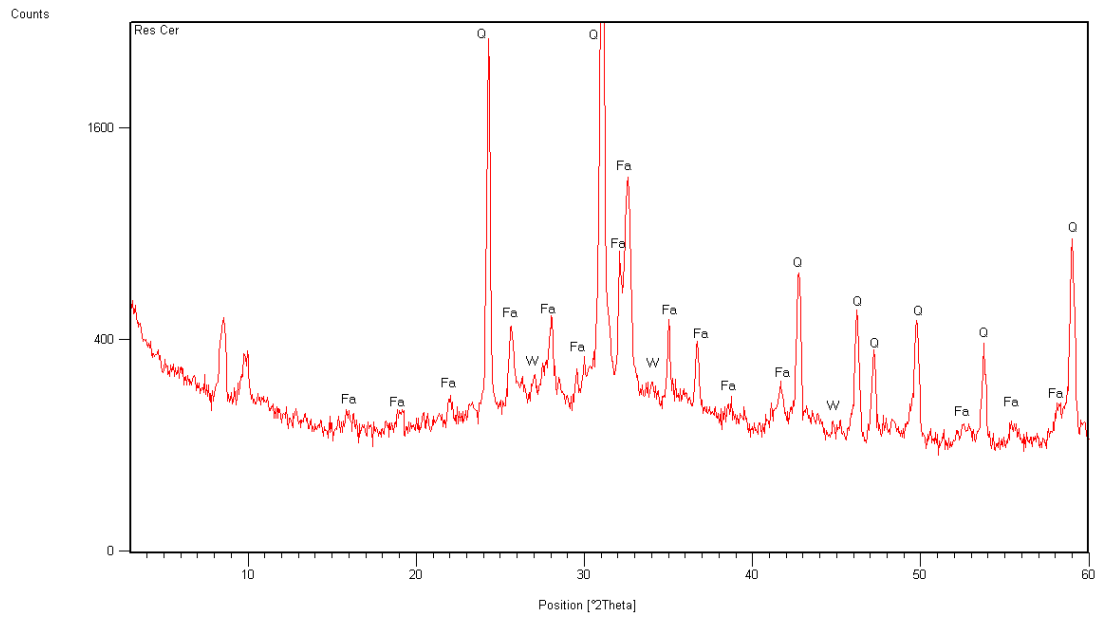
- Ensaio aos 120 dias

Valores médios de Teor em água [%]						
Tempo	Cura Marítima			Cura Laboratorial		
	CA	CAC1	CAC2	CA	CAC1	CAC2
0	16,2%	15,2%	14,2%	17,6%	16,6%	15,2%
0,5	16,2%	15,1%	14,0%	17,5%	16,5%	14,9%
1	16,0%	14,9%	13,9%	17,4%	16,3%	14,7%
1,5	15,9%	14,8%	13,7%	17,3%	16,1%	14,5%
4,5	15,3%	14,1%	13,0%	16,9%	15,4%	13,5%
7,5	14,7%	13,5%	12,5%	16,5%	14,7%	12,8%
48	3,0%	1,0%	0,5%	4,7%	2,1%	2,3%
96	0,3%	-0,1%	0,1%	0,3%	0,6%	0,8%
120	0,1%			0,2%	0,6%	0,7%
144	0,1%			0,1%	0,6%	0,7%

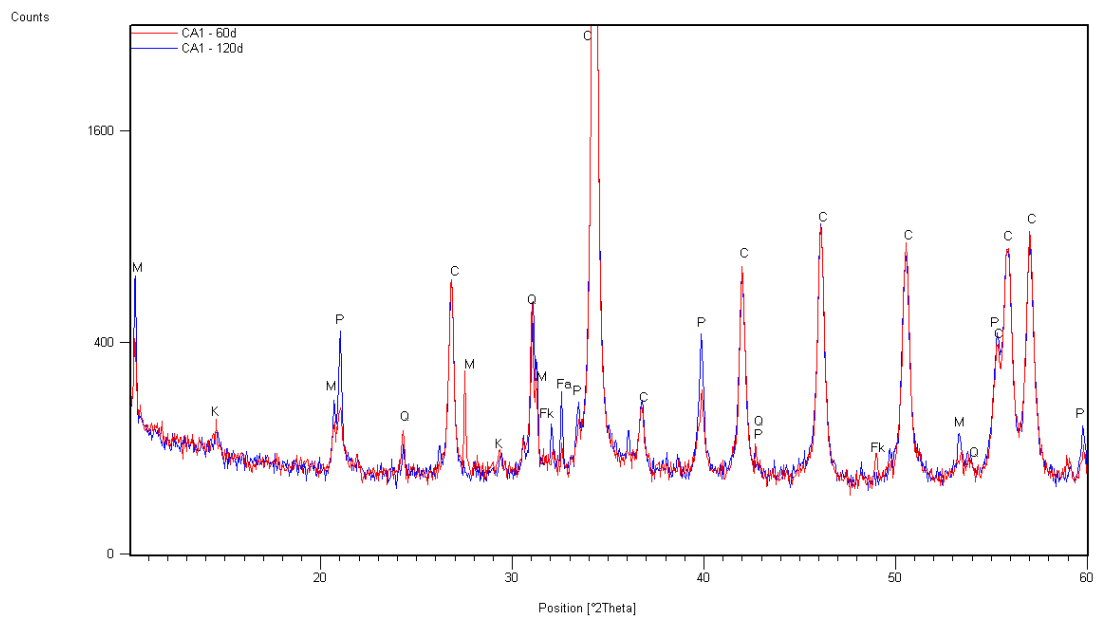
## C6. Análise por difração raios X

Os gráficos seguintes correspondem aos difractogramas obtidos para as várias composições de argamassas e para o resíduo cerâmico.

- Resíduo cerâmico

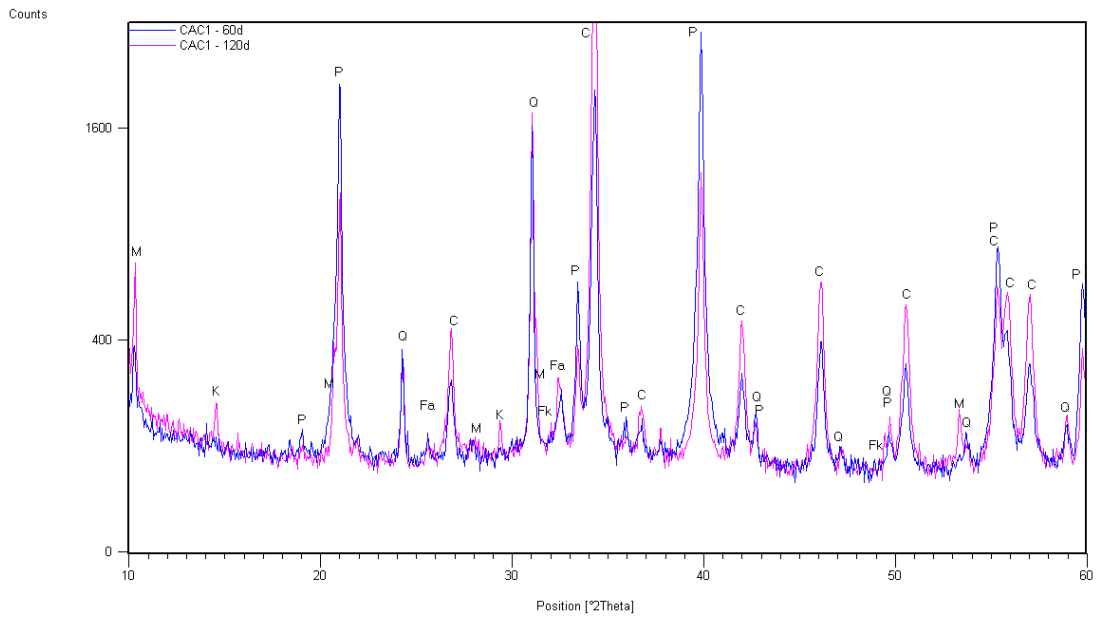


- Argamassas CA sujeitas a cura laboratorial aos 60 e aos 120 dias de idade

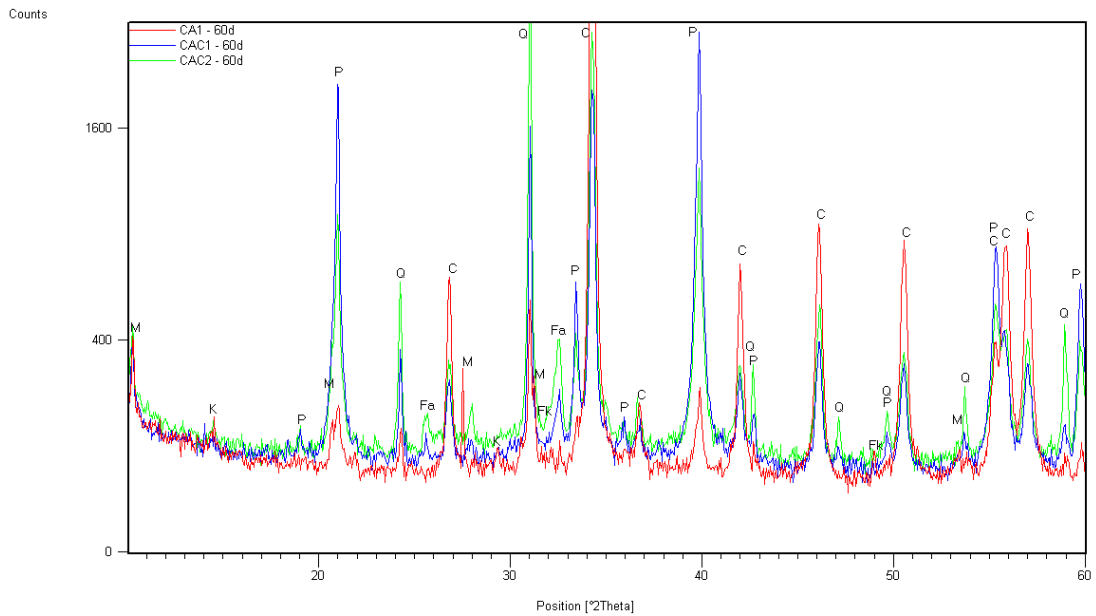


# Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Argamassas CAC1 sujeitas a cura laboratorial aos 60 e aos 120 dias de idade

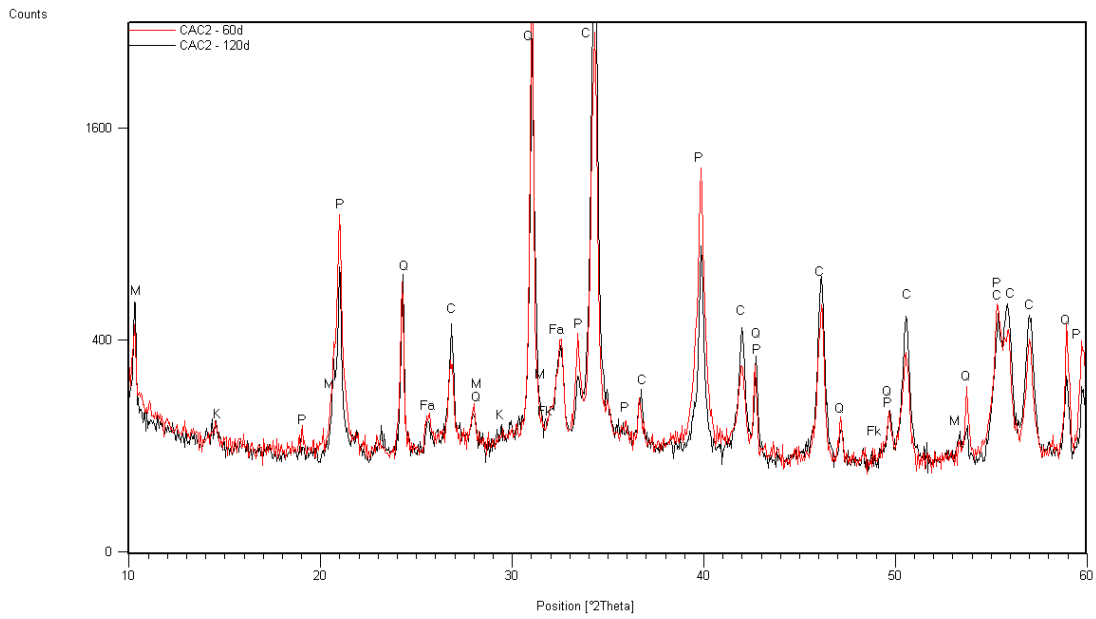


- Argamassas CA, CAC1 e CAC2 sujeitas a cura laboratorial aos 60 dias de idade

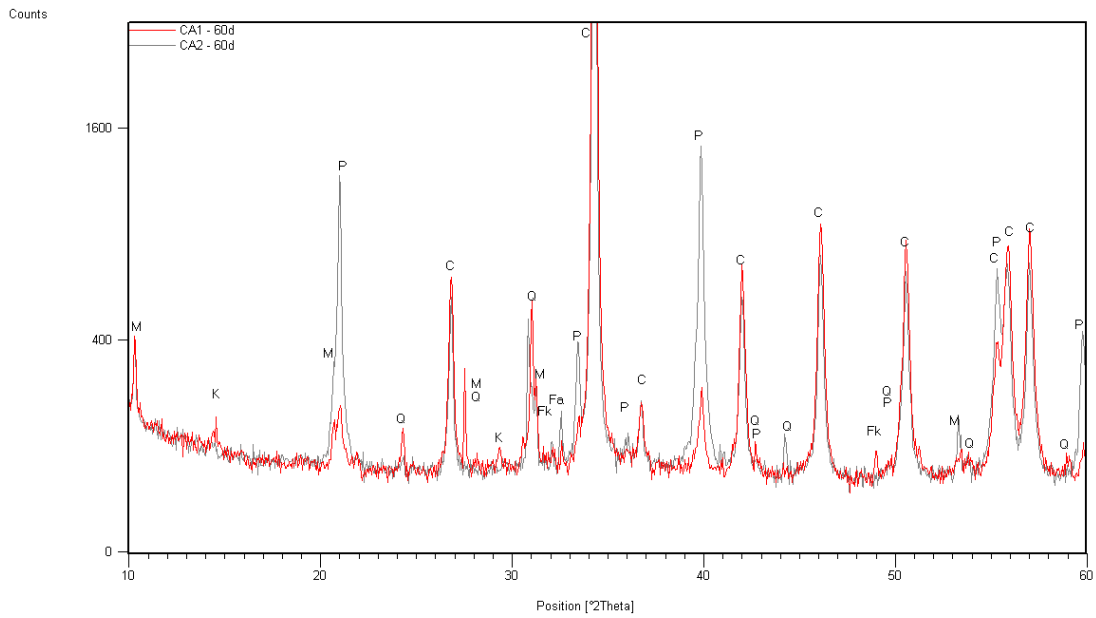


# Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Argamassas CAC2 sujeitas a cura laboratorial aos 60 e aos 120 dias de idade

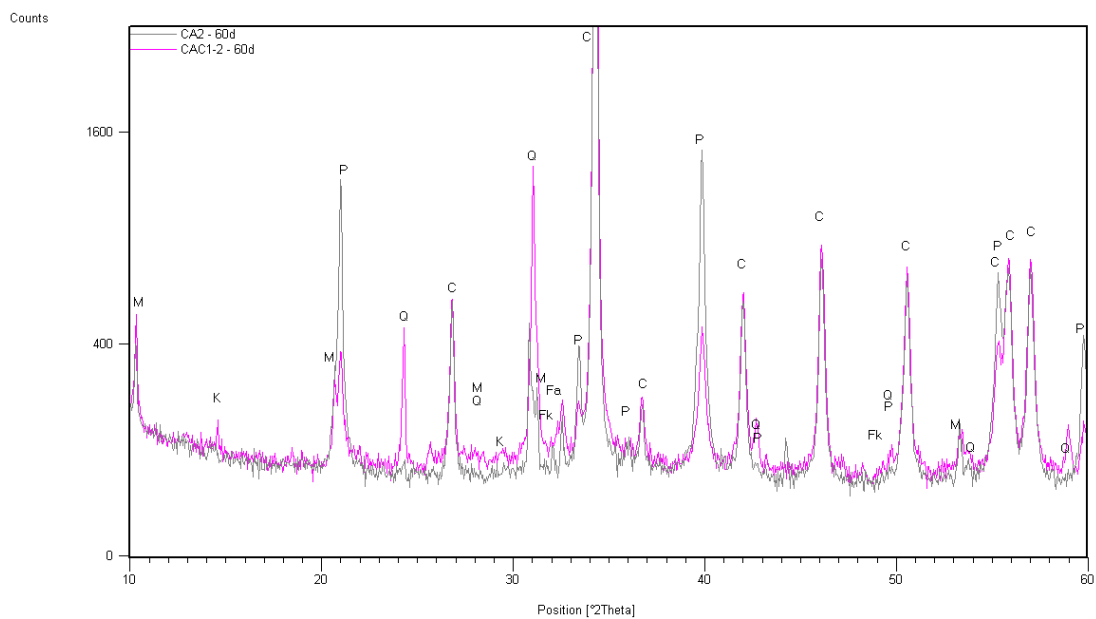


- Argamassas CA sujeitas a cura laboratorial e marítima aos 60 dias de idade

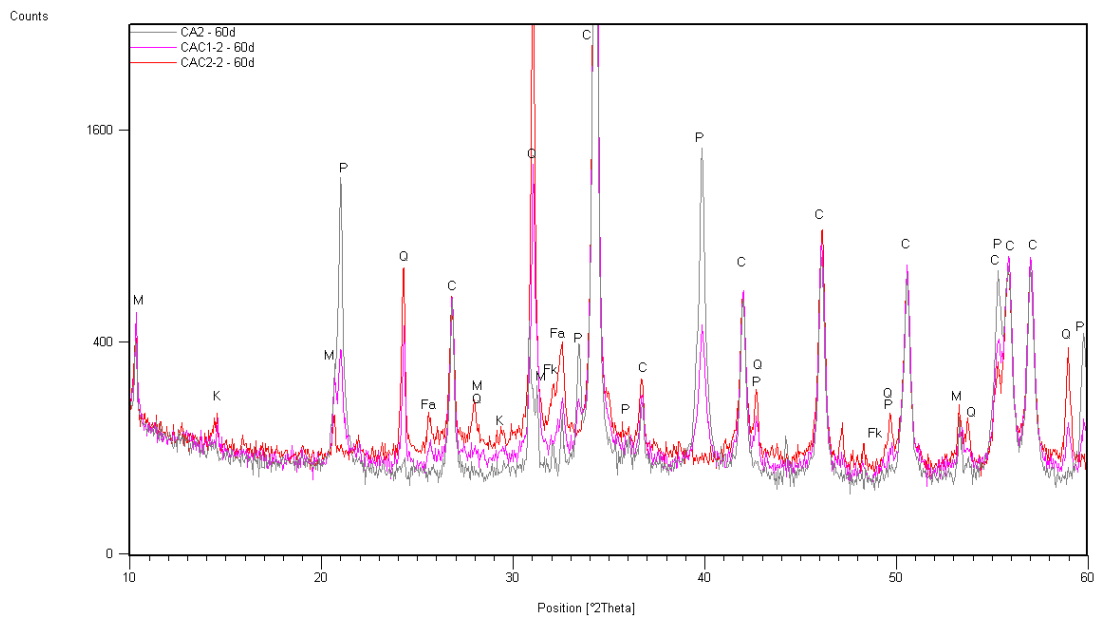


# Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Argamassas CA e CAC1 sujeitas a cura marítima aos 60 dias de idade



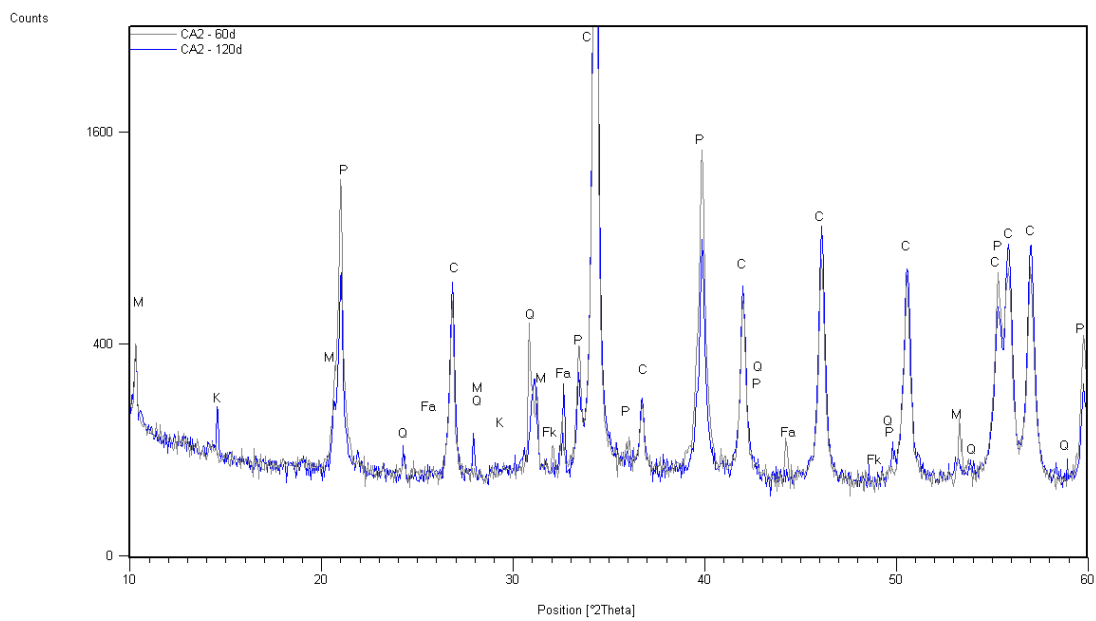
- Argamassas CA, CAC1 e CAC2 sujeitas a cura marítima aos 60 dias de idade



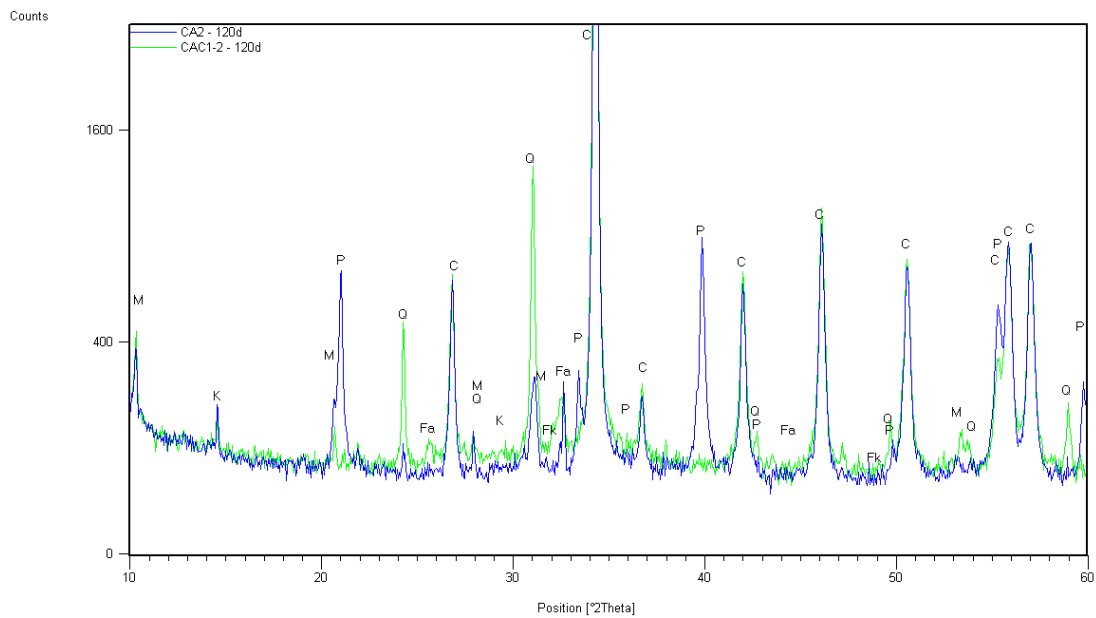


# Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Argamassas CA sujeitas a cura marítima aos 60 e aos 120 dias de idade

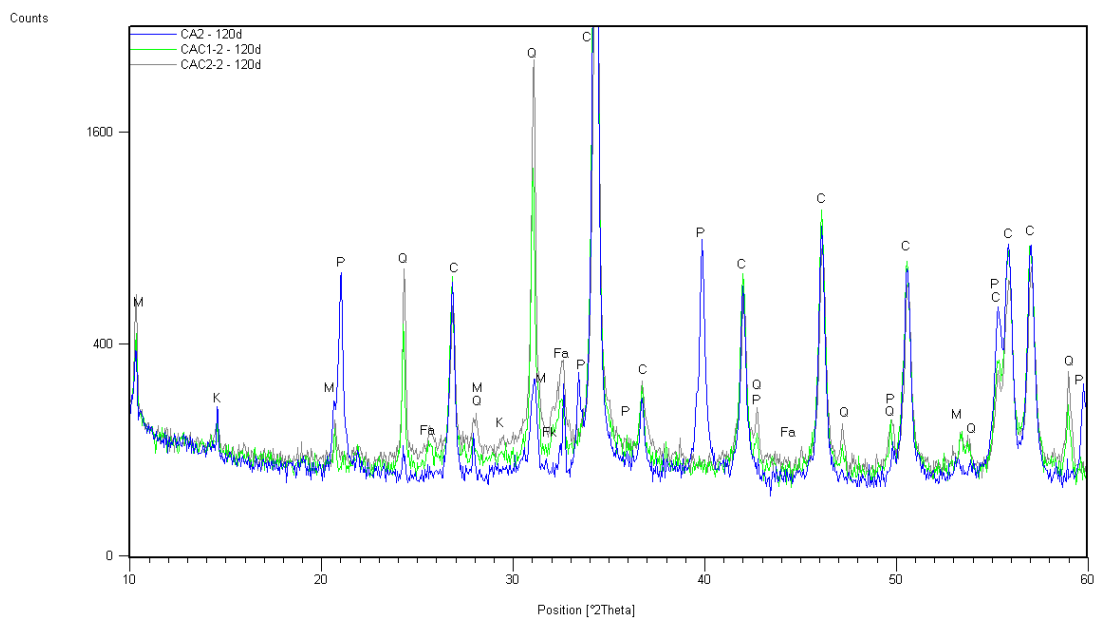


- Argamassas CA e CAC1 sujeitas a cura marítima aos 120 dias de idade



## Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade

- Argamassas CA, CAC1 e CAC2 sujeitas a cura marítima aos 120 dias de idade



Notação: C – Calcite; Q – Quartzo; P – Portlandite; Fk – Feldspato potássico; Fa – Feldspato sódico; M – Mica; K – Caulinite; W – wollastonite.