



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

***“Incorporação de resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para a reabilitação de edifícios.”***

**MARIA JOÃO E VIEIRA CAIADO FERREIRA CARDOSO**

Licenciada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Edificações.

**Orientadora:**

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

**Co-orientador:**

Engenheiro, José Domingos Costa, CIARGA, ARGAMASSAS SECAS, S.A.

**Júri:**

Presidente: Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais: Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Doutora, Maria da Graça Alfaro Lopes

**Dezembro 2014**



## **AGRADECIMENTOS**

A concretização da presente dissertação só foi possível devido ao apoio e compreensão de diversas pessoas que me acompanharam e por isso quero prestar o meu agradecimento.

À orientadora, Professora Doutora Carla Maria Costa, agradeço todo o apoio, confiança e disponibilidade demonstrada desde o momento da escolha do tema até à entrega da dissertação. Agradeço também a motivação transmitida, bem como o rigor na correcção da dissertação, que contribuíram bastante para o meu conhecimento geral.

À CIARGA, agradeço desde já ao Eng.º José Costa, pela ajuda, pelo conhecimento transmitido bem como a disponibilidade demonstrada. Agradeço também à CIARGA o material disponibilizado que serviu para o desenvolvimento da campanha experimental do presente trabalho final de mestrado.

À Cátia e à Inês, agradeço a disponibilidade e apoio durante o trabalho final de mestrado, contribuindo também para a minha integração no laboratório. Agradeço o facto de se mostrarem sempre disponíveis, com espírito de entreatuda e apoio disponibilizado sempre que necessário nos ensaios. Em geral, agradeço a informação e conhecimento disponibilizado que contribuíram para uma boa organização e desenvolvimento das actividades decorridas em laboratório, bem como a amizade durante a elaboração desta dissertação.

À Raquel e ao António, técnicos do laboratório de materiais de construção do ISEL, agradeço todo o apoio prestado durante a campanha experimental, bem como, a recepção e acolhimento no laboratório que contribuíram para um ambiente de trabalho agradável.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), os recursos disponibilizados que permitiram a concretização desta dissertação, através do Projeto de Investigação (Ref.ª PTDC/ECM/113115 /2009) “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia”.

Agradeço à minha família, nomeadamente ao meu pai que sempre me acompanhou no meu percurso académico, insistindo na importância duma boa formação, incentivando a que fizesse mais e melhor, mostrando-me que o conhecimento só nos enriquece enquanto pessoas.

Por fim, aos meus irmãos Carolina, Francisca e Joaquim, que sempre ouviram os meus desabafos e me deram força para continuar, demonstrando sempre apoio e compreensão durante todo o mestrado. Agradeço também ao meu cunhado Hugo, que sempre se mostrou disponível para me ouvir, pela amizade e apoio.

A todos um obrigado!

## RESUMO

Actualmente o país dispõe de património construído significativo, que obviamente vai precisando de manutenção e reparação para ir assegurando as suas funcionalidades com segurança. Neste sentido, a reabilitação de edifícios é necessária à preservação dos seus aspectos funcionais enquanto, concomitantemente, concorre para a mitigação dos impactos ambientais do sector da construção, particularmente, se reutilizar resíduos industriais.

Neste contexto, o presente trabalho final de mestrado pretende avaliar a viabilidade de incorporar o catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico (FCC), gerado na refinaria da Petrogal, em Sines, como substituto parcial da cal hidráulica de argamassas para reabilitação de edifícios.

A campanha experimental incluiu o estudo de três famílias de argamassas de cal hidráulica, sendo que uma das famílias eram argamassas comerciais para reabilitação de edifícios - que neste trabalho foram usadas para referência - e as outras duas famílias eram argamassas nas quais a cal hidráulica foi substituída parcialmente entre 0 e 10%, em massa, pelo catalisador exausto de FCC. Estas duas famílias de argamassas diferiram entre si nas areias que se usaram na sua preparação (numa das famílias usou-se areia mista predominantemente siliciosa, na outra areia calcária).

Os ensaios realizados no estado fresco foram: consistência por espalhamento (no qual se considerou o valor do espalhamento constante, variando a quantidade de água inserida nas argamassas) e o ensaio de massa volúmica. No estado endurecido das argamassas avaliaram-se: as resistências mecânicas à flexão e à compressão aos 28 e 91 dias de hidratação; a absorção de água por capilaridade e a respetiva secagem; a permeabilidade à água líquida; a velocidade de propagação de onda ultrassónica; a resistividade eléctrica; a variação dimensional e a tensão de aderência ao suporte.

Os resultados deste estudo mostraram que a incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica contribui para o aumento da resistência à compressão

quando comparados com os valores de resistência mecânica das argamassas cujo ligante era, apenas, cal hidráulica. Este comportamento é atribuído à elevada actividade pozolânica do resíduo de FCC.

A presente dissertação permitiu, ainda, concluir que, o aumento da quantidade do resíduo de FCC incorporado, tendencialmente conduz a valores de resistividade eléctrica maiores, tanto aos 28 como aos 91 dias de idade, e por outro lado o aumento da quantidade de resíduo de FCC incorporado contribui para a diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 28 dias. Relativamente à variação dimensional, verifica-se que independentemente das condições de cura adoptadas para as argamassas – dentro ou fora de água - estas sofrem retracção apresentando aos 91 dias de idade, valores superiores aos 28 dias de idade. No entanto, na gama de teores de incorporação de resíduo estudada, os valores da retração não são, tipicamente, influenciados pela quantidade de resíduo presente no ligante, embora, nas argamassas sujeitas à cura fora de água, preparadas com areia siliciosa se observe uma ligeira tendência para o aumento da retracção, à medida que se aumenta a quantidade de resíduo de FCC, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação.

PALAVRAS-CHAVE: argamassas de cal; cal hidráulica; resíduo de FCC; pozolanas; argamassas de reabilitação; reabilitação de edifícios.

## ABSTRACT

Nowadays the country is dealing with some built heritage, which will obviously need maintenance and repair to ensure their functionality safely. Therefore, the resources to the building rehabilitation is a necessary practice to preserve functions but also to mitigate the environmental impacts of the construction sector, specially if it reuses industrial wastes.

This work intends to evaluate the viability of using the spent catalyst generated by the fluid catalytic cracking (FCC) unit as a partial replacement of hydraulic lime for rehabilitation mortars. This waste is generated in the FCC unit at Sines Refinery (owned by Portuguese oil company, Petrogal)

The experimental program included the study of three families of hydraulic lime mortars, one of the families were commercial hydrated lime mortar, used for reference and the other two families were mortars where the lime has been replaced partially between 0 and 10 % in mass, with waste FCC. These families of mortars differ in the sands present in their constitution (where as in one case it is sand predominantly siliceous in the other family is limestone sand).

The tests that were done in the fresh state were: a flow consistence (in which was considered the value of the flow constant, varying the amount of water inserted) and the density test. In the hardened state were evaluated: the flexural and compressive mechanical strengths, at the 28<sup>th</sup> and the 91<sup>st</sup> days of hydration; the water absorption by capillarity and its drying; the permeability to liquid water; the propagation velocity of the ultrasonic wave; electrical resistivity; dimensional variation and tension adherence to the support.

This study showed that the incorporation of the waste FCC in hydraulic lime mortars, contribute to the increase of the compressive strength when compared to the strength values of the mortars that only uses only hydraulic lime as binder.

This dissertation also allowed to conclude that the increased amount of the incorporated waste FCC tends to lead to higher electrical resistivity values, both at the 28<sup>th</sup> and at the 91<sup>st</sup> days of age and on the other hand increasing the amount of incorporated waste FCC contributes to reduce the coefficient of capillarity at the 28<sup>th</sup> day. Regarding the dimensional variation, it appears that independently of the curing conditions adopted for mortars - in or out of water - these always suffer shrinkage at the 91<sup>st</sup> day, higher values than at the 28<sup>th</sup> day. However, the shrinkage values and not typically influenced by the amount of waste FCC used, although in the mortars cured outside of water and prepared with siliceous sand it was observed a slight tendency to shrinkage, as the amount of waste FCC was increased, both at the 28<sup>th</sup> and at the 91<sup>st</sup> days of hydration.

**KEYWORDS:** lime mortars; hydraulic lime; waste FCC catalyst; pozzolan; rehabilitation mortars; building rehabilitation.

# ÍNDICE DO TEXTO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA .....	1
1.2	OBJECTIVOS DO TFM .....	2
1.3	METODOLOGIA.....	2
1.4	ESTRUTURA DO TFM .....	3
2.	SÍNTESE DE CONHECIMENTOS .....	5
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	5
2.2	ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO .....	7
2.3	CONSTITUINTES TÍPICOS DUMA ARGAMASSA DE REABILITAÇÃO .....	8
2.4	VANTAGEM DA UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS .....	12
2.5	CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA (FCC) .....	13
3.	DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....	17
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	17
3.2.	MATERIAIS.....	20
3.2.1.	Cal hidráulica .....	20
3.2.2.	FCC.....	20
3.2.3.	Agregados.....	21
3.3.	REALIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	23
3.3.1	Procedimento de mistura.....	23
3.3.2	Preparação das amostras prismáticas e cura .....	24
3.3.3	Preparação em suporte de tijolo e cura.....	28
3.4.	ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO .....	30
3.4.1	Consistência por espalhamento .....	30
3.4.2	Massa Volúmica .....	32
3.5.	ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	34
3.5.1	Resistências Mecânicas .....	34
3.5.2	Absorção de água por capilaridade.....	37
3.5.3	Ensaio de Secagem .....	40
3.5.4	Permeabilidade à água líquida .....	42
3.5.5	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas .....	45
3.5.6	Resistividade Eléctrica .....	47
3.5.7	Análise de variação dimensional .....	50

3.5.8	Tensão de aderência à tracção.....	52
4.	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	55
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	55
4.2	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	55
4.2.1	Consistência por espalhamento .....	55
4.2.2	Massa Volúmica .....	58
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	59
4.3.1	Resistência Mecânica .....	60
4.3.2	Absorção de água por capilaridade.....	68
4.3.3	Ensaio de Secagem .....	80
4.3.4	Permeabilidade à água líquida .....	85
4.3.5	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas .....	86
4.3.6	Resistividade Eléctrica .....	90
4.3.7	Análise de Variação Dimensional .....	93
4.3.8	Tensão de aderência à tracção.....	97
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	101
5.1	CONCLUSÕES.....	101
5.2	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
	ANEXOS .....	i
	ANEXO A – FICHA TÉCNICA .....	iii
	ANEXO B – REGISTO .....	vii
	ANEXO C – ESTUDOS REALIZADOS ÀS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	xiii
	ANEXO D – ESTUDOS REALIZADOS ÀS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	xvii

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1- Compostos químicos típicos da composição de ligantes de acordo com a notação específica utilizada na Química tradicional e no domínio da “Química do cimento” .....	XVI
Tabela 3.1 - Notação adoptada para as argamassas em função da areia e da composição mássica do ligante .....	18
Tabela 3.2 - Propriedades das argamassas avaliadas (nos estados fresco e endurecido), instituição onde se realizaram os ensaios, normas e métodos dos ensaios que descrevem os respectivos procedimentos experimentais a seguir .....	19
Tabela 3.3 – Características químicas do catalisador exausto de FCC .....	21
Tabela 3.4 – Composição química da areia siliciosa e calcária e referências das normas de ensaio de acordo como foram avaliadas .....	22
Tabela 3.5 – Agregados das argamassas da família “S” e respectiva quantidade utilizada (%).....	22
Tabela 3.6 – Agregados das argamassas da família “CS” e respectiva quantidade utilizada (%).....	23
Tabela 3.7 – Tempos em que as pesagens foram realizadas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	39
Tabela 3.8 – Tempos em que as pesagens foram realizadas durante o ensaio de secagem .....	41
Tabela 4.1 – Valores de espalhamento para as argamassas com areia siliciosa (família “S”). .....	56
Tabela 4.2 – Valores de espalhamento para argamassas com areia calcária (família “CS”). .....	56
Tabela 4.3 – Índice de Actividade pozolânica para as argamassas das famílias “S” e “CS” .....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – FCC utilizado na campanha.....	20
Figura 3.2 – Mistura das argamassas. a – Mistura mecânica; b – Mistura manual.....	24
Figura 3.3 – Preparação das amostras prismáticas. a - Molde para amostras prismáticas; b - Molde oleado; c - 1ª camada do enchimento do molde; d - 2ª camada do enchimento do molde; e - Alisamento da superfície do molde; f – Argamassa preparada para iniciar cura. ....	26
Figura 3.4 – Preparação em suporte de tijolo. a - Tijolo com molde colocado; b - Enchimento do molde com argamassa; c - Tijolo com argamassa depois de rasado; d - Tijolo preparado para condições de cura. ....	29
Figura 3.5 – Mesa de espalhamento com respectivo equipamento de ensaio.....	31
Figura 3.6 – Ensaio da resistência mecânica. a – Equipamento necessário para a realização do ensaio; b e c – rotura por flexão; d – provete partido por rotura por flexão; e e f – rotura por compressão. ....	36
Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. a - câmara de secagem; b - secagem do verniz das amostras no exsicador; c - amostras depois de secas e envernizadas; d – base das amostras colocadas na água para realização do ensaio. ....	39
Figura 3.8 – Ensaio de permeabilidade à água líquida .....	44
Figura 3.9 – Ensaio de Ultrassons. a – Equipamento necessário para a realização do ensaio; b – calibração do equipamento de leitura da velocidade; c – colocação de vaselina na amostra a testar. ....	47
Figura 3.10 – Ensaio de resistividade. a – Equipamento necessário à realização do ensaio; b – Colocação da amostra a testar; c, d – Amostra preparada para testar sem esponja; e – Amostra preparada para testar com esponja; f – Equipamento de leitura- multímetro. ....	49

Figura 3.11 – Ensaio de análise da variação dimensional. a- Equipamento de leitura – deflectómetro analógico; b – Amostras prismáticas com picoteles para ensaiar; c – Leitura da dimensão da amostra. ....	51
Figura 3.12 – Ensaio de Aderência. a – Equipamento utilizado no ensaio de aderência; b – Arrancamento da pastilha quadrada metálica; c – Pastilha quadrada metálica depois de solta com argamassa. ....	53
Figura 4.1 – Quantidade de água adicionada para cada argamassa (g), sendo as famílias diferenciadas por cores.....	56
Figura 4.2 – Massa Volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), sendo as famílias diferenciadas por cores. ....	58
Figura 4.3 – Relação entre Massa Volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e quantidade de água por argamassa (g). ....	59
Figura 4.4 - Resistência à flexão (MPa) das argamassas aos 28, 56 e 91 dias de idade (diferenciadas por cores, da esquerda para a direita, por família das argamassas comerciais, família das argamassas compostas por areia mista predominantemente siliciosa e família das argamassas preparadas com areia calcária, respectivamente). ....	61
Figura 4.5 - Resistência à compressão (MPa) das argamassas aos 28, 56 e 91 dias de idade (diferenciadas por cores, da esquerda para a direita, por família das argamassas comerciais, família das argamassas compostas por areia mista predominantemente siliciosa e família das argamassas preparadas com areia calcária, respectivamente). ....	62
Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) das argamassas da família “S”, aos 28 dias de idade. ....	69
Figura 4.7 - Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) das argamassas da família “CS”, aos 28 dias de idade. ....	69
Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) das argamassas da família “S”, aos 91 dias de idade. ....	71
Figura 4.9 - Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) das argamassas da família “CS”, aos 91 dias de idade. ....	71

Figura 4.10 – Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg/m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia mista predominantemente siliciosa aos 28 dias de idade.....	73
Figura 4.11 – Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg/m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia calcária aos 28 dias de idade. ....	73
Figura 4.12 - Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg/m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia mista predominantemente siliciosa aos 91 dias de idade.....	74
Figura 4.13 - Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg/m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia calcária aos 91 dias de idade. ....	74
Figura 4.14 – Coeficiente de Capilaridade (C.C.) ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ ) das argamassas, aos 28 e 91 dias de idade.....	75
Figura 4.15 – Relação entre Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ ) e Resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 28 dias de idade.....	78
Figura 4.16 – Relação entre Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ ) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 91 dias de idade.....	79
Figura 4.17 – Curva de secagem das amostras de argamassa da família “S”, aos 28 dias de idade. ....	81
Figura 4.18 - Curva de secagem das amostras da família “CS”, aos 28 dias de idade. ....	81
Figura 4.19 - Curva de secagem dos provetes de argamassa de cal hidráulica com areia mista predominantemente siliciosa, aos 91 dias de idade. ....	83
Figura 4.20 - Curva de secagem dos provetes de argamassa de cal hidráulica com areia mista calcária, aos 91 dias de idade. ....	83
Figura 4.21 – Velocidade de propagação das ondas nas argamassas, aos 28 e 91 dias de idade.....	86
Figura 4.22 - Relação entre velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 28 dias de idade. ....	88

Figura 4.23 - Relação entre velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 91 dias de idade. ....	89
Figura 4.24 – Resistividade eléctrica das argamassas aos 28 e 91 dias de idade. ....	90
Figura 4.25 – Relação entre resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) e velocidade de propagação de onda (m/s) das argamassas aos 28 dias de idade. ....	92
Figura 4.26– Relação entre resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) e velocidade de propagação de onda (m/s) das argamassas aos 91 dias de idade. ....	93
Figura 4.27 – Variação dimensional das argamassas nas condições de cura fora de água, aos 28 e 91 dias de idade. ....	95
Figura 4.28 – Variação dimensional das argamassas nas condições de cura dentro de água, aos 28 e 91 dias de idade. ....	95
Figura 4.29 –Tensão de aderência ao suporte (MPa), aos 28 e 91 dias de idade. ....	98

## LISTA DE SÍGLAS E ABREVIATURAS

### SIGLAS

---

- CIARGA – Empresa: Argamassas secas S.A.
- EN – Norma Europeia
- FCC – Catalisador da unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC é a abreviatura adoptada genericamente a partir da designação da unidade em inglês “*Fluid Catalytic Cracking*”)
- HL 5 – Cal hidráulica com classe de resistência 5
- IA – Índice de Actividade pozolânica
- ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- NBR – Norma Brasileira
- NHL – Cal hidráulica natural
- NP – Norma Portuguesa
- TFM – Trabalho Final de Mestrado

### ABREVIATURAS

---

- $\Delta_M$  - Variação da massa do provete (g)
- $F_a$  – Tensão de aderência (MPa)
- $R_c$  – Resistência à compressão (MPa)
- $R_f$  – Resistência à flexão (MPa)
- $W_i$  – Teor em água (%)
- $\rho_m$  – Massa volúmica da argamassa ( $\text{kg/m}^3$ )
- $d_m$  – Diâmetro médio de espalhamento (mm)
- Pz – Pozolana
- V – Velocidade de propagação da onda (m/s)
- M – Quantidade de água absorvida ( $\text{kg/m}^2$ )
- Pal – Permeabilidade à Água Líquida (ml)
- $\varepsilon$  – Valor da extensão (mm/mm)
- $\rho$  – Resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ )

## DESIGNAÇÃO DAS ARGAMASSAS

---

- M\_S – Designação atribuída à argamassa comercial (usada para referência) que inclui na composição areia mista predominantemente siliciosa;
- M\_CS - Designação atribuída à argamassa comercial (usada para referência) que inclui na sua composição areia calcária;
- FCC x (S) – Designação atribuída às argamassas da família da areia mista predominantemente siliciosa, em que x representa a percentagem do resíduo de FCC que substitui o ligante;
- FCC x (CS) - Designação atribuída às argamassas da família da areia calcária, em que x representa a percentagem do resíduo de FCC que substitui o ligante.

## NOTAÇÃO QUÍMICA

---

Tabela 1.1- Compostos químicos típicos da composição de ligantes de acordo com a notação específica utilizada na Química tradicional e no domínio da “Química do cimento”.

<u>Designação</u>	<u>Química</u>	<u>Química do cimento</u>
Alumina	$Al_2O_3$	A
Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	-
Óxido de cálcio	$CaO$	C
Hidróxido de cálcio	$Ca(OH)_2$	CH
Dióxido de carbono	$CO_2$	$\bar{C}$
Água	$H_2O$	H
Sílica	$SiO_2$	S
Silicato bicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Sulfatos	$SO_3$	$\bar{S}$
Silicatos de cálcio hidratado	$xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O$	C-S-H

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA**

Associado ao estado actual de desenvolvimento do país que dispõe dum património construído significativo, as práticas de reabilitação são necessárias devido a aspectos funcionais, ambientais, económicos e sociais. Neste sentido, a reabilitação é uma prática que se prevê que aumente, de modo a melhorar, recuperar, consertar e renovar o património construído já existente. Desta forma, prevê-se que aumente a necessidade da utilização de argamassas de cal, uma vez que são utilizadas frequentemente na reabilitação de edifícios.

A indústria da construção é uma das maiores consumidoras de recursos não renováveis e das maiores emissoras de gases poluentes para a atmosfera [1]. Neste sentido a produção de cal hidráulica tem impacto ambiental, na medida em que consome recursos não renováveis, nomeadamente argila e calcário e, por outro lado, polui o ambiente através de emissão de gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Neste contexto, o presente trabalho final de mestrado (TFM) pretende estudar a viabilidade e avaliar os efeitos de substituir parcialmente cal hidráulica por um resíduo catalítico gerado na unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado, “*Fluid Catalytic Cracking*” (de agora em diante designado por “FCC”), da refinaria de Sines, nas propriedades (no estado fresco e endurecido) das argamassas para reabilitação de edifícios. Desta forma, diminuindo o uso da cal hidráulica e utilizando o resíduo de FCC, prevê-se que esta prática conduza a uma diminuição do teor de resíduos gerados.

Este estudo será realizado no âmbito do projecto de I&D “Eco-Zement: reutilização do resíduo de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado em materiais de base cimentícia” (ref.: PTDC/ ECM/ 113115/ 2009) em curso no ISEL.

Assim, na expectativa de obter argamassas com propriedades que cumpram os requisitos mínimos exigidos, prevê-se que a diminuição do uso de cal hidráulica e o aumento da reutilização do resíduo de FCC contribua para uma prática ambiental sustentável.

## **1.2 OBJECTIVOS DO TFM**

A presente dissertação visa avaliar a viabilidade da incorporação do resíduo de FCC, como substituto parcial de ligante em argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios.

Neste sentido estabeleceram-se os seguintes objectivos:

- Avaliar o efeito de incorporação de resíduo de FCC nas propriedades de argamassas para reabilitação, tanto no estado fresco como no endurecido;
- Analisar os valores e propriedades das argamassas com incorporação de resíduo de FCC à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor;
- Comparar as propriedades das argamassas com incorporação de resíduo de FCC com as argamassas comerciais.

## **1.3 METODOLOGIA**

Numa primeira fase do presente trabalho foi realizada a pesquisa no âmbito do tema em estudo, nomeadamente sobre a origem, características e utilidade do resíduo de FCC, bem como acerca de argamassas de cal para reabilitação. Através da recolha de informação e com o conhecimento adquirido, realizou-se um documento que serviu de proposta de plano de trabalho final de mestrado.

De seguida, desenvolveu-se a campanha experimental que decorreu, essencialmente, de acordo três etapas:

1. Determinação da quantidade de água necessária para cada composição de argamassa, por forma a garantir o espalhamento das argamassas previamente estabelecido;
2. Preparação de argamassas com diferentes composições nas quais se substitui parcialmente cal hidráulica por resíduo de FCC e das argamassas comerciais para referência;
3. Realização dos ensaios experimentais (no estado fresco e endurecido) para as diferentes composições de argamassas elaboradas.

Os ensaios realizados no estado fresco foram mesa de espalhamento e massa volúmica. Os ensaios realizados no estado endurecido foram resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, ensaio de secagem, permeabilidade à água líquida, velocidade de propagação da onda ultrassónica, resistividade eléctrica, variação dimensional e ensaio de tensão de aderência ao suporte.

Por fim, os resultados obtidos experimentalmente foram tratados e analisados, seguindo-se a redacção da dissertação.

## **1.4 ESTRUTURA DO TFM**

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo que o presente capítulo da Introdução justifica o tema escolhido, apresenta os objectivos do trabalho e descreve a estrutura do presente TFM. Os restantes capítulos apresentados seguidamente colocam em evidência os principais assuntos abordados.

O capítulo 2, apresenta uma parte da dissertação mais teórica, que revela a síntese de conhecimentos no âmbito do tema, obtida a partir de referências bibliográficas já existentes.

O capítulo 3, descreve a campanha experimental apresentando a descrição dos materiais utilizados, bem como o procedimento de mistura das argamassas preparadas. São também apresentados os ensaios realizados e métodos utilizados para a sua realização. Neste sentido, são também descritos os materiais usados na realização de cada ensaio, por forma a cumprir os objectivos propostos.

O capítulo 4, apresenta, analisa e discute os valores e resultados obtidos nos ensaios realizados. A apresentação dos resultados é feita, sobretudo, recorrendo a gráficos e tabelas, onde se procede a uma comparação de valores obtidos para as argamassas em estudo e sempre que possível é feita a comparação com valores adquiridos noutros estudos idênticos existentes.

Por fim, o capítulo 5, apresenta as conclusões obtidas no decorrer do trabalho realizado durante a campanha experimental, bem como as propostas para desenvolvimentos futuros.

Relativamente às referências bibliográficas e anexos necessários apresentar, estes encontraram-se no final de toda a parte escrita da presente dissertação.

## **2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Actualmente, a reabilitação é crescente, na medida em que o património construído é significativo, e esta é uma prática vantajosa e de relevância em diversos aspectos (subcapítulo 1.1).

O acto de reabilitar, implica preservar os elementos já construídos, por forma a evitar demolições e por conseguinte respectivas reconstruções. Desta forma, e através da reabilitação prevê-se uma diminuição do consumo de energia na produção e aplicação de produtos de construção, bem como a redução de emissões de CO<sub>2</sub> [2].

Os edifícios de alvenaria eram construídos com pedras, tijolos e blocos, com auxílio de argamassas como ligante com diversas funções como: assentamento, reboco, acabamento, entre outros [3]. Assim, quando se pretende executar uma reabilitação ou manutenção, é essencial considerar-se o suporte existente na edificação, bem como respeitar as características pré-existentes, possibilitando que as argamassas hoje utilizadas sejam compatíveis com o suporte a que estarão sujeitas.

Cada vez mais as argamassas de cal são objecto de estudo, uma vez que estas são também um contributo na reabilitação de edifícios e na medida em que existe a crescente necessidade de manutenção, reabilitação e conservação do património já existente [4]. Neste sentido, prevê-se que as argamassas actualmente desenvolvidas tenham melhores propriedades nos estados fresco e endurecido em comparação com as argamassas usadas antigamente, proporcionando assim um melhor desempenho por parte das mesmas. Neste sentido, procuram-se argamassas que se adaptem aos edifícios já existentes, e ao mesmo tempo com melhores propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Neste contexto, considerando a reabilitação uma prática actual e a cal um material ligante utilizado em argamassas de reabilitação, o presente estudo procura aprofundar o conhecimento no âmbito de argamassas de cal hidráulica, com substituição parcial entre 0 e 10% (em massa), de cal hidráulica por resíduo de FCC, resíduo este gerado na Refinaria de Sines.

A produção de cal hidráulica tem influência no meio ambiente, na medida em que a produção de cal emite gases como o CO<sub>2</sub> e, simultaneamente existe a necessidade de utilização de recursos não renováveis como a argila e o calcário.

Neste sentido, este trabalho estuda a viabilidade de substituir parcialmente o catalisador exausto de FCC (designação em inglês de *“Fluid Catalytic Cracking”*) como aditivo, em substituição parcial da cal hidráulica, na expectativa de manter os níveis equiparáveis ou melhores das propriedades das argamassas em estudo, nos estados fresco e endurecido, sendo o resíduo de FCC um material promissor com fim a atingir o objectivo do presente trabalho.

O actual capítulo terá uma exposição sintetizada do conhecimento no âmbito do tema do presente TFM, na qual fará uma descrição sobre argamassas de reabilitação (subcapítulo 2.2), posteriormente apresenta os constituintes típicos duma argamassa de reabilitação (subcapítulo 2.3), seguidamente explicar-se-ão as vantagens referentes à utilização de pozolanas numa argamassa (subcapítulo 2.4). Por fim, e para concluir o presente capítulo, dar-se-á a conhecer a origem do catalisador exausto de FCC, bem como, a incorporação do resíduo de FCC (catalisador exausto duma indústria petrolífera) como substituto parcial de ligante.

## **2.2 ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO**

Até ao início do século XX, a cal tinha um papel fundamental na construção das edificações, pois era a cal o principal ligante utilizado nas argamassas [5]. As argamassas eram constituídas por cal aérea ou hidráulica, sendo que a presa numa é feita ao ar e noutra é ao ar e na água, respectivamente.

Hoje em dia, as argamassas à base de cal voltaram a ser objecto de estudo, pois é importante que numa reabilitação ou restauro de edifícios exista compatibilidade entre o suporte e a nova argamassa a utilizar. Tal situação verificou-se devido às argamassas à base de cimento apresentarem alguns problemas de compatibilidade com as argamassas de cal já existentes, nomeadamente o facto de terem propriedades químicas e mecânicas distintas [5].

As argamassas definem-se como sendo uma mistura de um ligante, areia, água e eventualmente adjuvantes e pozolanas [6], formando um revestimento interior ou exterior que melhora e conserta o edifício que se encontra com algumas patologias ou degradado por estar envelhecido.

Uma argamassa de reabilitação tem diferentes aplicações. Esta pode ser utilizada em revestimentos exteriores e interiores, refechamento de juntas e ainda injecções de consolidação [7].

As argamassas devem cumprir requisitos funcionais, consoante a aplicação a que se destinam. No que respeita aos rebocos de edifícios antigos, devem ser avaliados os seguintes aspectos [7]:

- Absorção e evaporação de água;
- Resistências mecânicas (incluindo aderência);
- Resistências aos sais solúveis;
- Libertação de sais solúveis;

- Resistência à acção do gelo;
- Estabilidade dimensional.

Na reabilitação dum edifício, é importante que as argamassas adoptadas para a intervenção sejam as mais adequadas. Desta forma, existem diversos factores a considerar, tais como: características do suporte, o tipo de edifício e respectiva época de construção, o clima da região onde está inserido, bem como as condições ambientais a que está sujeito [8].

No presente trabalho a argamassa em estudo é de reabilitação, sendo uma argamassa de cal hidráulica com incorporação de um aditivo em substituição parcial do ligante.

### **2.3 CONSTITUINTES TÍPICOS DUMA ARGAMASSA DE REABILITAÇÃO**

Uma argamassa tem diferentes constituintes na sua formulação. A sua constituição condiciona não só as propriedades como a sua aplicação.

Assim, tipicamente uma argamassa é constituída por:

- Ligante;
- Agregados;
- Água;
- Adjuvantes (eventualmente);
- Aditivos (eventualmente).

#### **Ligante - Cal Hidráulica**

A cal hidráulica é um material que ganha presa, endurecendo ao ar e dentro de água. A cal hidráulica tem origem em pedra calcária que contenha entre 8 a 20% de argila e que seja tratada termicamente a uma temperatura de cerca de 1000 °C [9].

A cal hidráulica é classificada de acordo com a sua reactividade como um ligante hidráulico *activo*, pois tem capacidade de reagir espontaneamente com a água [10].

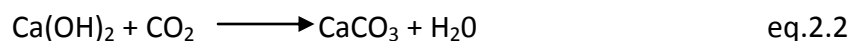
A preparação da cal hidráulica exige as seguintes etapas [9, 10]:

1. Desidratação da argila;
2. Decomposição do calcário;
3. Reacção da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina de argila ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), originando silicatos cálcio ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) e aluminatos de cálcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

A cal viva, que é sobretudo óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), por reacção com a água, fornece a cal apagada, que é sobretudo hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) [9], que se apresenta na equação 2.1.



O endurecimento da cal hidráulica é realizada em duas etapas, sendo que na primeira dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos, dentro e fora de água, conduzindo à formação de C-S-H e numa segunda fase dá-se a recarbonatação do hidróxido de cálcio (equação 2.2) [9,10].



As classificações das cals hidráulicas, são designadas por siglas HL e NHL seguidas de 2, 3,5 ou 5 consoante a sua classe de resistência [9]. No presente trabalho a cal hidráulica utilizada foi HL 5.

A utilização de cal hidráulica numa argamassa apresenta algumas vantagens, entre elas: redução da fissuração, maior intervalo de tempo entre o início e o fim da presa e maior plasticidade [11]. As argamassas com cal hidráulica como ligante, tipicamente apresentam menor resistência mecânica, menor retracção e maior trabalhabilidade relativamente às argamassas de cimento [10].

No que respeita à aplicação, a cal hidráulica pode ter várias aplicações, nomeadamente nas argamassas para elevação de alvenaria, de enchimento, de reboco e acabamento e nas argamassas tradicionais como ligante hidráulico [11].

### **Agregados**

Os agregados podem ser de origem natural, designados por agregados naturais tais como as areias ou godos, e podem também ser de origem artificial, obtidos industrialmente com vista à produção de betão com determinadas propriedades [12].

Habitualmente, a classificação das areias é feita segundo a sua dimensão, considerando limites para as dimensões da partícula. Assim, as areias podem ser classificadas por dimensão de grão fino, médio ou grosso, do mais pequeno para o maior, respectivamente [12].

Os factores característicos das areias que influenciam e podem alterar as características duma argamassa, são [13]:

- Dureza;
- Forma dos grãos;
- Granulometria;
- Porosidade;
- Origem;
- Estado de limpeza da areia.

No presente trabalho as areias utilizadas foram fornecidas pela empresa CIARGA, Argamassas Secas, S.A. Utilizaram-se duas famílias distintas de areias, com diferentes características (subcapítulo 3.2.3), diferindo estas na sua composição química e na diferença de dimensão da partícula.

Na composição duma argamassa o material utilizado em maior quantidade é a areia, sendo que este integra grande parte da sua constituição.

### **Adjuvantes**

Os adjuvantes são substâncias utilizadas em pequenas quantidades (<5% em massa) adicionadas às argamassas durante o processo de amassadura [5] que servem para atingir determinadas características tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Tipicamente, existem diversos tipos de adjuvantes com funções que modificam algumas propriedades das argamassas, nomeadamente acelerar ou retardar a presa, diminuir a quantidade de água necessária durante o processo de amassadura e alterar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco, entre outras propriedades possíveis de serem modificadas com a incorporação de adjuvantes [14]. Neste sentido existem diversos adjuvantes como os introdutores de ar, aceleradores e retardadores de presa, retentores de água, entre outros.

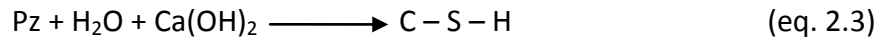
No presente trabalho, os adjuvantes são dispensados para que os valores resultantes das amostras ensaiadas sejam comparáveis com valores típicos, sem que haja influência no comportamento das argamassas e nos resultados obtidos nos ensaios realizados, bem como nas respectivas propriedades da argamassa de cal hidráulica em estudo.

Desta forma, através dos resultados podem-se analisar e discutir os valores, verificando quais os adjuvantes mais interessantes de adicionar nas argamassas em estudo, no entanto, essa análise sai fora do âmbito desta dissertação.

### **Aditivos - Pozolanas**

As pozolanas são materiais constituídos por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) ou aluminossilicatos ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), que por si só não apresentam capacidade ligante. No entanto, quando estão em presença de água e expostas à temperatura ambiente reagem com o

hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) formando C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) com propriedades ligantes [9], que se apresenta na equação 2.3



Os materiais pozolânicos podem ser classificados como materiais pozolânicos naturais tendo origem em rochas lávicas meteorizadas, como materiais pozolânicos artificiais como são exemplo as argilas/ xistos termicamente activados ou serem subprodutos como é o caso das sílicas de fumo, cinzas volantes e cinza de casca de arroz [9, 14].

Na presente dissertação, o aditivo a utilizar é uma pozolana, que se utiliza numa percentagem de 0 – 10%, como substituto parcial do ligante (cal hidráulica).

## **2.4 VANTAGEM DA UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS**

As pozolanas podem ser adicionadas nas argamassas como substituto parcial dum ligante, modificando as suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Neste sentido, prevê-se que incorporação dum pozolana em argamassas de cal, trará vantagens nas seguintes vertentes:

### **Tecnológicas:**

A utilização dum pozolana incorporada numa argamassa, como substituto parcial de ligante, prevê-se que seja uma mais-valia na contribuição para melhores resultados das propriedades das argamassas, nomeadamente da durabilidade, proporcionando um melhor desempenho da argamassa, desenvolvendo-se assim uma *vantagem tecnológica*.

### **Económicas:**

As *vantagens económicas* surgem quando existe a possibilidade de reduzir ou eliminar os custos associados à deposição do resíduo no aterro. Neste sentido, procura-se que o resíduo tenha utilidade como aditivo numa argamassa (pozolana), incorporando-o como constituinte na composição de argamassas de cal hidráulica.

### **Ecológicas:**

Relativamente às *vantagens ecológicas*, a utilização de pozolanas proporciona uma diminuição do uso de cal hidráulica, promovendo assim a possibilidade de reduzir a produção da mesma. Consequentemente, os níveis de poluição (emissões de CO<sub>2</sub>) por parte da mesma diminuem. Por outro lado, com a reutilização de subprodutos, diminui-se o consumo de recursos energéticos utilizados na produção de cal hidráulica.

Simultaneamente, a utilização do catalisador exausto promove uma prática ambiental favorável, já que o resíduo deixará de ter como destino os aterros sanitários [15].

## **2.5 CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA (FCC)**

Na presente dissertação será utilizado o catalisador exausto de FCC com intuito de analisar o comportamento das argamassas depois da sua incorporação. Este resíduo é gerado na indústria petrolífera de Sines – Petrogal, na unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado, em inglês, *Fluid Catalytic Cracking*, de agora em diante designado por catalisador exausto de FCC ou resíduo de FCC.

### **Origem**

O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil, sendo este uma matéria-prima da indústria petrolífera ou petroquímica. O petróleo quando

em bruto, isto é, extraído dos poços, é uma mistura complexa constituída por hidrocarbonetos, ou seja, compostos químicos constituídos por átomos de carbono e de hidrogénio [16, 17].

O processo de refinação de petróleo consiste em quebrar (“*cracking*”) as moléculas de hidrocarbonetos de cadeia longa – óleos combustíveis, em produtos mais leves – gasóleo e gasolina [1, 18]. Consequentes da refinação do petróleo existem diversos produtos, tais como: óleo, nafta, gasóleo, querosene, gasolina, entre outros [19].

O processo de “*cracking*”, ao quebrar as moléculas de hidrocarbonetos, em moléculas mais leves, produz o coque (resíduo com alto teor de carbono) que se deposita sobre a superfície do catalisador, diminuindo a sua eficiência [20]. Desta forma, o catalisador deve ser sujeito a uma regeneração, que passa por colocá-lo a uma temperatura entre os 680 e 750 °C [18]. No entanto, a regeneração não é realizada em todo o catalisador que está sujeito à regeneração durante o processo, sendo por isso necessário retirar o catalisador exausto e substituí-lo por um catalisador que ainda não tenha sido utilizado – catalisador “fresco” [1].

A estrutura do catalisador exausto de FCC apresenta-se sob a forma de microesferas com um tamanho médio de partícula de cerca de 60 µm. Tipicamente, este catalisador é constituído por [18]:

- um zeólito Y (5 – 40%) – aluminossilicatos cristalinos que apresentam estruturas de dimensões bem definidas;
- uma matriz activa e inerte – fornece uma estrutura porosa adequada à difusão dos hidrocarbonetos, parte é constituída por uma fracção activa com alumina e outra por uma fracção inerte composta por argila;
- um ligante que estabelece ligação entre os elementos.

Actualmente, o catalisador exausto gerado pelas indústrias petrolíferas, são destinados a aterros sanitários [15]. Neste caso, o catalisador exausto de FCC gerado pela petrolífera de Sines é objecto de estudo na presente dissertação.

As refinarias de petróleo usam cerca de 500 000 ton/ano de catalisador exausto de FCC, dos quais 20% são usados nas refinarias europeias. Em Portugal, são gerados cerca de 60 000 ton/ano de resíduo de FCC [15]. A refinaria de Sines, pertencente à Galp Energia, iniciou a sua laboração em 1978 e tem uma unidade de FCC [21].

### **Incorporação do catalisador exausto de FCC como substituto parcial de um ligante**

O presente estudo pretende analisar os resultados obtidos na campanha experimental realizada, bem como avaliar a viabilidade e efeito da incorporação do catalisador exausto de FCC numa argamassa de cal hidráulica para reabilitação.

No que concerne à bibliografia existente no âmbito da incorporação de pozolanas em argamassas de cal hidráulica [22, 23] não foram encontrados estudos realizados onde substituam parcialmente o ligante (cal hidráulica) pelo resíduo de FCC.

Assim, os estudos encontrados acerca da incorporação de FCC, são de substituição parcial de cimento [1, 14, 24, 25], podendo assim, estudar e comparar o comportamento das argamassas formuladas no presente trabalho, já que se prevê que a cal hidráulica tenha um comportamento idêntico às argamassas de cimento (ambos ligantes), apresentando ambos resultados diferentes.

***“Incorporação de resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para a reabilitação de edifícios.”***

---

### **3. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

#### **3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A presente campanha experimental teve como objectivo analisar os efeitos da incorporação do catalisador exausto de FCC (resíduo gerado pela indústria petrolífera, com características pozolânicas) nas argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios.

Neste sentido, foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido, com o intuito de avaliar a viabilidade da incorporação parcial do resíduo de FCC, através dos resultados obtidos (subcapítulos 3.4 e 3.5).

A campanha decorreu no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do ISEL, sendo alguns ensaios realizados no laboratório da CIARGA, Argamassas Secas S.A (Tabela 3.2).

As argamassas estudadas foram argamassas hidráulicas constituídas por cal hidráulica, areia siliciosa, areia calcária, “*filler*”, resíduo de FCC e água (Tabela 3.1).

Em concreto, foram preparadas duas famílias de argamassas com substituição parcial de cal hidráulica por resíduo de FCC. As duas famílias de argamassas diferiram entre si na natureza e distribuição granulométrica das areias que entram na sua composição, sendo que numa das famílias usou-se areia mista predominantemente siliciosa e na outra família foi utilizada areia calcária.

Como referência, para cada família de argamassas, usaram-se duas argamassas comerciais distintas (“M\_S” e “M\_CS” com areia mista siliciosa e areia calcária, respectivamente) nas quais a cal hidráulica era o único ligante. As argamassas comerciais têm na sua constituição a mesma razão ligante: areia e as mesmas areias que as restantes argamassas em estudo.

Estas são argamassas já comercializadas pela CIARGA e servirão de referência na análise e comparação dos resultados obtidos nas diferentes famílias de argamassas.

Na Tabela 3.1 apresenta-se a notação que se adoptou para as argamassas que se prepararam e das argamassas comerciais que se usaram, definida em função da areia usada e da composição mássica do ligante.

**Tabela 3.1 - Notação adoptada para as argamassas em função da areia e da composição mássica do ligante**

Razão <i>ligante/sólidos</i> <sup>1</sup> (% mássica)	Notação	Ligante (% mássica)		
		Cal hidráulica	FCC	
25%	Família areia mista - S	FCC 0(S)	100	0
		FCC 2,5(S)	97,5	2,5
		FCC 5(S)	95,0	5,0
		FCC 7,5(S)	92,5	7,5
		FCC 10(S)	90,0	10,0
	Família areia calcária - CS	FCC0 (CS)	100	0
		FCC 2,5(CS)	97,5	2,5
		FCC 5(CS)	95,0	5,0
		FCC 7,5(CS)	92,5	7,5
		FCC 10(CS)	90,0	10,0
Argamassas comerciais	M_S	100	0	
	M_CS	100	0	

<sup>1</sup>: Ligante: cal hidráulica e FCC; sólidos: ligante + areia.

A Tabela 3.2 apresenta os ensaios realizados nos estados fresco e endurecido no decorrer da campanha experimental, bem como as normas e métodos adoptados para a realização dos ensaios, as idades a que as argamassas foram testadas e instituição onde se realizaram os ensaios.

As idades em que os ensaios foram realizados, referem-se ao número de dias contabilizados a partir do qual foi adicionada água nas argamassas durante o procedimento de mistura.

**Tabela 3.2 - Propriedades das argamassas avaliadas (nos estados fresco e endurecido), instituição onde se realizaram os ensaios, normas e métodos dos ensaios que descrevem os respectivos procedimentos experimentais a seguir**

Características	Instituição onde se realiza	Normas/Especificações	Idade do ensaio
<b>ESTADO FRESCO</b>			
Consistência por espalhamento	ISEL	EN 1015 - 3	-
Massa volúmica	ISEL	EN 1015 - 6	-
<b>ESTADO ENDURECIDO</b>			
Resistência flexão e compressão	CIARGA	EN 1015 - 11	28,56 e 91 Dias
Absorção de água por capilaridade	ISEL	EN 1015 -18	28 e 91 Dias
Permeabilidade água líquida	CIARGA	Método de Karsten	28 e 91 Dias
Secagem	ISEL	* <sub>1</sub>	28 e 91 Dias
Tensão de aderência à tracção	CIARGA	EN 1015 - 12	28 e 91 Dias
Análise de variação dimensional	ISEL	* <sub>2</sub>	4, 28 e 91 Dias
Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	ISEL	NBR 15630	28 e 91 Dias
Resistividade	ISEL	* <sub>3</sub>	28 e 91 Dias

\*<sub>1</sub>, \*<sub>2</sub> e \*<sub>3</sub> – Estes ensaios não foram executados segundo nenhuma norma de ensaio ou especificação, sendo que os procedimentos de ensaio estão descritos nos subcapítulos 3.5.3; 3.5.7 e 3.5.6, respectivamente.

No sentido de desenvolver o plano de ensaios e dar início ao mesmo, em cada argamassa foi necessário acertar a quantidade de água, por forma a garantir o cumprimento do valor de espalhamento pretendido para a argamassa ( $170 \pm 5$  mm) através do ensaio da mesa de espalhamento (subcapítulo 3.4.1).

## **3.2. MATERIAIS**

### **3.2.1. Cal hidráulica**

No presente trabalho foram estudadas diferentes argamassas, nas quais o principal ligante foi a cal hidráulica.

A cal utilizada no estudo é classificada de acordo com a norma NP EN 459-1, e designa-se por HL 5, sendo esta comercializada pela CIARGA, a instituição fornecedora da mesma (Anexo A.1).

As principais características químicas da cal hidráulica utilizada são (Anexo A.1) [26]:

- Sulfatos ( $\text{SO}_3$ )  $\leq$  3,0%
- Cal disponível  $\geq$  4,0%

### **3.2.2. FCC**

Na presente campanha experimental, o catalisador exausto de FCC foi usado como substituto parcial da cal hidráulica. Este foi fornecido pela refinaria de Sines da empresa Petrogal. Na Figura 3.1 apresenta-se como o resíduo de FCC foi utilizado na presente campanha.



**Figura 3.1 – FCC utilizado na campanha**

As características químicas do catalisador exausto de FCC [15] encontram-se na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Características químicas do catalisador exausto de FCC**

Composto	Composição Química (% Mássica)
	FCC
SiO <sub>2</sub>	39,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55
CaO	0,09
MgO	0,19
SO <sub>3</sub>	0,23
K <sub>2</sub> O	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,68
Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06
Mn <sub>2</sub> O	0,00
SrO	0,00
Perda ao fogo	1,49

### **3.2.3. Agregados**

No decorrer do trabalho realizado, durante a campanha experimental, recorreu-se à utilização de duas famílias de argamassas que se denominaram “S” e “CS” (apresentadas na Tabela 3.1), uma composta essencialmente por areia siliciosa e outra preparada com areia calcária.

A Tabela 3.4 identifica as composições químicas da areia siliciosa – “S” e da areia calcária – “CS”.

**Tabela 3.4 – Composição química da areia siliciosa e calcária e referências das normas de ensaio de acordo como foram avaliadas**

Composição Química	Areia Siliciosa	Areia Calcária	Normas
Teor em Sílica / Teor em carbonato de cálcio	≥ 99%	≥ 98%	-
Teor em Cloretos	<0,01%	<0,05%	EN 1744: 2009 – Parte 1
Teor em Enxofre total	<0,01%	<0,02%	EN 1744: 2009 – Parte 1
Teor de Húmus	Teste negativo	Teste negativo	EN 1744: 2009 – Parte 1
Absorção de água	<0,2%	<1,5%	NP EN 1097-6/2003: A1 :2010

A composição das argamassas da presente campanha experimental diferiu não só na quantidade de resíduo de FCC que substituiu parcialmente a cal hidráulica, como também nas areias com que as argamassas foram preparadas. Desta forma, a família das argamassas “S”, isto é, areia mista predominantemente siliciosa foi preparada com diferentes tipos de agregados, bem como, a areia calcária foi preparada com diferentes granulometrias de areia calcária.

Neste sentido, as Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam as areias e respectivas percentagens utilizadas para cada família de argamassas “S” e “CS”, respectivamente.

**Tabela 3.5 – Agregados das argamassas da família “S” e respectiva quantidade utilizada (%)**

	Agregados	% Utilizada
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	69,5
	Areia calcária (0,09 - 0,6)	23,9
	“Filler”	6,6

**Tabela 3.6 – Agregados das argamassas da família “CS” e respectiva quantidade utilizada (%)**

	Agregados	% Utilizada
Areia Calcária	Areia calcária (0,09 - 0,6)	66,8
	Areia calcária (0,6 - 1,2)	26,5
	“Filler”	6,7

### **3.3. REALIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS**

#### **3.3.1 Procedimento de mistura**

Na presente campanha experimental foram estudadas três famílias de argamassas, nas quais uma das famílias é comercial (para referência) e as restantes são argamassas que se distinguem devido às areias que as constituem. As argamassas foram denominadas por “S” e “CS” consoante a sua composição, isto é, preparadas com areia mista predominantemente siliciosa ou areia calcária, respectivamente (Tabela 3.1).

Nas argamassas da presente campanha experimental a quantidade de água foi variável, pois a quantidade de cal hidráulica não foi sempre a mesma, sendo parcialmente substituída pelo resíduo de FCC, fazendo variar a quantidade de água necessária à amassadura (Tabela 3.1). Neste sentido, manteve-se constante o valor da mesa de espalhamento das argamassas ( $170 \pm 5\text{mm}$ ) (subcapítulo 3.4.1).

O procedimento de mistura adoptado na presente campanha experimental seguiu os passos seguintes:

1. Homogeneizaram -se os sólidos na misturadora durante 240 segundos (4 minutos);

2. Incorporou-se água nos sólidos misturados no ponto 1. Para que não existisse desperdício de materiais, fez-se uma pré-amassadura manualmente antes da colocação da cuba na misturadora;
3. Misturou-se a argamassa mecanicamente (Figura 3.2 - a) durante 120 segundos (2 minutos) parando para fazer novamente uma mistura manual, por forma a chegar ao fundo da cuba e retirar possíveis sólidos que estivessem depositados no fundo da mesma;
4. Procedeu-se novamente à amassadura mecânica durante mais 120 segundos (2 minutos);
5. Mexeu-se novamente a argamassa manualmente retirando quaisquer materiais que estivessem nas paredes da cuba, homogeneizando a argamassa;
6. Deixou-se a argamassa a “repousar” durante 300 segundos (5 minutos).

Antes da realização do enchimento dos moldes, a argamassa foi sempre mexida manualmente (Figura 3.2 - b).

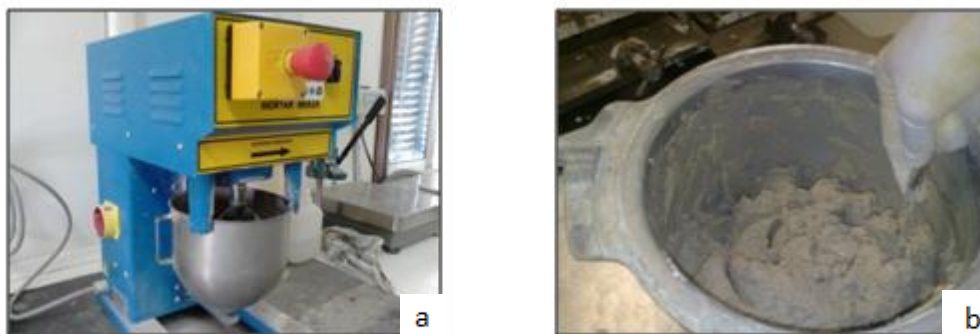


Figura 3.2 – Mistura das argamassas. a – Mistura mecânica; b – Mistura manual

### **3.3.2 Preparação das amostras prismáticas e cura**

Na presente dissertação quando se utiliza a palavra “amostras”, significa que se está a fazer referência aos provetes, isto é, a cada amostra corresponde um provete, sendo que quando falamos de moldes estes são constituídos por 3 amostras prismáticas.

Na elaboração das amostras, o procedimento de mistura das argamassas foi sempre o mesmo, no entanto, existiram diferentes tipos de amostras para diferentes ensaios.

Na presente campanha, as amostras prismáticas foram utilizadas nos ensaios no estado endurecido como resistência à flexão e compressão, absorção de água por capilaridade, ensaio de secagem, ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, resistividade e análise de variação dimensional.

Os moldes prismáticos utilizados, são compostos por três amostras prismáticas de dimensão 40 mm x 40 mm x 160 mm, sendo que cada amostra tem uma capacidade de 256 cm<sup>3</sup>, perfazendo cada molde no seu total uma capacidade 768 cm<sup>3</sup> (Figura 3.3 – a).

Os moldes utilizados nos ensaios para análise de variação dimensional, foram moldes prismáticos próprios, onde se puderam incorporar picoletes que após desmolde ficaram inseridos na argamassa (subcapítulo 3.5.7).

Antes de se iniciarem as misturas, os moldes encontravam-se devidamente preparados. Neste sentido olearam-se os moldes, para que mais tarde, o respectivo desmolde estivesse facilitado (Figura 3.3 – b).

Depois começaram-se a moldar as amostras, sendo este procedimento dividido em duas fases:

1ª Fase:

- Colocou-se a primeira camada de argamassa mais ou menos a meia altura do molde;
- Foram introduzidas em cada amostra, 25 pancadas manualmente com a utilização de um pilão, por forma a eliminar os espaços vazios que pudessem existir no interior da argamassa, evitando ao máximo a formação de poros (Figura 3.3 – c).

2ª Fase:

- Completou-se o preenchimento das amostras colocando-se a segunda camada de argamassa (Figura 3.3 – d), e repetiu-se o procedimento de 25 pancadas por amostra, com o mesmo intuito da 1ª fase;
- Rasou-se o molde, para que a superfície das amostras ficasse lisa, e como utensílio, recorreu-se a uma régua onde o alisamento se fez no sentido da maior aresta das amostras (Figura 3.3 – e).

Depois das fases concluídas, as argamassas foram colocadas na câmara para iniciar a cura nas respectivas condições (Figura 3.3 – f).



**Figura 3.3 – Preparação das amostras prismáticas. a - Molde para amostras prismáticas; b - Molde oleado; c - 1ª camada do enchimento do molde; d - 2ª camada do enchimento do molde; e - Alisamento da superfície do molde; f – Argamassa preparada para iniciar cura.**

Relativamente à cura das amostras, os moldes depois de cheios foram colocados dentro de sacos de plástico com o intuito de aumentar a humidade relativa das argamassas. A câmara utilizada encontra-se a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade de  $65 \pm 5\%$  e, ao colocarem-se as amostras dentro de sacos de plástico, procurou-se garantir as condições de cura com humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ . As amostras estiveram sujeitas a uma elevada humidade relativa durante os primeiros 7 dias de cura.

Sendo que se tratava de uma argamassa de cal hidráulica, desmoldaram-se as amostras prismáticas aos 2 dias de idade (à exceção das amostras para ensaio de variação dimensional). Este desmolde foi realizado com o máximo cuidado, pois as amostras poderiam não estar suficientemente secas e terem alguma tendência a partir, não tendo posteriormente qualquer utilidade.

As amostras preparadas para o ensaio da variação dimensional foram desmoldadas passados 4 dias, uma vez que depois dos primeiros desmoldes, as amostras encontravam-se muito frescas, ficando danificadas e impossibilitando a realização do ensaio pretendido.

Depois do desmolde, as amostras foram colocados novamente dentro dos sacos de plástico na estufa com as mesmas temperatura e humidade.

Quando se terminou o desmolde, procedeu-se à limpeza do molde utilizado, para que este se mantenha em boas condições e preparado para uma próxima utilização.

Passados 7 dias, da preparação das amostras e destas terem sido submetidas às condições de cura indicadas, as amostras foram retiradas dos sacos de plástico e colocadas directamente na câmara de cura sem qualquer elemento que influencie a humidade relativa a que estas estiveram sujeitas ( $65 \pm 5\%$ ).

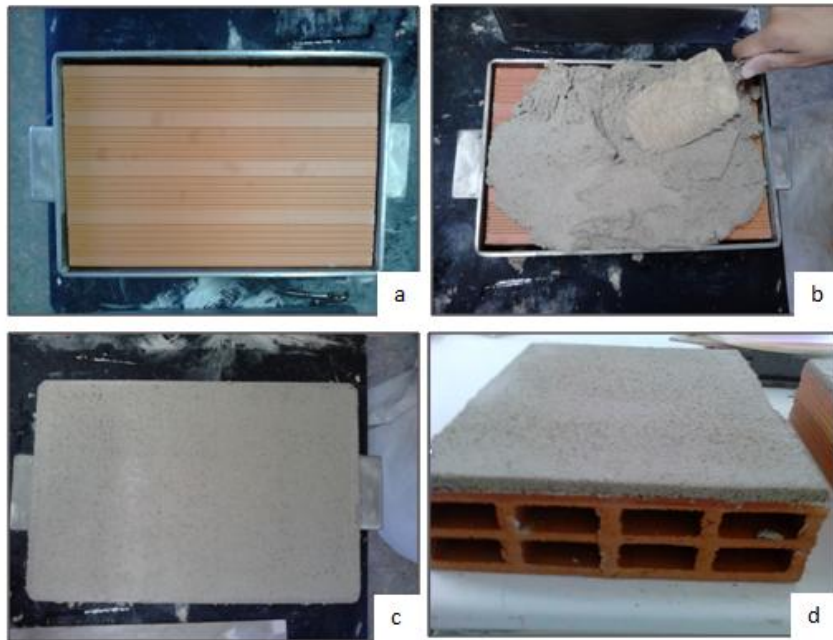
O tempo de cura das amostras foi de 28, 56 e 91 dias consoante o ensaio a realizar (Tabela 3.2).

### **3.3.3 Preparação em suporte de tijolo e cura**

A preparação neste tipo de suporte foi realizada para os ensaios de permeabilidade à água líquida e para o ensaio de aderência (*“pull-off”*). Assim, na elaboração deste tipo de suportes e devido ao tipo de argamassa utilizada, foi necessário minimizar a possibilidade de ocorrência de determinadas situações, como é o caso da fissuração.

Na preparação das argamassas em tijolos os passos seguidos foram:

- Colocou-se o molde na envolvente do tijolo, por forma a limitar a colocação da argamassa (Figura 3.4 – a);
- Procedeu-se ao humedecimento da superfície dos tijolos, não só para que o tijolo não absorvesse a água da argamassa aplicada sobre o mesmo, como também para que esta aderisse melhor ao tijolo e não se soltasse depois de seca;
- Colocou-se a argamassa sobre o tijolo. Foi importante que, na colocação desta, não houvesse espaços vazios e que a argamassa ficasse bastante compacta para que aderisse bem ao tijolo (Figura 3.4 – b);
- Depois da argamassa distribuída sobre o tijolo, com o auxílio de uma régua alisou-se a superfície e retirou-se o excesso de argamassa que o tijolo continha (Figura 3.4 – c);
- Retirou-se o molde que se encontrava à volta do tijolo. O tijolo saiu do interior do molde de baixo para cima para que a argamassa colocada sobre o tijolo se mantivesse intacta;
- Retirou-se o excesso de argamassa que saiu por fora dos limites da dimensão do tijolo, passando a régua pelas faces laterais do tijolo. Desta forma, o tijolo encontrou-se preparado para ser colocado nas respectivas condições de cura (Figura 3.4 – d).



**Figura 3.4 – Preparação em suporte de tijolo. a - Tijolo com molde colocado; b - Enchimento do molde com argamassa; c - Tijolo com argamassa depois de rasado; d - Tijolo preparado para condições de cura.**

A cura das amostras em suporte de tijolo foi realizada numa sala do laboratório da CIARGA, com uma temperatura e humidade de  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$ , respectivamente.

Neste sentido, imediatamente após a preparação de cada composição de argamassa em suporte de tijolo, estas foram levadas para a sala, onde permaneceram até ao dia em que se pretendia ensaiá-las, ou seja, 28 e 91 dias de idade.

Sendo que o ensaio de permeabilidade à água líquida é não destrutivo, as argamassas em suporte de tijolo utilizadas aos 28 dias de idade, mantiveram-se depois de utilizadas no ensaio, nas mesmas condições de cura até aos 91 dias de idade, para serem novamente testadas.

### **3.4. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO**

Os ensaios realizados no estado fresco foram o ensaio de consistência por espalhamento e o ensaio de massa volúmica. A importância da realização dos ensaios indicados, é a possibilidade de se analisar a trabalhabilidade da argamassa em estudo, bem como a necessidade de maior ou menor quantidade água durante o seu processo de amassadura, por forma a obter a consistência pretendida.

#### **3.4.1 Consistência por espalhamento**

O ensaio de consistência por espalhamento teve o intuito de verificar a consistência da argamassa em estudo e averiguar se o valor definido para o presente estudo,  $170 \pm 5$  mm, estava a ser cumprido.

Neste sentido, realizou-se o ensaio da mesa de espalhamento por forma a verificar se a quantidade de água utilizada, foi suficiente para que as argamassas cumprissem o valor de espalhamento definido.

Para a realização deste ensaio, recorreu-se à norma EN 1015-3 [27], segundo a qual se adoptou o procedimento.

#### **Materiais utilizados**

Na realização deste ensaio, foram necessários alguns materiais e utensílios para auxiliar o procedimento (Figura 3.5), tais como:

- Mesa de espalhamento;
- Molde cónico;
- Pilão;
- Colher;
- Régua.

### **Procedimento**

Ao proceder-se à realização deste ensaio, definiram-se os seguintes passos,

1. Humidificou-se a superfície da mesa de espalhamento para de seguida centralizar o molde cónico e dar continuidade aos passos seguintes;
2. Introduziu-se uma primeira camada no interior do molde cónico até um pouco acima de meio;
3. Introduziram-se 10 pancadas manuais, com auxílio do pilão, para ajudar a compactar a argamassa e a preencher os espaços vazios;
4. Concluiu-se o enchimento do molde com uma segunda camada;
5. Procedeu-se novamente às 10 pancadas manuais com pilão;
6. Retirou-se o excesso de argamassa e alisou-se a superfície, com o auxílio de uma régua;
7. Retirou-se o molde cónico na vertical;
8. Rodou-se 15 vezes o manípulo da mesa de espalhamento, por forma a aplicar 15 pancadas durante cerca de 15 segundos ( $\pm 1$  pancada por segundo);
9. Retiraram-se as medidas necessárias para proceder à média dos valores obtidos.



**Figura 3.5 – Mesa de espalhamento com respectivo equipamento de ensaio.**

### **Determinação dos resultados**

O valor de espalhamento foi determinado com base na equação 3.1

$$d_m = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \text{ [mm]} \quad (\text{eq. 3.1})$$

Em que,

$d_m$  – Diâmetro médio de espalhamento (mm)

$d_1, d_2, d_3$  – Diâmetro de espalhamento medido (mm) em direcções diferentes, sendo que duas são ortogonais.

**NOTA:** A norma indica que se deve retirar apenas 2 leituras, no entanto, na presente campanha experimental optou-se por fazer 3 leituras para a determinação da média.

### **3.4.2 Massa Volúmica**

O ensaio de massa volúmica teve como objectivo analisar a influência da incorporação do resíduo de FCC e das areias utilizadas na presente campanha experimental, na massa volúmica das argamassas em estudo no estado fresco.

Para a realização deste ensaio, recorreu-se à norma EN 1015-6 [28], segundo a qual se adoptou o procedimento.

Este ensaio foi realizado para todas as argamassas com diferentes composições, sendo este realizado posteriormente ao ensaio da mesa de espalhamento.

### **Materiais utilizados**

Na realização deste ensaio, foram necessários alguns materiais e utensílios para auxiliar o procedimento, tais como:

- Recipiente;
- Colher;
- Balança de precisão  $\pm 0,1g$ ;
- Pano;
- Régua.

### **Procedimento**

O presente ensaio foi realizado de acordo com o seguinte procedimento:

1. Humedeceu-se o recipiente;
2. Pesou-se o recipiente na balança para se saber o valor da tara;
3. Encheu-se o recipiente com a argamassa em estudo e levantou-se ligeiramente o mesmo de um lado e depois do outro alternadamente, deixando-o cair sobre a mesa de trabalho, até perfazer um total de 10 pancadas, com o intuito de preencher os espaços vazios que se possam encontrar no interior da argamassa;
4. Retirou-se o excesso de argamassa com o auxílio de uma régua rasando a superfície;
5. Limpou-se o recipiente por fora com um pano, para que não fiquem detritos e sujidades no mesmo, que posteriormente foi pesado;
6. Retirou-se o valor da pesagem e registou-se para mais tarde se realizarem os cálculos necessários à determinação dos valores pretendidos.

### **Determinação dos resultados**

O valor da massa volúmica foi determinado com base na equação 3.2

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (\text{eq. 3.2})$$

Em que,

$\rho_m$  – Massa volúmica da argamassa (kg/m<sup>3</sup>)

$m_1$  – Massa do recipiente vazio (kg)

$m_2$  – Massa do recipiente cheio com argamassa (kg)

$V$  – Volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

### **3.5. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO**

No estado endurecido realizaram-se o ensaio de resistência mecânica e os ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem, avaliando a quantidade de água absorvida, bem como o tempo que as argamassas levaram a perder essa mesma água. Realizaram-se também os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e de resistividade eléctrica, pois tratam-se de ensaios não destrutivos que permitiram avaliar a estrutura porosa da argamassa. O ensaio de variação dimensional avaliou as deformações que a argamassa apresenta ao longo do tempo, nomeadamente a retracção ou expansão. O ensaio de tensão de aderência por tracção permitiu avaliar a aderência que a argamassa tinha ao suporte onde estava inserida.

#### **3.5.1 Resistências Mecânicas**

O ensaio de resistência à flexão e compressão foi realizado na CIARGA, recorrendo à norma EN 1015-11 [29], segundo a qual se adoptou o procedimento.

Na realização deste ensaio foram preparados moldes com 3 amostras prismáticas para cada argamassa com composição diferente, sendo que estas serviram para o ensaio da resistência à flexão e posteriormente para o ensaio de compressão.

Este ensaio teve como objectivo determinar a resistência que a amostra de argamassa suporta e a capacidade que a mesma tem quando sujeita a esforços mecânicos.

Estes ensaios foram realizados aos 28, 56 e 91 dias de idade como referido na Tabela 3.2.

### **Materiais utilizados**

Para a preparação e realização deste ensaio foram necessários diferentes materiais (Figura 3.6 – a), tais como:

- Equipamento de ensaio de resistência mecânica – HOYTOM;
- Computador.

### **Procedimento**

O ensaio de resistência à flexão foi realizado de acordo com os seguintes passos:

1. Fez-se uma limpeza prévia das sujidades que estavam nas amostras;
2. Colocou-se a amostra no equipamento de ensaio que a testou e aplicou uma força (Figura 3.6 – b e c), até que se deu a rotura da mesma (Figura 3.6 – d);
3. Registou-se o valor da carga aplicada, depois da rotura da amostra, para posteriormente se efectuarem os cálculos (equação 3.3) e adquirirem os valores da resistência à flexão (subcapítulo 4.3.1).

O ensaio da resistência à compressão foi realizado com as meias amostras resultantes do ensaio da compressão (Figura 3.6 – e e f), e os passos para a realização do presente ensaio foram:

1. Colocaram-se as meias amostras centradas na base do equipamento;
2. Aplicou-se uma força no meio da amostra, até que esta sofresse rotura;
3. Registou-se a força aplicada necessária à rotura da amostra, para posteriores cálculos a efectuar (equação 3.4).

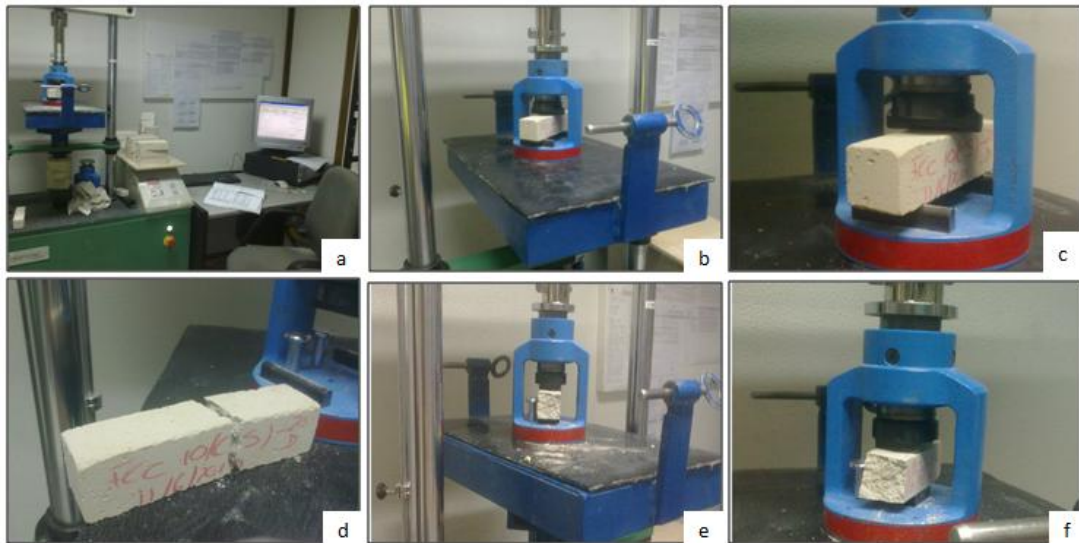


Figura 3.6 – Ensaio da resistência mecânica. a – Equipamento necessário para a realização do ensaio; b e c – rotura por flexão; d – provete partido por rotura por flexão; e e f – rotura por compressão.

### Determinação dos resultados

Recorrendo às equações 3.3 e 3.4 determinaram-se os valores das resistências à flexão e compressão, respectivamente:

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b^3} \text{ [MPa]} \quad (\text{eq. 3.3})$$

Em que,

$R_f$  – Resistência à flexão (MPa)

$F_f$  – Força aplicada no centro do prisma (N)

$l$  – Distância entre apoios (mm), no caso do equipamento utilizado é 100 mm

$b$  – Lado da base quadrada do prisma (mm) – 40 mm

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]} \quad (\text{eq. 3.4})$$

Em que,

$R_c$  – Resistência à compressão (MPa)

$F_c$  – Força de rotura à compressão (N)

A – Área de aplicação da carga (mm), no caso do equipamento utilizado – 40mmx40mm.

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

O ensaio de absorção de água por capilaridade teve como objectivo determinar e analisar a capacidade que as argamassas com diferentes quantidades de resíduo de FCC incorporado tinham para absorver água, quando pesadas nos mesmos instantes.

O ensaio de absorção de água por capilaridade decorreu no Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, recorrendo à norma EN 1015-18 [30], segundo a qual de adoptou o procedimento.

Este ensaio realizou-se aos 28 e 91 dias, para que se pudesse averiguar a diferença de absorção de água nas diferentes argamassas em idades distintas.

#### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários à realização do ensaio de absorção de água por capilaridade foram:

- Balança de precisão  $\pm 0,1g$ ;
- Câmara de secagem;
- Tabuleiros;
- Máquina de corte;
- Pincel e verniz.

#### **Procedimento**

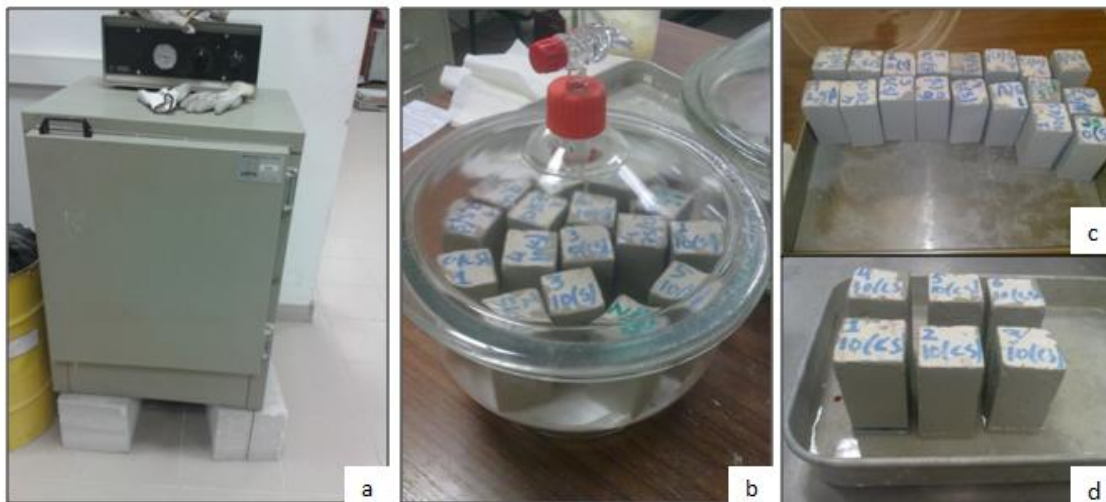
O procedimento utilizado para o ensaio mencionado foi:

1. Começou-se por cortar as amostras ao meio;
2. Submeteram-se as amostras a uma secagem prévia, para que as mesmas se encontrassem totalmente secas (massa constante) antes do início do ensaio (Figura 3.7 – a), isto é, a diferença de massas entre duas pesagens consecutivas no intervalo de  $24h \pm 2h$ , deve ser inferior a 0,2% da massa inicial;
3. Retiraram-se as amostras da câmara e colocaram-se em exsiccadores com o intuito de arrefecerem sem que adquirissem humidade, mantendo-as secas;
4. Envernizaram-se as meias amostras antes do ensaio, para que todos os poros ficassem tapados e apenas a base ficasse em contacto com a água, para que a área que absorveu a água fosse sempre a mesma;
5. Colocaram-se as amostras envernizadas a secar em exsiccadores, para que ficassem secas sem apanhar a humidade do meio ambiente a que ficariam sujeitas (Figura 3.7 – b).
6. No dia em que se realizou o ensaio, as amostras estavam secas, prontas a serem pesadas, pesagem inicial (Figura 3.7 – c);
7. Procedeu-se à colocação das amostras num tabuleiro com água até uma altura de 10 mm, após pesagem inicial, procurando manter o mesmo nível de água durante todo o ensaio (Figura 3.7 – d);
8. Mantiveram-se as amostras com a base dentro de água e na câmara de cura, enquanto não eram pesadas, nas condições a que estiveram sujeitas durante a cura até à idade em que foram testadas (Tabela 3.2);
9. Procedeu-se a diversas pesagens verificando a evolução da absorção de água, assim o ensaio teve uma duração de 7 dias, e as pesagens foram realizadas segundo as horas indicadas na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 – Tempos em que as pesagens foram realizadas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade**

Dias de ensaio	Tempos
1º Dia	0 min, 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min e de hora em hora até perfazer 8 horas.
2º Dias	Após 24 horas da pesagem inicial, pesou-se de 2 em 2 horas até perfazer 8 horas desse mesmo dia.
Restantes dias	Após 48 horas da pesagem inicial, pesou-se uma vez por dia, até ao quarto dia e depois pesou-se no último dia de ensaio.

**NOTA:** O presente ensaio foi realizado com água da rede pública, em vez de água destilada como indica a norma EN 1015-18.



**Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. a - câmara de secagem; b - secagem do verniz das amostras no exsiccador; c - amostras depois de secas e envernizadas; d – base das amostras colocadas na água para realização do ensaio.**

### **Determinação dos resultados**

O valor da quantidade de água absorvida foi determinado com base na equação 3.5

$$M = \frac{M_i - M_0}{A} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.5})$$

Em que,

$M$  – Quantidade de água absorvida ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$M_i$  – Massa da amostra no instante de tempo  $i$  (kg)

$M_0$  – Massa da amostra no instante inicial, secos e envernizados (kg)

$A$  – Área da base da amostra que está em contacto com a água ( $0,04\text{m} \times 0,04\text{m}$ ).

É de salientar que, os resultados do coeficiente de capilaridade, apresentados no subcapítulo 4.3.2, foram determinados a partir do declive das rectas que se ajustam às curvas de representação da massa de água absorvida por capilaridade em função do tempo.

A opção da apresentação dos resultados da forma como se encontram no subcapítulo 4.3.2, deve-se ao facto dos valores de coeficiente de capilaridade traçados através da recta de ajuste incluírem mais pontos (tempos de pesagens), existindo maior rigor e uma melhor percepção da evolução da absorção de água por parte de cada composição de argamassa.

### **3.5.3 Ensaio de Secagem**

O ensaio de secagem foi realizado de acordo com o procedimento abaixo indicado, sendo este idêntico ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

No ensaio de secagem o objectivo foi perceber o tempo que as amostras de argamassa utilizadas no ensaio de absorção de água por capilaridade, levaram a secar e a quantidade de água perdida, num período de 7 dias de ensaio.

Este ensaio, tal como o de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 e 91 dias, sendo as amostras do ensaio de absorção de água por capilaridade reutilizados neste ensaio.

### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários à realização deste ensaio foram:

- Balança de precisão  $\pm 0,1g$ ;
- Tabuleiro;
- Amostras utilizadas no ensaio de absorção de água por capilaridade.

### **Procedimento**

O procedimento do ensaio de secagem foi realizado de acordo com os seguintes passos:

1. O primeiro dia de pesagens do ensaio de secagem foi o último dia de pesagens do ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo que as amostras foram reutilizadas de um ensaio para o outro. Desta forma  $T_{7\text{dias (capilaridade)}} = T_{0\text{ (secagem)}}$ ;
2. Colocaram as amostras, depois da primeira pesagem, em tabuleiros nas mesmas condições a que estiveram sujeitas durante a cura até aos 28 e 91 dias de idade, para que a sua secagem fosse progressiva e não repentina;
3. Procedeu-se a diversas pesagens verificando a secagem das amostras, assim o ensaio teve uma duração de 7 dias, e as pesagens foram realizadas segundo as horas indicadas na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8 – Tempos em que as pesagens foram realizadas durante o ensaio de secagem**

<b>Dias de ensaio</b>	<b>Tempos</b>
1º Dia	0 min, 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min e de hora em hora até perfazer 8 horas.
2º Dias	Após 24 horas da pesagem inicial, pesou-se de 2 em 2 horas até perfazer 8 horas desse mesmo dia.
Restantes dias	Após 48 horas da pesagem inicial, pesou-se uma vez por dia, até ao quarto dia e depois pesou-se no último dia de ensaio.

### **Determinação dos resultados**

O valor do teor em água, para obtenção da curva de secagem, foi determinado com base na equação 3.7

$$W_i = \frac{M_i - M_{seca}}{M_{seca}} * 100 [\%] \quad (\text{eq. 3.7})$$

Em que,

$W_i$  – Teor em água (%)

$M_i$  – Massa da amostra no instante  $t_i$  (kg)

$M_{seca}$  – Massa da amostra seca em estudo, antes do início dos ensaios (kg).

#### **3.5.4 Permeabilidade à água líquida**

O ensaio de permeabilidade à água líquida decorreu no laboratório da CIARGA, e foi realizado de acordo com o Método de Karsten, segundo o qual se adoptou o procedimento.

O ensaio da permeabilidade foi realizado com o intuito de perceber qual a permeabilidade das argamassas, isto é, a quantidade de água absorvida num determinado período de tempo.

O presente ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias de idade, para poder comparar a permeabilidade das argamassas nas duas idades.

Na realização deste ensaio, a amostra utilizada foi preparada em suporte de tijolo, com uma altura de cerca de 1 cm, como descrito no subcapítulo 3.3.3.

### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários à realização do ensaio foram:

- Água;
- Tubo de Karsten;
- Plasticina;
- Cronómetro.

### **Procedimento**

O ensaio de permeabilidade à água líquida mostrou a capacidade das argamassas terem maior ou menor capacidade de absorver água, definindo assim a permeabilidade das mesmas.

Na realização do ensaio de permeabilidade à água líquida o procedimento indicado foi o seguinte:

1. Colocou-se a argamassa em estudo no suporte de tijolo, para analisar aos 28 e 91 dias;
2. Procurou-se fixar bem o tubo de Karsten à argamassa com o auxílio de plasticina, para que o mesmo não se soltasse facilmente nem permitisse que a água circulasse por debaixo do mesmo (Figura 3.8);
3. Segurou-se o tubo de Karsten sobre a argamassa e encheu-se com água até ao número 0 (onde indica 0 ml). Ao segurar o tubo, tentou-se impedir a passagem de água por debaixo do mesmo, evitando perdas de água;
4. Simultaneamente ao ponto 3, activou-se o cronómetro durante 1 minuto, verificando a quantidade de água que descia pelo tubo de Karsten;
5. A altura em que a água se encontra no tubo de Karsten corresponde ao valor expresso em ml, correspondente à quantidade de água que a argamassa absorveu;

6. Realizaram-se 5 medições para cada composição de argamassa, por forma a fazer uma média dos valores obtidos do ensaio de permeabilidade à água líquida (equação 3.8);
7. Encheu-se novamente o tubo de Karsten até ao nível de 0 ml, sempre que se fez uma nova medição



Figura 3.8 – Ensaio de permeabilidade à água líquida

### **Determinação dos resultados**

O valor da permeabilidade à água líquida foi determinado com base na equação 3.8

$$Pal = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{5} \text{ [ml]} \quad (\text{eq. 3.8})$$

Em que,

*Pal* – Permeabilidade à água líquida (ml)

$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – Medidas lidas a partir do tubo de Karsten (ml).

### **3.5.5 Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas**

O ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas decorreu no laboratório de materiais de construção do ISEL, e foi realizado recorrendo à norma brasileira NBR 15630 [31], segundo a qual se adoptou o procedimento.

O presente ensaio foi realizado com objectivo de determinar a velocidade com que a onda induzida percorreu a amostra testada em função da composição da argamassa.

Como o presente ensaio é não destrutivo, as amostras utilizadas no ensaio aos 28 dias de idade, foram as mesmas que se utilizaram aos 91 dias de idade. Na realização deste ensaio utilizaram-se 3 amostras prismáticas para cada composição de argamassa.

#### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários à realização do presente ensaio foram (Figura 3.9 – a):

- Transdutores de frequência 54 Hz;
- Barra de referência metálica;
- Aparelho de ultrassons (TICO);
- Osciloscópio (Tektronix);
- Computador;
- Tabuleiro;
- Vaselina;
- Espátula;
- Guardanapos de papel.

#### **Procedimento**

Na realização do presente ensaio foi necessário que o equipamento de ultrassons que se utilizou estivesse devidamente calibrado. A calibração do equipamento de leitura da

velocidade foi feita utilizando transdutores e uma barra metálica, desta forma seguiram-se os seguintes passos:

1. Colocou-se vaselina nos transdutores e na barra metálica fornecida pelo fabricante do equipamento para a calibração;
2. Accionaram-se impulsos de ultrassons no equipamento até que o tempo de propagação da onda pela barra fosse  $20 \pm 1 \mu\text{s}$  (como especificado pelo fabricante do equipamento) (Figura 3.9 – b);

De seguida procedeu-se ao ensaio com as amostras de argamassas anteriormente preparadas:

3. Colocou-se vaselina nas extremidades (topos) das amostras a ensaiar (Figura 3.9 – c) que posteriormente estiveram directamente em contacto com os transdutores, para que houvesse uma boa aderência entre estes, possibilitando a propagação da onda ultrassónica pela amostra;
4. Accionou-se o equipamento de ultrassons e este emitiu um impulso eléctrico, produzindo a onda que passou pela amostra, iniciando e terminando este percurso nos transdutores - emissor e receptor, respectivamente;
5. Registaram-se valores obtidos no aparelho de leitura referentes ao tempo que a onda levou a percorrer a amostra que foi testada, necessários aos cálculos que se realizaram para determinação da velocidade de propagação de onda (equação 3.9).

**NOTA:** O equipamento estava ligado a um osciloscópio (Figura 3.9 – a) por forma a obter também o sinal eléctrico associado à onda, no entanto, o tratamento desta informação sai fora do âmbito da presente dissertação

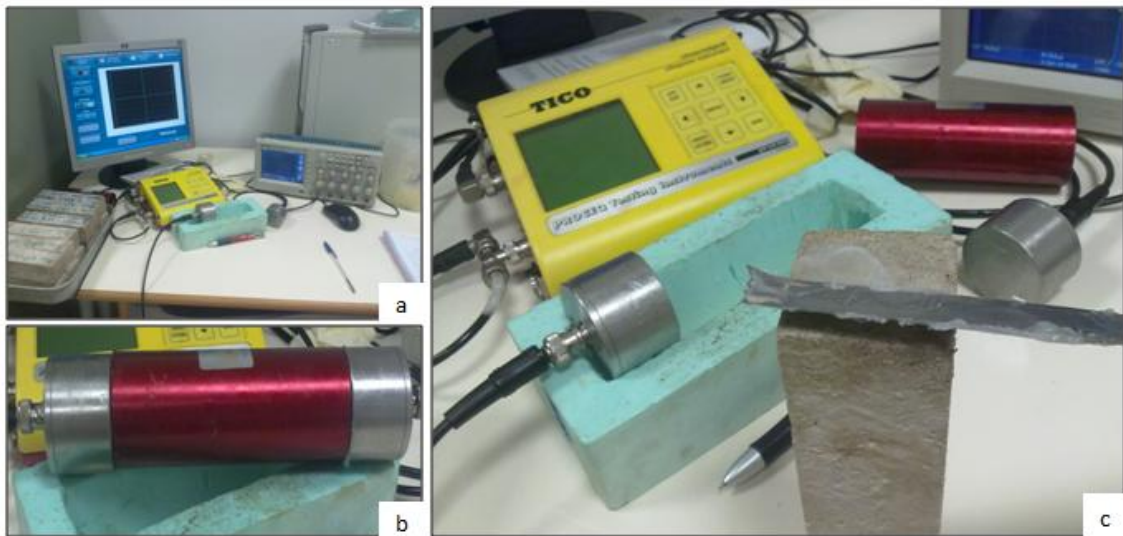


Figura 3.9 – Ensaio de Ultrassons. a – Equipamento necessário para a realização do ensaio; b – calibração do equipamento de leitura da velocidade; c – colocação de vaselina na amostra a testar.

### Determinação dos resultados

O valor da velocidade de propagação da onda ultrassónica, foi determinado com base na equação 3.9

$$V = \frac{L}{t} \text{ [m/s]} \quad (\text{eq. 3.9})$$

Em que,

$V$  – Velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s)

$L$  – Distância entre os transdutores, ou seja, o comprimento da amostra (m)

$t$  – Tempo de percurso da onda (s)

### **3.5.6 Resistividade Eléctrica**

O presente ensaio teve como objectivo determinar a condutibilidade do material em estudo, possibilitando simultaneamente perceber a estrutura porosa da argamassa.

O ensaio da resistividade eléctrica decorreu no laboratório de materiais de construção do ISEL, e foi realizado de acordo com as recomendações da DURAR [32] que se aplicam a betões, segundo a qual se adoptou o procedimento para as argamassas.

Dado que se tratou de um ensaio não destrutivo, as 3 amostras de argamassa utilizados aos 28 dias são as mesmas que se utilizaram aos 91 dias de idade. Ainda assim, estas mesmas amostras foram utilizadas posteriormente no ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (subcapítulo 3.5.5).

### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários (Figura 3.10 – a) à realização do presente ensaio foram:

- Multímetro;
- Fonte de alimentação;
- Esponjas.

### **Procedimento**

O ensaio de resistividade foi realizado utilizando as amostras sujeitas à cura indicada no subcapítulo 3.3.2. O procedimento adoptado foi o seguinte:

1. Humidificou-se as zonas das chapas metálicas que estavam em contacto com as faces extremas da amostra (topos) bem como os topos das amostras;
2. Encaixou-se a amostra no suporte identificado na Figura 3.10 – b, e ligou-se à fonte de alimentação com 30 volts de tensão (Figura 3.10 – c);
3. Recorreu-se também a duas esponjas que ficaram entre as faces da amostra e as chapas metálicas, para que houvesse melhor contacto entre estas (Figura 3.10 – e).

As esponjas foram molhadas com o intuito de haver melhor condutividade eléctrica, uma vez que por vezes as amostras podem ter poros na superfície e as esponjas acabam por remediar alguma falha que possa existir, promovendo melhor condutibilidade entre materiais.



Figura 3.10 – Ensaio de resistividade. a – Equipamento necessário à realização do ensaio; b – Colocação da amostra a testar; c, d – Amostra preparada para testar sem esponja; e – Amostra preparada para testar com esponja; f – Equipamento de leitura- multímetro.

### **Determinação dos resultados**

O valor da resistividade eléctrica foi determinado com base na equação 3.10

$$\rho = \frac{A}{L} * R_e \text{ [}\Omega\text{m]} \quad (\text{eq. 3.10})$$

Em que,

$\rho$  – Resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ )

$A$  - Área das bases da amostra ( $\text{m}^2$ ) – 0,04m x 0,04m

$L$  – Comprimento da amostra (m) – 0,16 m

$R_e$  - Resistência eléctrica ( $\Omega$ )

### **3.5.7 Análise de variação dimensional**

O ensaio de variação dimensional foi realizado no laboratório de materiais de construção do ISEL, segundo o procedimento em baixo indicado.

Tratou-se de um ensaio não destrutivo, que teve como objectivo a determinação da variação dimensional das amostras em estudo.

Na realização deste ensaio utilizaram-se 2 amostras prismáticas para cada composição de argamassa, com idades de 4 dias (logo que se desmolda), 28 e 91 dias. As argamassas foram testadas aos 4 dias de idade, pois foi nessa altura que as amostras foram desmoldadas, devido às argamassas estarem demasiado frescas para serem desmoldadas antes dos 4 dias de idade (subcapítulo 3.3.2).

#### **Materiais utilizados**

Os materiais necessários à realização do presente ensaio foram:

- Moldes próprios;
- Picoletes;
- Aparelho de medição – deflectómetro analógico.

#### **Procedimento**

Na realização do presente ensaio foi necessária a preparação prévia das amostras, realizada em moldes próprios, para que depois do desmolde as amostras ficassem com os picoletes incorporados nas mesmas (Figura 3.11 – b).

O procedimento adoptado e realizado foi:

1. Desmoldaram-se as amostras e realizou-se a medição do comprimento da amostra através do deflectómetro (Figura 3.11 – a);

2. Encaixaram-se as amostras no respectivo aparelho e realizaram-se duas medições do comprimento da amostra, sendo que a mesma possui dois topos (cada um com 1 picolete), e são utilizadas 2 amostras por cada composição de argamassa (Figura 3.11 – c);
3. Colocaram-se as amostras, depois das medições, nas respectivas condições de cura (subcapítulo 3.3.2). No entanto as condições de cura das amostras do presente ensaio distinguem-se da cura das restantes amostras. Neste ensaio foram colocadas amostras nas condições de temperatura e humidade indicadas no subcapítulo 3.3.2, sendo que 2 amostras de cada composição de argamassa são colocadas dentro de água;
4. Mediram-se os comprimentos das amostras aos 28 e 91 dias de idade, por forma a analisar se as amostras retraíram ou expandiram, possibilitando avaliar a variação dimensional das mesmas.

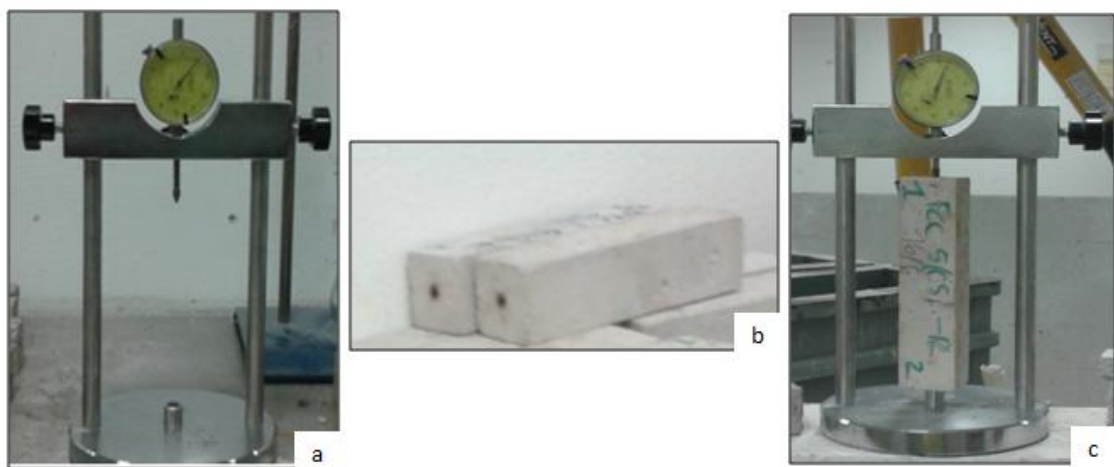


Figura 3.11 – Ensaio de análise da variação dimensional. a- Equipamento de leitura – deflectómetro analógico; b – Amostras prismáticas com picoletes para ensaiar; c – Leitura da dimensão da amostra.

### **Determinação dos resultados**

O valor da variação dimensional, foi determinado com base na equação 3.11

$$\varepsilon = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (\text{eq. 3.11})$$

Em que,

$\varepsilon$  – Valor da extensão (mm/mm)

$d_i$  – Distância inicial entre os pontos de referência (mm)

$d_f$  – Distância medida entre os pontos de referência, nas idades pretendidas (mm).

### **3.5.8 Tensão de aderência à tracção**

O “*pull-off*” é um ensaio de aderência, que foi realizado no laboratório da CIARGA, e recorreu-se à norma EN 1015-12 [33], segundo a qual se adoptou o procedimento a seguir.

Para a realização deste ensaio, existiu uma preparação prévia dos moldes. Estes foram preparados em suporte de tijolo, onde a argamassa foi colocada sobre a superfície do mesmo (subcapítulo 3.3.3).

Este ensaio teve como objectivo determinar a força necessária exercer para proceder ao arrancamento da argamassa do tijolo onde esta se encontrava pronta a ser testada.

Para uma análise mais comparativa, este ensaio realizou-se aos 28 e 91 dias de idade de cada composição de argamassa em estudo.

#### **Materiais utilizados**

Para a preparação e realização deste ensaio foram necessários diferentes materiais (Figura 3.12 – a), tais como:

- Equipamento de ensaio de força à tracção - HOYTOM;
- Máquina de corte;
- Cola;
- Pastilhas metálicas quadradas;

- Tijolo;
- Régua;
- Molde exterior para tijolo.

### **Procedimento**

Na realização do presente ensaio, foi necessário a preparação prévia da amostra a ensaiar, através da preparação em suporte de tijolo, que se encontra descrita no subcapítulo 3.3.3.

Na realização do presente ensaio, o procedimento adoptado teve os seguintes passos:

1. Cortou-se a argamassa que estava em suporte de tijolo, recorrendo uma máquina de corte. A argamassa ficou com um total de 6 quadrados de 5cm x 5cm;
2. Colaram-se as 6 pastilhas quadradas metálicas sobre os quadrados de argamassa;
3. Colocaram-se os tijolos na máquina mecânica, no dia de ensaios, que exerceu uma força de tracção sobre a pastilha metálica que se encontrava colada à argamassa (Figura 3.12 – b), até que a peça colada à argamassa se soltou do tijolo (Figura 3.12 – c);
4. Registou-se o valor da força máxima exercida, quando a argamassa se soltou, utilizado na determinação dos cálculos (equação 3.12).



**Figura 3.12 – Ensaio de Aderência. a – Equipamento utilizado no ensaio de aderência; b – Arrancamento da pastilha quadrada metálica; c – Pastilha quadrada metálica depois de solta com argamassa.**

### **Determinação dos resultados**

O valor da tensão de aderência foi determinado com base na equação 3.12

$$F_a = \frac{F_r}{A} \text{ [MPa]} \quad (\text{eq. 3.12})$$

Em que,

$F_a$  – Tensão de aderência (MPa)

$F_r$  – Força de rotura por tracção (N)

$A$  – Área da superfície da pastilha metálica quadrada (mm<sup>2</sup>) – no caso das pastilhas utilizadas têm a medida de 50mm x 50mm.

## **4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O presente capítulo apresenta os resultados dos ensaios experimentais realizados no âmbito deste trabalho e cujos procedimentos adoptados estão descritos no capítulo 3. Estes resultados apresentam-se, essencialmente, sob a forma gráfica e de tabelas para facilitar a análise dos valores obtidos experimentalmente.

Os ensaios experimentais foram realizados para estudar o efeito da substituição parcial entre 0 e 10% (em massa) de cal hidráulica por resíduo de FCC, nas propriedades das argamassas. As argamassas foram preparadas com dois tipos de areias diferentes, uma areia mista predominantemente siliciosa (S) e outra areia calcária (CS). As argamassas preparadas com a mesma areia consideram-se uma família de argamassas. (Tabela 3.1).

As argamassas foram avaliadas e estudadas nos estados fresco e endurecido recorrendo aos ensaios referidos na Tabela 3.2.

### **4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO**

No presente subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco, cujos procedimentos se encontram descritos no subcapítulo 3.4. Os resultados dos ensaios são analisados e é verificada qual a influência da substituição parcial da cal hidráulica pelo catalisador exausto de FCC.

#### **4.2.1 Consistência por espalhamento**

Na realização deste ensaio experimental descrito na norma EN 1015-3 [27] adoptou-se o procedimento presente no subcapítulo 3.4.1.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores de espalhamento para cada uma das argamassas estudadas e, a Figura 4.1 apresenta a quantidade de água necessária para que cada argamassa adquirisse a espalhamento pretendido ( $170 \pm 5$  mm) (Tabela 3.1).

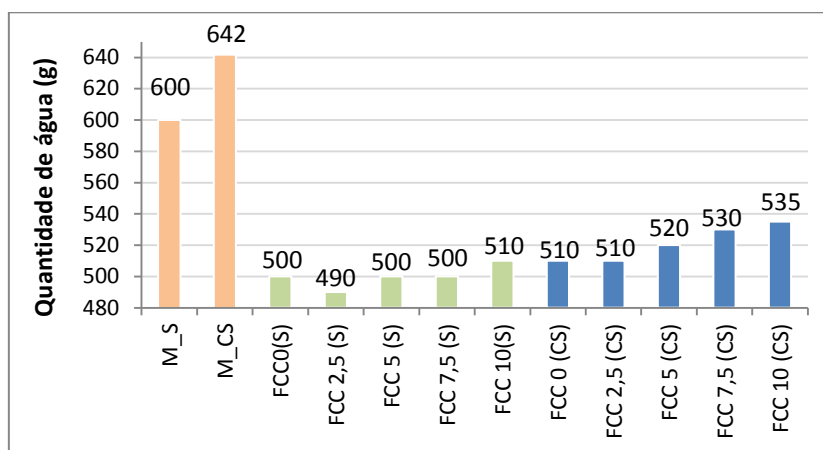
Nas Tabelas 4.1 e 4.2 verifica-se que, todos os valores de espalhamento se encontram dentro dos valores de espalhamento definidos para as 3 famílias de argamassas da presente campanha experimental (Tabela 3.1).

**Tabela 4.1 – Valores de espalhamento para as argamassas com areia siliciosa (família “S”).**

Argamassas	M_S	FCC 0 (S)	FCC 2,5 (S)	FCC 5 (S)	FCC 7,5 (S)	FCC 10 (S)
Espalhamento (mm)	171	169	167	171	166	174

**Tabela 4.2 – Valores de espalhamento para argamassas com areia calcária (família “CS”).**

Argamassas	M_CS	FCC 0 (CS)	FCC 2,5 (CS)	FCC 5 (CS)	FCC 7,5 (CS)	FCC 10 (CS)
Espalhamento (mm)	168	165	165	167	167	168



**Figura 4.1 – Quantidade de água adicionada para cada argamassa (g), sendo as famílias diferenciadas por cores.**

A Figura 4.1 está organizada evidenciando as 3 famílias de argamassas preparadas, diferenciadas por cores por forma a facilitar a comparação entre argamassas da mesma família de areias. Da esquerda para a direita apresentam-se os resultados obtidos na família das argamassas comerciais (M\_S e M\_CS), na família das argamassas com areia mista predominantemente siliciosa (S) e na família das argamassas com areia calcária (CS), respectivamente (Tabela 3.1).

Pela análise da Figura 4.1, verifica-se que as argamassas comerciais necessitam duma quantidade de água significativamente maior do que qualquer uma das outras em estudo. A necessidade de adicionar maior quantidade de água às argamassas comerciais justifica-se pelo facto destas terem na sua constituição adjuvantes (cuja análise sai fora do âmbito da presente dissertação).

Da análise da Figura 4.1 verifica-se ainda que existe uma necessidade de adicionar maior quantidade de água em função do aumento do resíduo de FCC incorporado. No entanto, esta tendência não se aplica a todas as argamassas das famílias “S” e “CS”, na medida em que nalgumas não se verifica este comportamento. Pelo facto do catalisador exausto de FCC ter uma elevada área superficial específica, prevê-se que exista perda de trabalhabilidade da argamassa e, conseqüentemente necessidade de maior quantidade de água por amassadura, pois o resíduo de FCC absorve mais água no estado fresco [1, 15, 24].

Simultaneamente, a Figura 4.1 permite verificar que a quantidade de água a adicionar em cada argamassa da família “S” é praticamente a mesma. No entanto, quando se tratam de argamassas com o mesmo teor de resíduo de FCC incorporado, verifica-se que as argamassas da família “CS”, no estado fresco, têm mais necessidade de água do que as argamassas da família “S”, para obter valores de espalhamento dentro do limite definido.

Este resultado atribui-se ao facto das areias que estão na composição da argamassa da família “S” serem diferentes das areias utilizadas na preparação das argamassas da família “CS”, diferindo estas na sua composição química e na diferença de dimensão da partícula e conseqüentemente apresentam diferenças na quantidade de água que absorvem.

#### 4.2.2 Massa Volúmica

O ensaio de massa volúmica realizou-se de acordo com o procedimento da norma EN 1015-6 [28], descrito no subcapítulo 3.4.2.

Os valores adquiridos no ensaio de massa volúmica são apresentados na Figura 4.2, diferenciados por cores dependendo da família a que as argamassas pertencem. Assim no gráfico de barras encontram-se da esquerda para a direita os resultados obtidos com a família das argamassas comerciais (M\_S e M\_CS), com a família das argamassas com areia mista predominantemente siliciosa (S) e com a família das argamassas com areia calcária (CS), respectivamente (Tabela 3.1).

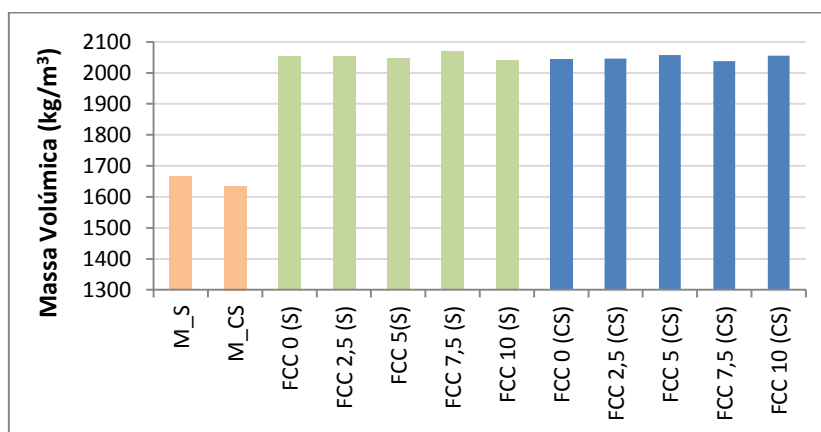


Figura 4.2 – Massa Volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ), sendo as famílias diferenciadas por cores.

Como se pode analisar na Figura 4.2, verifica-se que o aumento da incorporação de resíduo de FCC praticamente não influencia os valores da massa volúmica, constatando-se que os resultados obtidos em todas as argamassas das famílias “S” e “CS” variam entre os 2038,1-2068,2  $\text{kg/m}^3$ .

No gráfico representado na Figura 4.2 verifica-se ainda que a família das argamassas comerciais apresenta menores valores de massa volúmica relativamente às argamassas das outras famílias. Esta diferença atribui-se ao facto das argamassas comerciais conterem na sua constituição adjuvantes que alteram o seu comportamento e propriedades.

Na Figura 4.3 apresentam-se novamente os valores da massa volúmica (apresentados na Figura 4.2) e os valores da quantidade de água adicionada em cada argamassa (apresentados na Figura 4.1) para os analisar comparativamente.

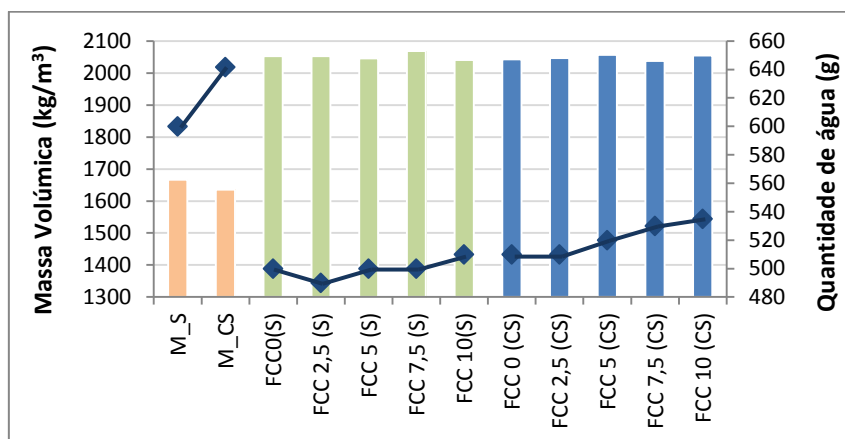


Figura 4.3 – Relação entre Massa Volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) e quantidade de água por argamassa (g).

Da análise da Figura 4.3, constata-se que as argamassas comerciais, que têm menores valores de massa volúmica, são precisamente as argamassas que exigem a adição de maior quantidade de água para obter os mesmos valores de espalhamento. As argamassas comerciais, como já foi referido, têm também na sua constituição adjuvantes com diferentes funções, que contribuiram para que os valores obtidos fossem inferiores aos valores das argamassas formuladas (“S” e “CS”). Desta forma, justifica-se a razão pela qual as argamassas comerciais necessitem de mais água do que as restantes e apresentarem, por outro lado, menor valor de massa volúmica.

### 4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

O presente subcapítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado endurecido (subcapítulo 4.1), bem como a análise crítica, dos mesmos valores, referente às argamassas em estudo (Tabela 3.1). A análise dos resultados obtidos experimentalmente é apresentada de acordo com: o efeito da incorporação do resíduo

de FCC; os resultados obtidos experimentalmente ao longo do tempo de cura e apresenta-se a análise comparativa entre as argamassas comerciais e as restantes argamassas estudadas.

#### **4.3.1 Resistência Mecânica**

Na realização do ensaio de resistência mecânica adoptou-se o procedimento da norma EN 1015-11 [29], encontrando-se o mesmo descrito no subcapítulo 3.5.1.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica são fundamentais na caracterização das argamassas no estado endurecido, uma vez que determina as propriedades mecânicas dum material, que pode ser sujeito a diferentes tensões dependendo do fim com que é aplicado. As argamassas de reabilitação devem ter resistências compatíveis com o suporte para as variações dimensionais que podem sofrer, isto é, argamassas de reboco para edifícios antigos não devem ter resistências muito elevadas por forma a evitar o desenvolvimento de tensões que coloquem em causa o sistema revestimento (reboco) com suporte [34].

Tipicamente os valores da resistência à compressão das argamassas são relacionáveis com valores obtidos noutros ensaios realizados no estado endurecido. Desta forma, ir-se-á fazer a análise crítica dos valores da resistência à compressão com os valores dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade e do ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassónica, apresentando-se a análise destas relações nos subcapítulos 4.3.2 e 4.3.5, respectivamente.

Os valores da resistência à compressão serão também utilizados na determinação do Índice de Actividade pozolânica (IA), com o intuito de avaliar a actividade pozolânica do resíduo de FCC incorporado nas argamassas em estudo, apresentando-o no presente subcapítulo (Tabela 4.3).

### **Resistência à Flexão**

O ensaio da resistência à flexão foi realizado aos 28, 56 e 91 dias de idade, de acordo o método descrito no subcapítulo 3.5.1.

A Figura 4.4 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à flexão. Da análise da Figura 4.4 verifica-se que existe uma dispersão dos resultados de resistência à flexão pelo que não é possível identificar uma tendência nestes valores em função da família a que as argamassas pertencem, nem em função das idades de cura a que as argamassas foram ensaiadas.

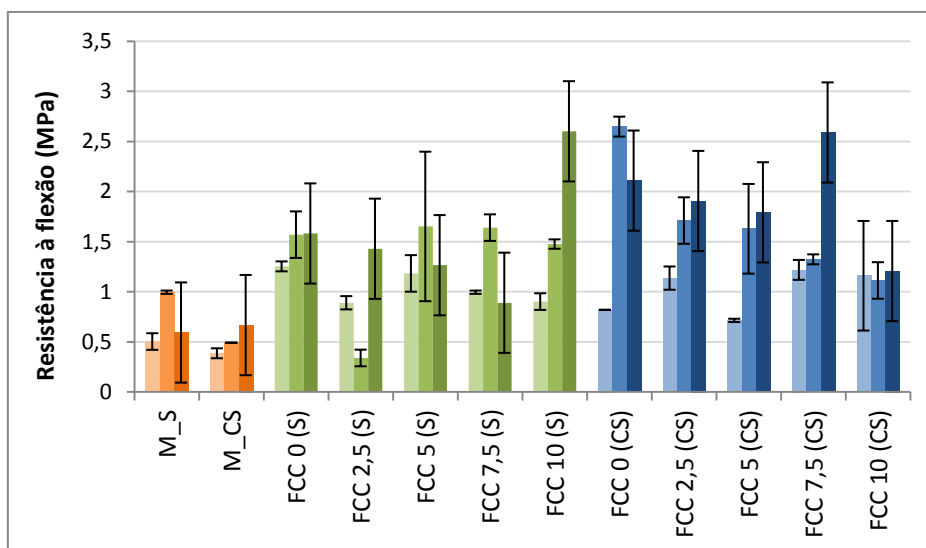


Figura 4.4 - Resistência à flexão (MPa) das argamassas aos 28, 56 e 91 dias de idade (diferenciadas por cores, da esquerda para a direita, por família das argamassas comerciais, família das argamassas compostas por areia mista predominantemente siliciosa e família das argamassas preparadas com areia calcária, respectivamente).

À dispersão de resultados obtidos e apresentados na Figura 4.4 atribui-se o facto da possível existência de heterogeneidade nas argamassas ensaiadas, contribuindo para a inexistência de tendências de valores de resistência à flexão, bem como o facto dos resultados obtidos serem reduzidos, conduz a crer que as argamassas testadas não se adequaram ao ensaio realizado.

### **Resistência à Compressão**

O ensaio da resistência à compressão foi realizado aos 28, 56 e 91 dias de idade, de acordo com o método descrito no subcapítulo 3.5.1.

Os valores da resistência à compressão apresentam-se na Figura 4.5. A análise dos resultados será realizada em função das diferentes idades da argamassa e em função da família a qua as argamassas pertencem, relacionando argamassas de famílias diferentes.

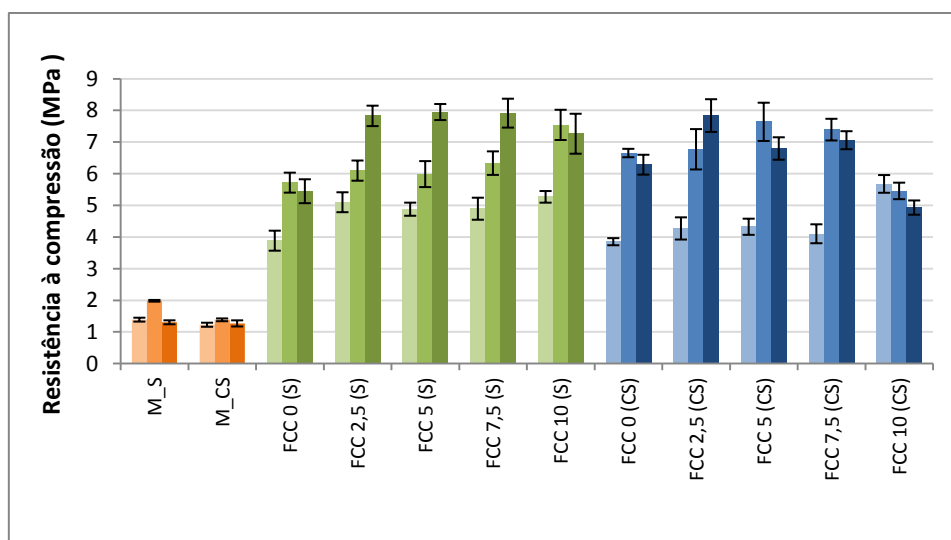


Figura 4.5 - Resistência à compressão (MPa) das argamassas aos 28, 56 e 91 dias de idade (diferenciadas por cores, da esquerda para a direita, por família das argamassas comerciais, família das argamassas compostas por areia mista predominantemente siliciosa e família das argamassas preparadas com areia calcária, respectivamente).

Da análise à Figura 4.5 verifica-se que a resistência à compressão aos 28 dias de idade varia entre 3,85 MPa e 5,68 MPa para as argamassas da família “S” e “CS”. Aos 56 e 91 dias de idade as argamassas tendencialmente aumentam os seus valores de resistência à compressão e passam a variar entre 5,46 MPa – 7,64 MPa e 4,93 MPa – 7,95 MPa, respectivamente.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

Da análise realizada à Figura 4.5 verifica-se que, dentro da família “S” aos 28 dias de idade, nas argamassas com resíduo de FCC incorporado, os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão são próximos entre si variando entre 4,88 MPa – 5,27 MPa. Nas argamassas da família “CS” os valores obtidos para os 28 dias de idade variam entre 4,10 MPa – 4,27 MPa, sendo exceção o valor obtido para a argamassa FCC 10(CS), que apresenta um aumento significativo em relação aos restantes valores da mesma família.

(ii) Análise da resistência à compressão ao longo do tempo de cura

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.5, verifica-se que à medida que o tempo decorre, o valor de resistência à compressão tem tendência a aumentar, isto é, tipicamente a resistência à compressão aos 28 dias é menor do que aos 56 dias que por sua vez é menor do que aos 91 dias.

Excepções a este comportamento, verificam-se nas argamassas:

- FCC 10(CS) na qual a resistência aos 28 dias de idade – de 5,68 MPa – e aos 91 dias de idade é de 4,93 MPa. Assim, dada dispersão associada aos valores de resistência à compressão pode considerar-se que a resistência à compressão desta argamassa estabilizou a partir dos 28 dias de idade.
- FCC 0(CS), FCC 5(CS), FCC 7,5(CS) e FCC 10(CS) na qual a resistência aos 56 dias de idade é de 6,65 MPa, 7,64 MPa, 7,39 MPa e 5,46 MPa, respectivamente e aos 91 dias é 6,29 MPa, 6,80 MPa, 7,06 MPa e 4,93 MPa, respectivamente.
- FCC 0(S) e FCC 10(S) na qual a resistência aos 56 dias de idade é de 5,72 MPa e 7,54 MPa, respectivamente, e aos 91 dias é 5,45 MPa e 7,26 MPa, respectivamente, apresentando-se assim uma diminuição da resistência dos 56 para os 91 dias;
- Nas argamassas FCC 0(S), FCC 10(S) e nas argamassas da família “CS” considera-se que, devido à diferença entre os resultados de resistência, as argamassas

aos 56 dias de idade já se encontram estabilizadas, sendo que a estabilização ocorreu entre os 28 e 56 dias de idade.

Deste modo, verifica-se que em todas as idades ensaiadas (28, 56 e 91 dias) a argamassa FCC 10(CS) tem um comportamento distinto, uma vez que não segue a tendência existente nas restantes argamassas, isto é, com o passar do tempo a resistência à compressão diminui. A este facto atribui-se a possibilidade da ocorrência de erro na preparação da argamassa ou erro experimental.

Nas argamassas comerciais, M\_S e M\_CS, verifica-se que os valores de resistência à compressão aos 28 dias – de 1,39MPa e 1,23 MPa, respectivamente – são menores que aos 56 dias de idade – 1,99 MPa e 1,38 MPa, respectivamente. No entanto a tendência dos valores de resistência à compressão aumentarem ao longo do tempo não se verifica dos 56 para os 91 dias de idade, em que os valores de resistência aos 91 dias de idade são 1,31 MPa e 1,27 MPa.

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

Na Figura 4.5, verifica-se que os valores de resistência à compressão das argamassas comerciais são muito menores que os valores obtidos nas argamassas das famílias “S” e “CS”. Verifica-se que as argamassas da família “S”, aos 28 dias de idade, têm valores de resistência à compressão cerca de 2,8 vezes (no mínimo) superior à argamassa M\_S, bem como as argamassas da família “CS” têm valores de resistência cerca de 3,1 vezes (no mínimo) maior do que a argamassa comercial M\_CS.

Segundo Veiga [35, 36], os valores de resistência à compressão para argamassas de revestimento para edifícios antigos devem estar compreendidos entre 0,4 – 2,5 MPa, verificando-se assim, que as argamassas comerciais, M\_S e M\_CS com valores à compressão de 1,39 MPa e 1.23 MPa, respectivamente, apresentam valores dentro da gama recomendada. No entanto, os valores adquiridos neste ensaio para as argamassas sem resíduo de FCC, FCC 0(S) e FCC 0(CS), não apresentam valores dentro

da gama recomendada, na qual a resistência à compressão aos 28 dias de idade toma os valores de 3,89 MPa e 3,85 MPa, respectivamente.

Neste sentido, da análise à Figura 4.5 verifica-se que as argamassas das famílias “S” e “CS” têm valores de resistência à compressão superiores aos valores recomendados por Veiga [35]. À diferença encontrada atribui-se o facto do resíduo de FCC contribuir para o aumento da resistência devido ao seu efeito pozolânico.

Ainda assim, sendo que a composição das argamassas comerciais acresce da incorporação de adjuvantes em relação às argamassas sem teor de resíduo de FCC, FCC 0(S) e FCC 0(CS), verifica-se que os adjuvantes utilizados diminuem a resistência à compressão, pois as argamassas sem resíduo de FCC apresentam valores de resistência à compressão superiores às argamassas comerciais. Desta forma, prevê-se que com a incorporação de adjuvantes, as argamassas das famílias “S” e “CS” com e sem resíduo de FCC, diminuam os seus valores de resistência à compressão.

A norma NP EN 998-1 [37] contém especificações de argamassas para alvenarias para rebocos interiores e exteriores. Esta dispõe da classificação das propriedades das argamassas endurecidas, na qual a resistência à compressão se encontra dividida por categorias consoante os valores de resistência das argamassas após 28 dias de idade. Os valores estão compreendidos entre 0,4 MPa e um valor superior a 6 MPa, consoante a categoria em causa.

Desta forma, verifica-se que as argamassas comerciais pertencem à classe “CS I”, isto é, apresentam valores entre 0,4 e 2,5 MPa. Neste sentido, é expectável que com a incorporação de adjuvantes, as argamassas da família “S” e “CS” reduzam os seus valores para a classe “CS I” (cuja análise sai fora do âmbito da presente dissertação – subcapítulo 5.2).

### **Índice de Actividade pozolânica (IA)**

O Índice de Actividade pozolânica foi determinado com o intuito de avaliar a actividade pozolânica do resíduo de FCC quando incorporado nas argamassas em estudo. Para a determinação do IA, recorreu-se à norma ASTM C311-07 [38] específica para cimento, adaptando-a para argamassas de cal, na qual o IA é à relação entre a resistência à compressão numa argamassa com 20% de substituição, aos 28 dias de hidratação e a resistência à compressão da argamassa sem incorporação de pozolana (considerada de referência) com a mesma idade.

No presente trabalho optou-se por fazer o cálculo para as diferentes quantidades de substituição bem como para diferentes idades. Desta forma, o IA determinou-se de acordo com a equação 4.1

$$\text{Índice de Actividade (IA)} = \frac{A}{B} * 100 \quad (\text{eq. 4.1})$$

Em que,

A - Valor médio da resistência à compressão da argamassa para uma determinada idade e quantidade de substituição de cal hidráulica por resíduo de FCC;

B - Valor médio da resistência a compressão da argamassa sem incorporação de resíduo de FCC (de referência) para a mesma idade de A. Neste caso, as argamassas de referência utilizadas nos cálculos do IA foram as argamassas FCC 0(S) e FCC 0(CS), pertencente a cada família de argamassas “S” e “CS”, respectivamente.

A Tabela 4.3 apresenta os valores do Índice de Actividade pozolânica para as argamassas das diferentes famílias em estudo.

Tabela 4.3 – Índice de Actividade pozolânica para as argamassas das famílias “S” e “CS”

Família	Designação	Dias		
		28	56	91
Argamassas da família "S"	Referência - FCC 0(S)	100	100	100
	FCC 2,5(S)	131,27	106,65	143,69
	FCC 5(S)	125,61	104,73	145,93
	FCC 7,5(S)	125,99	110,78	145,28
	FCC 10(S)	135,65	131,91	133,34
Argamassas da família "CS"	Referência - FCC 0(CS)	100	100	100
	FCC 2,5(S)	110,87	101,78	124,70
	FCC 5(CS)	112,25	114,82	108,14
	FCC 7,5(CS)	106,50	111,11	112,31
	FCC 10(CS)	147,38	82,01	78,45

Entende-se por actividade pozolânica a capacidade que uma pozolana tem em reagir com o hidróxido de cálcio formado no processo de extinção da cal viva. Desta forma, quanto maior for a capacidade da pozolana para reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), maior será o Índice de Actividade pozolânica (IA).

A substituição do ligante por outro material não reactivo – efeito de diluição, traduz-se tipicamente na diminuição de resistência à compressão proporcional à quantidade de substituição que ocorre [1, 14, 25]. Contudo, caso o material substituto apresente actividade pozolânica, a diminuição da resistência à compressão provocada pelo efeito de diluição é compensada e este material contribui para o aumento da propriedade referida. Assim, considera-se que um material apresenta actividade pozolânica quando as argamassas têm um valor de IA superior à percentagem de cal hidráulica presente na argamassa.

A principal razão para calcular o IA é determinar em que argamassas o resíduo de FCC apresenta actividade pozolânica. Tipicamente, para as mesmas quantidades de resíduo de FCC incorporado, as argamassas da família “S” têm valores de IA superiores aos valores obtidos nas argamassas da família “CS”.

Da análise à Tabela 4.3 verifica-se que nas diferentes idades de hidratação apresentadas com diferentes percentagens de substituição, o Índice de Actividade pozolânica é superior ao expectável pelo efeito de diluição, superando-o, tendo estas valores superiores à percentagem de cal presente na argamassa.

Na Tabela 4.3 observa-se a vermelho os valores da argamassa FCC 10(CS), cujo IA aos 28 dias de idade é elevado em comparação com os restantes valores de IA para as argamassas da família “CS”, e cujos valores para os 56 e 91 dias de idade mostram que os valores de IA são inferiores à percentagem de ligante presente na argamassa. A argamassa FCC 10(CS), tal como verificado na resistência à compressão, apresenta valores díspares dos restantes, justificado por possível ocorrência de erro na preparação da argamassa ou no decorrer do ensaio experimental.

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

Na realização do ensaio de absorção de água por capilaridade adoptou-se o procedimento da norma EN 1015-18 [30] descrito no subcapítulo 3.5.2.

Com o intuito de se perceber a evolução da quantidade de água absorvida por cada argamassa realizaram-se pesagens às amostras de argamassas em diferentes idades (subcapítulo 3.5.2).

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a evolução da absorção de água por capilaridade de cada uma das argamassas com 28 dias de idade, durante os 7 dias de ensaio.

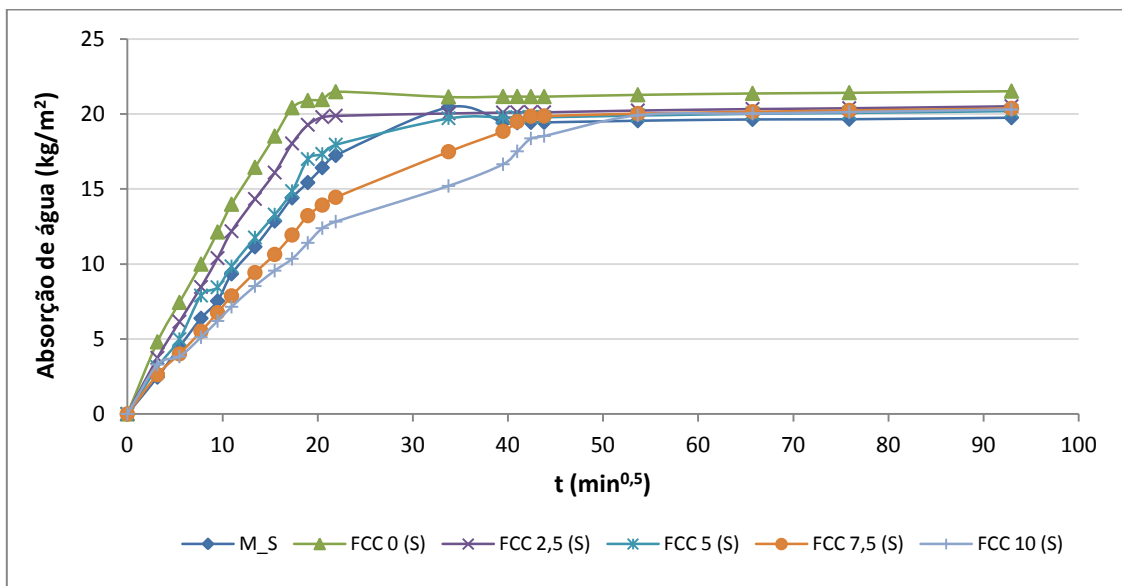


Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>) das argamassas da família “S”, aos 28 dias de idade.

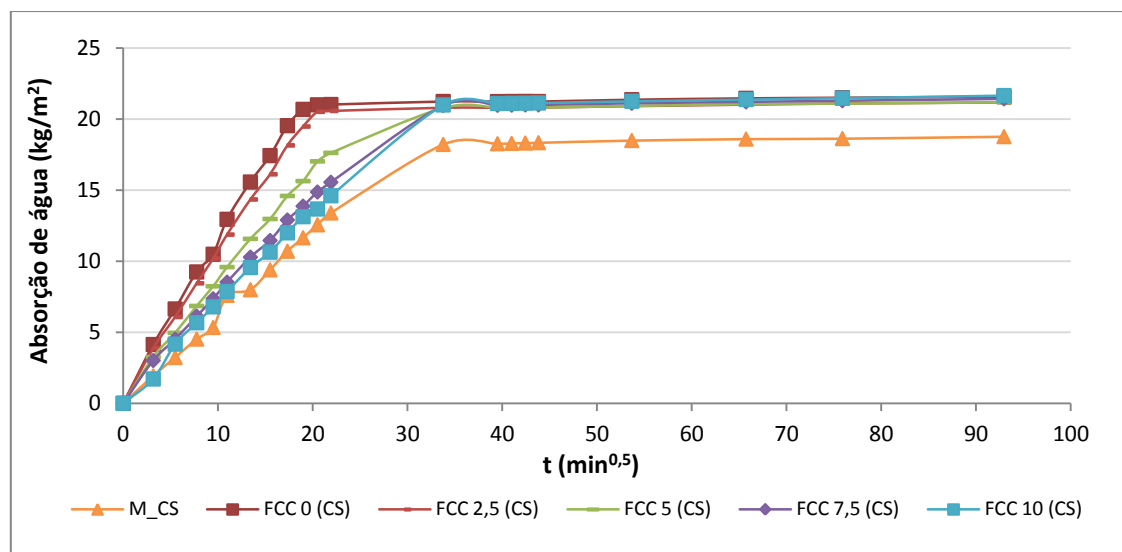


Figura 4.7 - Absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>) das argamassas da família “CS”, aos 28 dias de idade.

Da análise das Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se que as argamassas absorvem água rapidamente no início do ensaio até às 32 horas de duração do ensaio ( $t = 43,82 \text{ min}^{0,5}$ ). A partir desse momento verifica-se que a absorção de água nas argamassas termina, verificando-se assim a massa constante através do patamar representado pelas curvas de absorção de água das Figuras 4.6 e 4.7.

Exceções a este comportamento, verificam-se nas argamassas FCC 7,5(CS) e FCC 10(CS) nas quais a absorção de água termina às 48 horas de ensaio ( $t = 53,67 \text{ min}^{0,5}$ ).

Da análise às Figuras 4.6 e 4.7 verifica-se quer nas argamassas da família “S” quer nas argamassas da família “CS” que a quantidade de resíduo de FCC incorporado influencia a velocidade de absorção água, sendo que quanto menor o resíduo de FCC incorporado, maior a velocidade de absorção. No entanto, na absorção total parece não se sentir o efeito do resíduo de FCC, uma vez que as diferenças relativas para as argamassas das famílias “S” e “CS” são no limite até 6,5% e 2,3%, respectivamente.

Nas argamassas das famílias “S” e “CS” com 0 e 2,5% de resíduo incorporado, verifica-se que são mais rápidas a absorver água, e conseqüentemente atingem massa constante mais cedo, sendo que o início do patamar no qual as argamassas apresentam massa constante é a partir das 8 horas de ensaio ( $t = 21,91 \text{ min}^{0,5}$ ).

Das Figuras 4.6 e 4.7 verifica-se que, aos 28 dias de idade, as curvas têm o mesmo comportamento que as curvas dos gráficos apresentados noutro estudo acerca de cal hidráulica com incorporação de uma pozolana (metacaulino) [39]. No entanto, as argamassas da presente campanha experimental levam mais tempo a atingir o seu limite de absorção de água, verificando-se que ficam com massa constante mais tarde. Simultaneamente, verifica-se que a quantidade de água absorvida, para uma argamassa com 10% de incorporação parcial de um aditivo com características pozolânicas, é idêntica.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a evolução da absorção de água por capilaridade de cada uma das argamassas com 91 dias de idade, durante os 7 dias de ensaio.

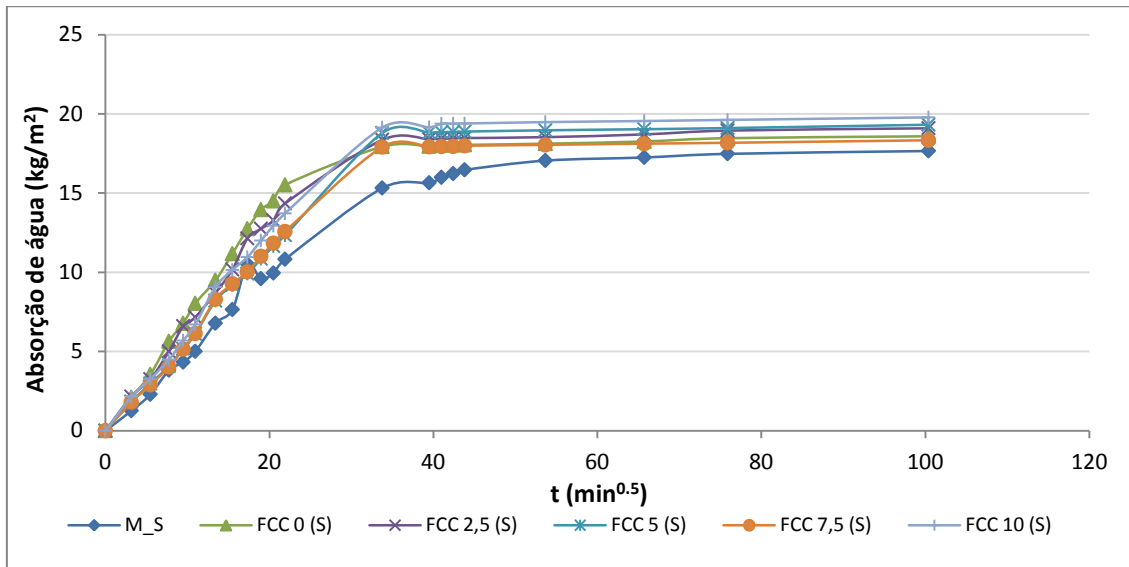


Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>) das argamassas da família "S", aos 91 dias de idade.

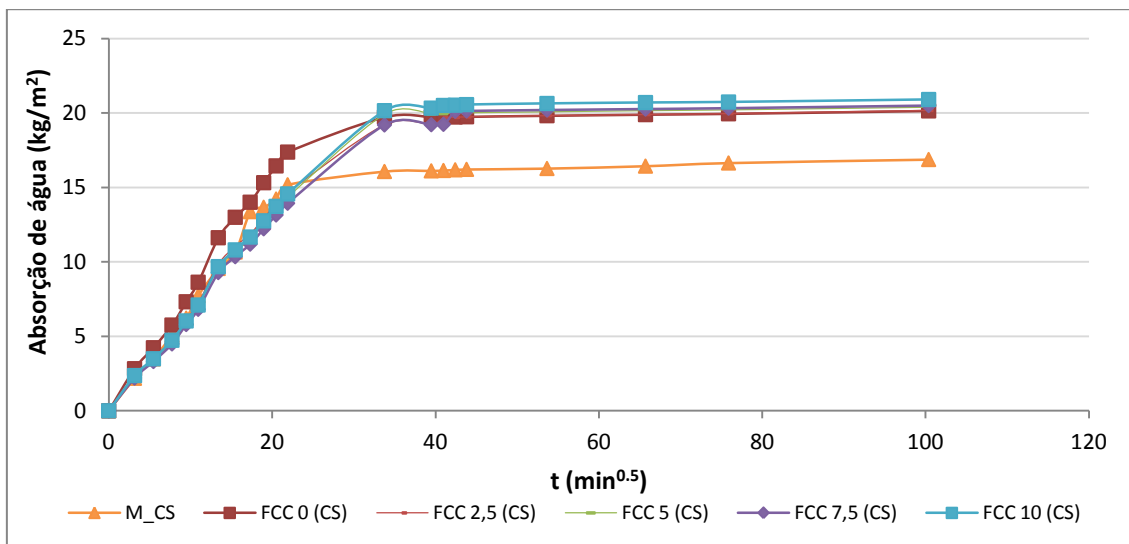


Figura 4.9 - Absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>) das argamassas da família "CS", aos 91 dias de idade.

Da análise das Figuras 4.8 e 4.9, verifica-se que as argamassas absorvem água rapidamente no início do ensaio até às 32 horas de duração do ensaio ( $t = 43,82 \text{ min}^{0,5}$ ). A partir desse momento verifica-se que a absorção de água nas argamassas termina, verificando-se assim massa constante através do patamar representado pelas curvas de absorção de água das Figuras 4.8 e 4.9.

Ainda assim, verifica-se que as argamassas das famílias “S” e “CS” aos 91 dias de idade absorvem menor quantidade de água, têm uma absorção mais lenta, ficando por isso com massa constante mais tarde quando comparadas com as mesmas argamassas aos 28 dias de idade, sendo os valores máximos de água absorvida pelas argamassas de 20,91 kg/m<sup>2</sup> e 21,65 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente.

No que diz respeito à quantidade total de água absorvida, também aos 91 dias de idade, o efeito da incorporação do resíduo de FCC, parece não se fazer sentir, na medida em que as diferenças relativas de absorção total para as argamassas das famílias “S” e “CS” são no limite de 7,9% e 3,8%, respectivamente.

Ainda assim, verifica-se que as argamassas das famílias “S” e “CS” levam mais tempo a ficarem com massa constante, quando comparadas com outro estudo de cal hidráulica [40], em que o início do patamar representante da massa constante inicia antes de se atingirem as duas horas ( $t = 10,95 \text{ min}^{0,5}$ ) do primeiro dia de ensaio.

Em suma, da análise das Figuras 4.6 à 4.9, verifica-se que o efeito da incorporação do resíduo de FCC em substituição da cal hidráulica provoca a densificação da matriz das argamassas, levando à formação de novos compostos químicos que diminuem os espaços vazios da matriz. Desta forma, à medida que se aumenta a quantidade incorporada de catalisador exausto de FCC nas argamassas, menor é a velocidade de absorção de água.

Simultaneamente constata-se que as diferenças de absorção total de água das argamassas são menores nas argamassas preparadas com areia calcária do que nas argamassas preparadas com areia predominantemente siliciosa.

Nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam-se as rectas de ajuste do período de tempo do ensaio da absorção de água por capilaridade das argamassas, em função do tempo. Os declives destas rectas correspondem aos coeficientes de capilaridade, que

traduzem a velocidade com que a absorção de água se desenvolve nos instantes iniciais (Figura 4.14).

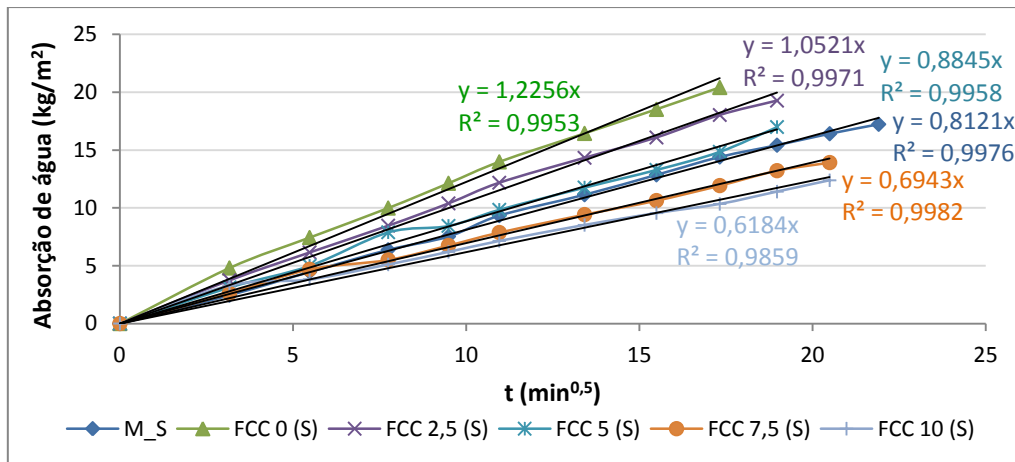


Figura 4.10 – Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia mista predominantemente siliciosa aos 28 dias de idade.

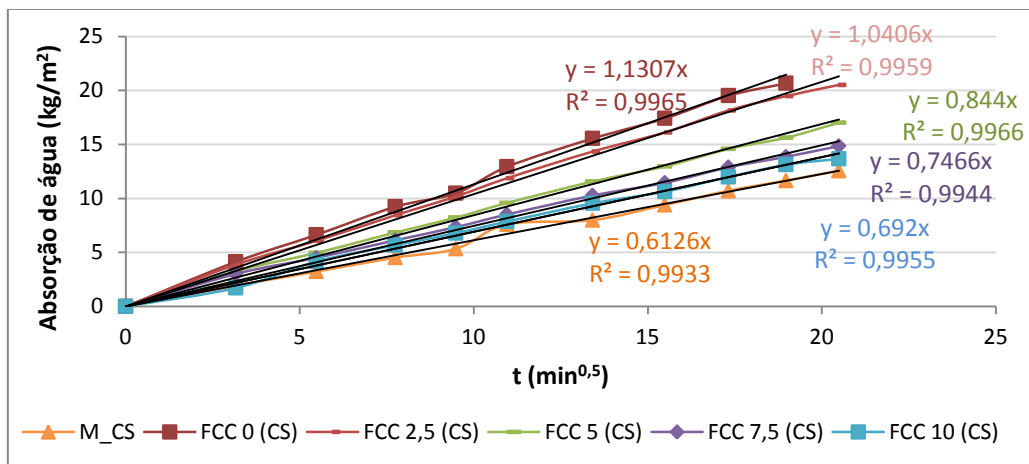


Figura 4.11 – Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia calcária aos 28 dias de idade.

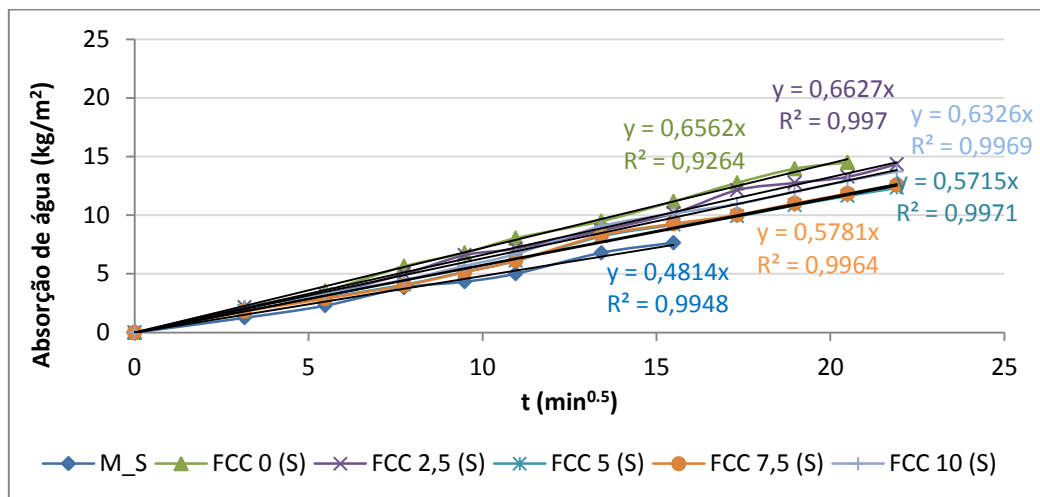


Figura 4.12 - Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia mista predominantemente siliciosa aos 91 dias de idade.

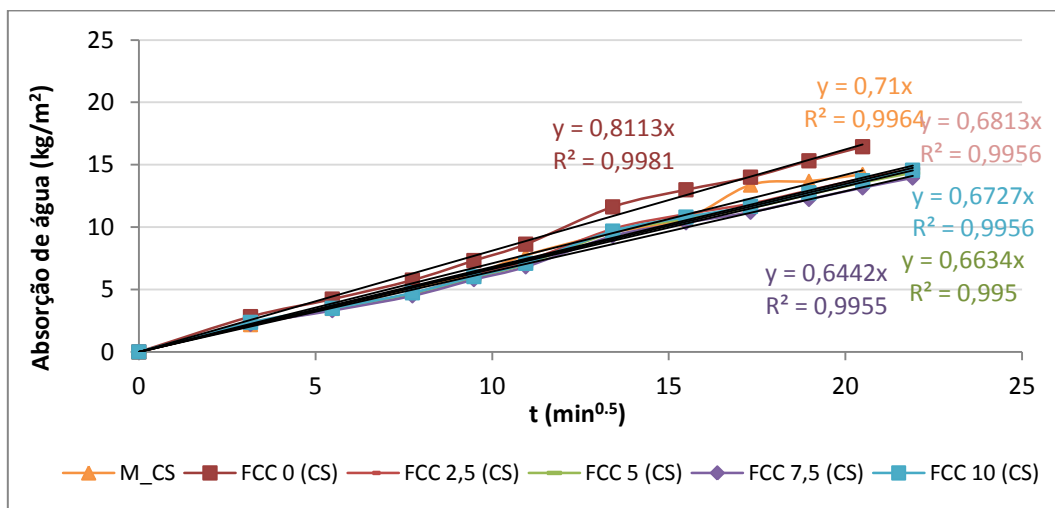


Figura 4.13 - Recta de ajuste da absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), na família de argamassas preparadas com areia calcária aos 91 dias de idade.

A Figura 4.14 apresenta os resultados dos coeficientes de capilaridade (C.C.) das argamassas em estudo, aos 28 e 91 dias de idade, para as argamassas com diferentes quantidades de substituição parcial de ligante.

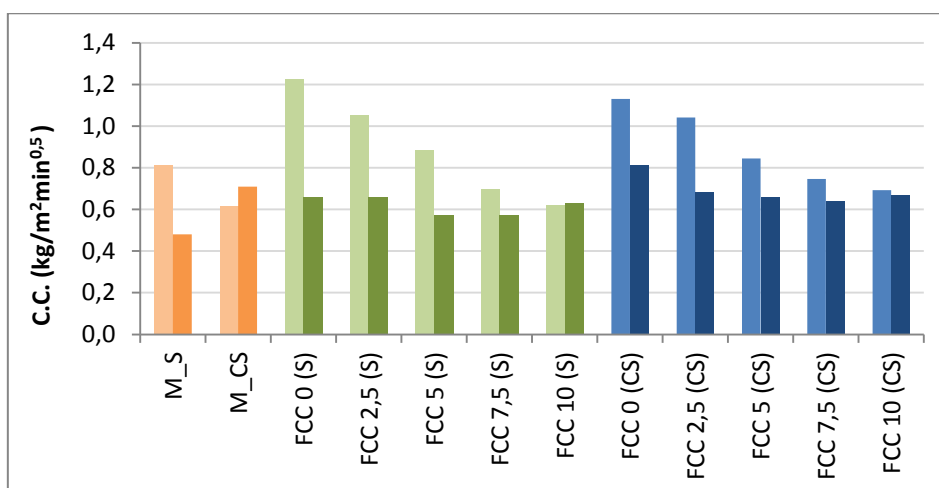


Figura 4.14 – Coeficiente de Capilaridade (C.C.) (kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>) das argamassas, aos 28 e 91 dias de idade.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

Da análise da Figura 4.14, verifica-se que aos 28 dias de idade, o aumento da substituição parcial de cal hidráulica pelo resíduo de FCC, conduz à diminuição progressiva do coeficiente de absorção capilar nas argamassas quer da família “S” quer da família “CS”.

A Figura 4.14 mostra que aos 91 dias de idade, o efeito da incorporação do resíduo de FCC é pouco relevante na medida em que, independentemente da quantidade de resíduo de FCC incorporado nas argamassas das famílias “S” e “CS” os valores de coeficiente de capilaridade obtidos são praticamente os mesmos. No entanto, na argamassa FCC 0(CS), sem FCC incorporado, verifica-se um aumento do coeficiente de absorção capilar.

(ii) Análise do coeficiente de absorção capilar ao longo do tempo de cura

A Figura 4.14 mostra que aos 28 dias de idade, as argamassas da família “S” e “CS” têm uma clara tendência a diminuir os valores de coeficiente de absorção capilar, com o aumento da incorporação do resíduo de FCC.

Aos 91 dias de idade verifica-se que, tipicamente as argamassas da família “S” e da família “CS” têm valores de coeficiente de capilaridade idênticos variando entre 0,57 e 0,68 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>. Apresentando-se como exceção, a argamassa FCC 0(CS) apresenta um coeficiente de absorção capilar de 0,81 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>. Atribui-se ao facto de com o aumento do tempo de hidratação ocorrer uma densificação da matriz da argamassa, devido às reacções químicas existentes formarem novos compostos químicos que diminuem os espaços vazios da matriz das argamassas.

No que concerne às argamassas das famílias “S” e “CS”, prevê-se que a sua aplicação seja interessante, na medida em que, a diminuição do coeficiente de capilaridade indica uma menor absorção de água por parte das mesmas.

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

O gráfico da Figura 4.14 mostra que a maioria das argamassas aos 91 dias de idade tem menor coeficiente de capilaridade do que aos 28 dias de idade, à exceção da M\_CS.

Em comparação, a família das argamassas comerciais e as argamassas das famílias “S” e “CS”, aos 91 dias de idade, têm valores de coeficiente de capilaridade próximos, sendo que os valores do C.C. das argamassas comerciais variam entre 0,48 e 0,71 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup> e as restantes argamassas das famílias “S” e “CS” variam entre 0,57 e 0,68 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>.

No entanto, aos 28 dias de idade, a argamassa da família “S” que apresenta o valor de C.C. mais próximo da argamassa comercial M\_S (C.C.= 0,81 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>) é a FCC 5(S) de valor 0,88 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup> e a argamassa da família “CS” que apresenta um valor de C.C. próximo da argamassa comercial M\_CS (C.C.= 0,61 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>) é a FCC 10(CS) de valor 0,69 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup> com menor quantidade de resíduo de FCC tinham coeficientes de capilaridade superiores às argamassas comerciais.

A Figura 4.14 mostra ainda que, aos 28 dias de idade, a argamassa comercial que contém predominantemente areia siliciosa tem maior coeficiente de capilaridade do que a argamassa comercial de areia calcária. Paralelamente, verifica-se que nas argamassas das outras famílias, para as mesmas quantidades de incorporação de resíduo de FCC, as argamassas da família “S” apresentam valores de coeficiente de capilaridade maiores do que as argamassas da família “CS”.

Excepções a este comportamento verificam-se nas argamassas FCC 7,5(CS) e FCC 10(CS) com coeficiente de capilaridade de  $0,75 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$  e  $0,69 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ , respectivamente, apresentando-se com valores superiores às argamassas FCC 7,5(S) e FCC 10(CS) com C.C. de  $0,69 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$  e  $0,62\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ , respectivamente.

Os valores recomendados por Veiga para os coeficientes de capilaridade de argamassas de substituição estão compreendidos entre  $8 - 12 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$  ( $1 - 1,5 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ ) [8, 41].

Relativamente aos valores obtidos experimentalmente e apresentados na Figura 4.14, verifica-se que apenas as argamassas das famílias “S” e “CS” sem resíduo de FCC (FCC 0(S) e FCC 0 (CS)) e as que têm a menor quantidade de resíduo de FCC (FCC 2,5(S) e FCC 2,5(CS)) estão dentro da gama recomendada.

Relativamente às restantes argamassas, estas têm valores de C.C. menores, sendo por isso, argamassas igualmente interessantes para possível aplicação na medida em que se identifica menor capacidade de absorção de água por parte das argamassas em estudo.

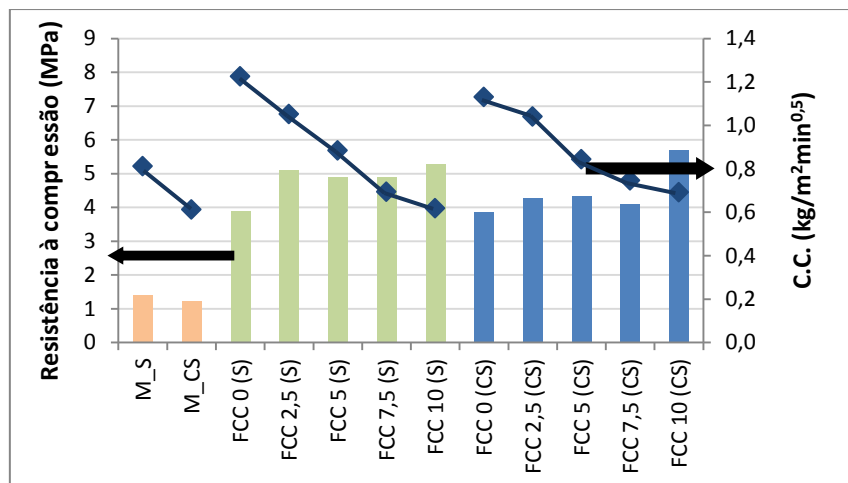
No que diz respeito às argamassas comerciais, constata-se que os valores de coeficiente de capilaridade não se encontram dentro da gama recomendada, contudo, tipicamente os valores recomendados por Veiga [8, 41] são para reabilitações de edifícios antigos e as argamassas comerciais do presente estudo são para reabilitação de edifícios antigos e actuais.

### **Relação entre Coeficiente de Capilaridade e Resistência à Compressão aos 28 e 91 dias de idade**

Os valores obtidos no ensaio de resistência mecânica e no ensaio de absorção de água por capilaridade serão relacionados devido à relação existente entre o comportamento das argamassas nos dois ensaios.

Tipicamente quanto maior é a resistência mecânica numa argamassa, mais densa é a matriz dos ligantes. Desta forma, prevê-se que uma argamassa densa, tenha menor quantidade de espaços vazios impedindo uma maior absorção e retenção de água, conduzindo a um menor coeficiente de capilaridade.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 apresentam-se novamente os valores da resistência à compressão (apresentados na Figura 4.5) e os valores do coeficiente de capilaridade (apresentados na Figura 4.14) aos 28 e 91 dias de idade, respectivamente, para uma análise comparativa.



**Figura 4.15 – Relação entre Coeficiente de Capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>) e Resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 28 dias de idade.**

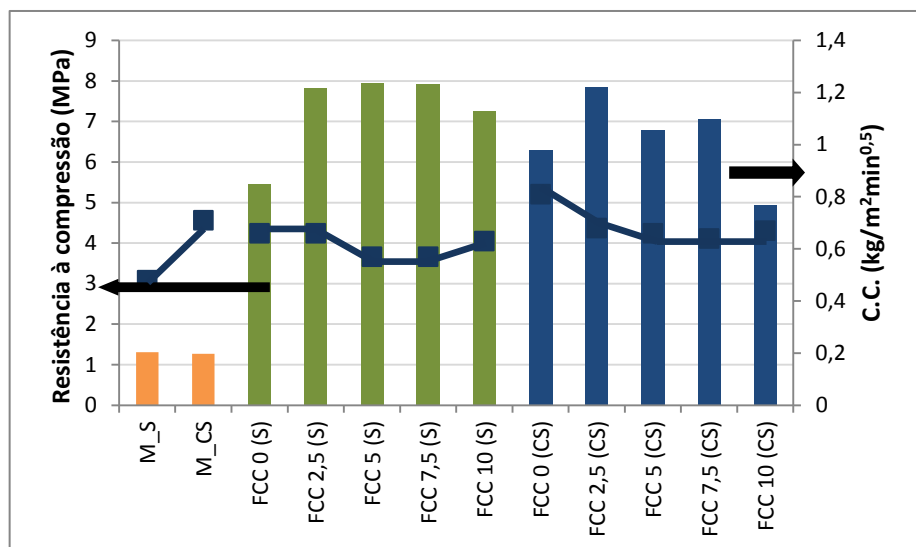


Figura 4.16 – Relação entre Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ ) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 91 dias de idade.

Da análise ao gráfico da Figura 4.15 verifica-se uma clara tendência de diminuição do C.C. em função do aumento de incorporação do resíduo de FCC. No entanto, os valores de resistência à compressão não revelam nenhuma tendência, independentemente da percentagem de resíduo de FCC incorporado.

Tipicamente, quanto maior é a resistência mecânica duma argamassa, menor é o seu valor do coeficiente de capilaridade. No entanto nas argamassas do presente estudo, apesar da tendência do C.C. diminuir, aos 28 dias de idade, em função da percentagem de resíduo incorporado, as argamassas das famílias “S” e “CS” não apresentam nenhuma tendência em aumentar a resistência à compressão em função da percentagem de resíduo de FCC incorporado.

Da análise à Figura 4.16 verifica-se que, quer os valores do coeficiente de capilaridade quer os valores de resistência à compressão, aos 91 dias de idade, as argamassas da família “S”, não apresentam nenhuma tendência. Desta forma, verifica-se que para as argamassas com resíduo de FCC incorporado, a resistência à compressão apresenta valores compreendidos entre 7,26 MPa e 7,95 MPa e o C.C. toma valores entre 0,57  $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$  e 0,66  $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ .

Respeitante às argamassas da família “CS”, não se verifica qualquer tendência nos valores do coeficiente de capilaridade, apresentando estes valores entre 0,64 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup> e 0,68 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup> (excepção na argamassa FCC 0(CS) que tem um valor mais elevado de 0,81 kg/m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>). No que concerne à relação entre o coeficiente de capilaridade e a resistência à compressão na presente família, esta não está evidente, pois a resistência mecânica aos 91 dias de idade não tem nenhuma tendência, tendo as argamassas FCC 2,5(CS) e FCC 10(CS) valores discrepantes.

Numa argamassa com pozolanas, o facto de tipicamente o aumento da resistência à compressão representar também a diminuição do C.C., deve-se à reacção pozolânica existente, onde o hidróxido de cálcio transforma-se em silicatos de cálcio hidratados, originando a densificação da matriz da argamassa, promovendo a diminuição da dimensão dos poros. Desta forma, é expectável que com a diminuição dos poros, a absorção capilar diminua e a resistência à compressão aumente, contribuindo para a durabilidade da argamassa [25].

### **4.3.3 Ensaio de Secagem**

O ensaio de secagem tem como objectivo compreender a influência que a incorporação do catalisador exausto de FCC pode ter durante a secagem das amostras de argamassas de cal hidráulica em estudo.

As amostras utilizadas durante do ensaio de secagem foram as mesmas que se utilizaram no ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo o último dia de pesagem deste ensaio, o primeiro dia de pesagem do ensaio de secagem (subcapítulo 3.5.3).

O ensaio de secagem foi realizado aos 28 e 91 dias de idade, nas mesmas condições de temperatura e humidade que o ensaio de absorção de água por capilaridade, no

entanto, no ensaio de secagem as amostras de argamassa são colocadas num tabuleiro seco (subcapítulo 3.5.3).

Os resultados referentes a este ensaio apresentam-se nas Figuras 4.17 e 4.18 sob a forma de uma curva de secagem que expressa o teor em água (%) em função do tempo (horas) em que decorreu o ensaio. O teor em água é a quantidade de água que as amostras de argamassa têm num dado momento, em relação à massa inicial.

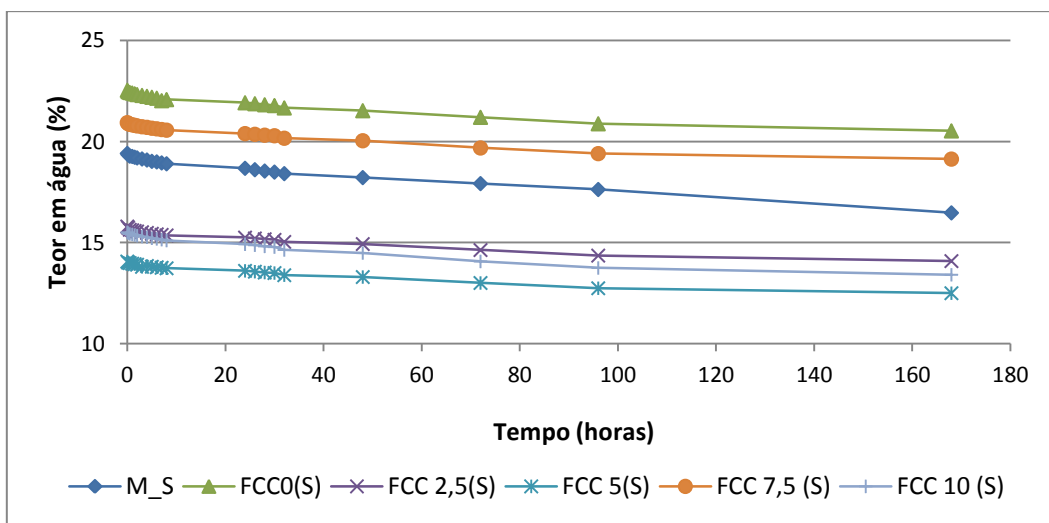


Figura 4.17 – Curva de secagem das amostras de argamassa da família “S”, aos 28 dias de idade.

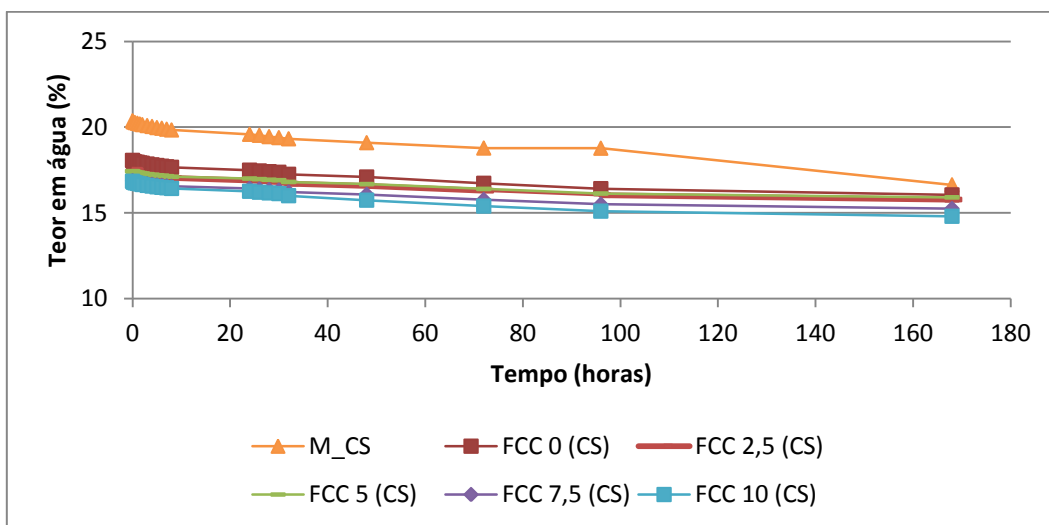


Figura 4.18 - Curva de secagem das amostras da família “CS”, aos 28 dias de idade.

Através das Figuras 4.17 e 4.18 verifica-se que as argamassas, ensaiadas aos 28 dias de idade, não estão totalmente secas no último dia de ensaio (7º dia = 168 horas), uma vez que o teor em água é superior a 10%. Desta forma, o ensaio de secagem realizado para as argamassas com 91 dias de idade, foi prolongado em relação ao período de duração do ensaio nas argamassas com 28 dias de idade, com intuito de analisar o comportamento das argamassas ao longo do período de ensaio.

Da análise da Figura 4.17, verifica-se que durante a secagem das amostras, a argamassa que continha menor teor em água era a FCC 5(S).

Da análise da Figura 4.18, verifica-se que todas as argamassas têm um comportamento semelhante entre si, isto é, a quantidade de água perdida é idêntica.

Aos 91 dias de idades, realizaram-se pesagens das amostras até ao 7º dia de ensaio nos mesmos instantes que se fizeram no ensaio de secagem aos 28 dias de idade e, a partir daí as argamassas foram pesadas semanalmente por forma a ver a evolução da secagem.

Desta forma, realizou-se o ensaio durante cerca de 10 semanas (71 dias) na tentativa de se obter a secagem das amostras de argamassa. Neste sentido, as argamassas foram estudadas nos mesmos instantes nos primeiros 7 dias (168 horas - duração do ensaio aos 28 dias de idade das argamassas), prolongando-se o período de ensaio até os 71 dias. Nas Figuras 4.19 e 4.20 verifica-se a evolução de cada composição de argamassas aos 91 dias de idade, em função do tempo (dias).

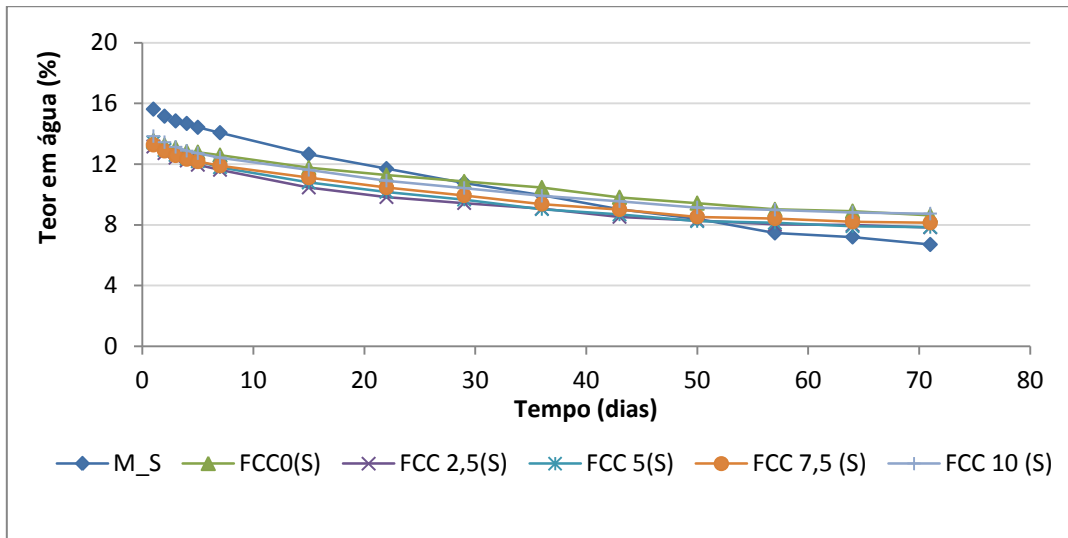


Figura 4.19 - Curva de secagem dos provetes de argamassa de cal hidráulica com areia mista predominantemente siliciosa, aos 91 dias de idade.

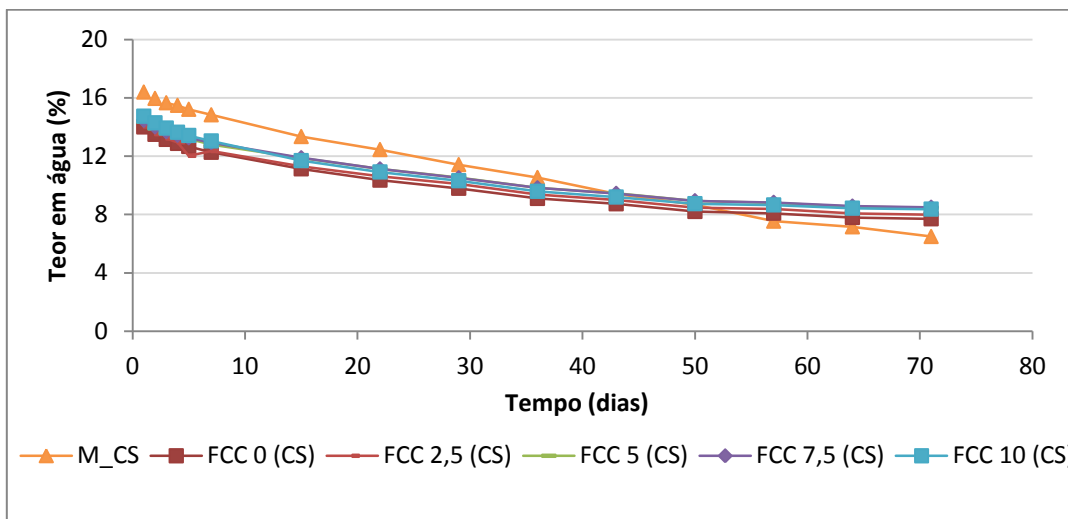


Figura 4.20 - Curva de secagem dos provetes de argamassa de cal hidráulica com areia mista calcária, aos 91 dias de idade.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

As Figuras 4.19 e 4.20, mostram também que tipicamente não existem grandes diferenças ao nível da secagem, entre as argamassas, isto é, independentemente da percentagem de resíduo de FCC incorporado, as argamassas comportam-se da mesma forma ao nível da rapidez de secagem.

Da análise às Figuras 4.19 e 4.20 verifica-se que seria necessário um período de tempo de ensaio superior para que o teor em água atingisse 0% (altura em que as argamassas estariam secas, isto é, com massa constante), no entanto, o comportamento das curvas de secagem das argamassas estudadas são idênticas às curvas de secagem doutros estudos realizados em argamassas de cal hidráulica [39, 40, 42], sendo que as argamassas da presente campanha experimental são mais lentas na perda de água.

(ii) Análise do teor em água ao longo do tempo de cura

No presente subcapítulo a apresentação dos resultados é realizada segundo gráficos separados por idades (28 e 91 dias) e famílias de argamassas.

No que diz respeito à idade em que as argamassas foram ensaiadas, verifica-se que apesar do período de ensaio aos 91 dias de idade ser superior à duração do ensaio aos 28 dias, constata-se que mesmo aos 91 dias de idade a secagem das argamassas é lenta, apresentando-se as argamassas com percentagem de teor em água entre a 6,49% e 8,74%, ao fim de 10 semanas de ensaio. Aos 28 dias de idade, os valores de teor em água das argamassas estudadas no final do ensaio (7 dias) apresentam-se compreendidos entre 13,42% e 20,53%.

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

Da análise às Figuras 4.17 e 4.18 verifica-se que, aos 28 dias de idade, as argamassas comerciais apresentam uma maior perda de teor em água do que as restantes argamassas em estudo, sendo as diferenças relativas para as argamassas das famílias “S” e “CS” no limite até 13,53% e 12,11%, respectivamente, e nas argamassas comerciais M\_S de 15,14% e M\_CS de 18,31%.

Nas argamassas ensaiadas aos 91 dias de idade (Figuras 4.19 e 4.20), a argamassa comercial (M\_S) também é mais rápida a secar quando comparada com as restantes

argamassas estudadas. Desta forma, verifica-se que as diferenças relativas para as argamassas das famílias “S” e “CS” no limite até 41,51% e 45,0%, respectivamente, e nas argamassas comerciais M\_S de 60,4% e M\_CS de 36,56%.

#### **4.3.4 Permeabilidade à água líquida**

O ensaio da permeabilidade à água líquida foi realizado de acordo com o procedimento do Método de *Karsten*, descrito no subcapítulo 3.5.4.

Na presente campanha experimental, as argamassas possuem o mínimo de constituintes possíveis, incluindo a não utilização de qualquer tipo de adjuvante, por forma a avaliar o real efeito da incorporação parcial do resíduo de FCC. Consequentemente as superfícies das argamassas em estudo não se encontravam tão uniformes como as argamassas comerciais e outras argamassas, já ensaiadas pelo Método de *Karsten*.

A não uniformidade da superfície dificultou a fixação do tubo de *Karsten* à argamassa, implicando perdas de água por debaixo do mesmo, impossibilitando assim, o correcto funcionamento do ensaio.

Neste sentido, não se apresentam os valores resultantes do ensaio, devido à incongruência e incerteza dos valores obtidos, provocados pela situação acima descrita.

#### 4.3.5 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de ultrassons é realizado com o intuito de avaliar a velocidade de propagação da onda ultrassônica de acordo com o procedimento da norma brasileira NBR 15630 [31] descrito no subcapítulo 3.5.5.

O presente ensaio permitiu avaliar a estrutura porosa da matriz de ligante, verificando se a argamassa se encontrava mais ou menos densa, através do tempo que a onda emitida levou a passar pela amostra de argamassa.

Na Figura 4.21 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

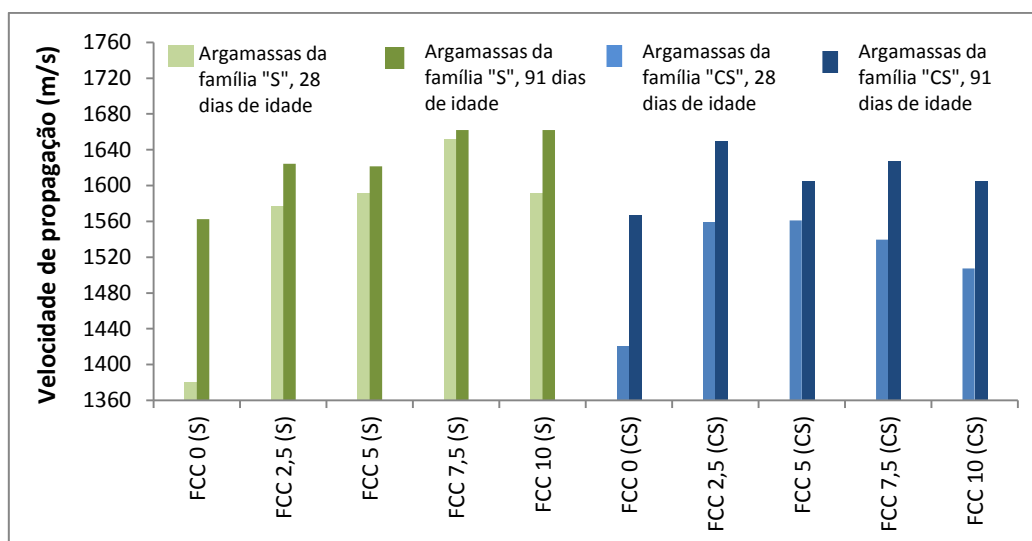


Figura 4.21 – Velocidade de propagação das ondas nas argamassas, aos 28 e 91 dias de idade.

A Figura 4.21 mostra que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos 28 dias de idade varia entre 1380,10 e 1652,32 m/s, apresentado-se esta, menor do que aos 91 dias de idade, tomando valores compreendidos entre 1562,50 e 1705,76 m/s.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

No que diz respeito à influência que a incorporação do catalisador exausto pode ter no comportamento das argamassas, verifica-se que o efeito na velocidade de propagação da onda é muito pequeno, independentemente da percentagem de catalisador exausto incorporado.

Excepções ao comportamento verificam-se nas argamassas FCC 0(S) e FCC 0(CS), sem incorporação de resíduo de FCC, apresentando estas argamassas valores de velocidade de propagação menores comparativamente com as restantes.

Os resultados obtidos justificam-se devido à utilização do catalisador exausto de FCC reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e com a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Estes são os principais responsáveis pelas propriedades ligantes das argamassas [10]. Desta forma, a argamassa encontra-se mais densa devido às propriedades ligantes que confere, facilitando a passagem da onda ultrassónica induzida, promovendo o aumento da velocidade de propagação da onda.

(ii) Análise da velocidade de propagação da onda ao longo do tempo de cura

Da análise da Figura 4.21, verifica-se que a velocidade de propagação da onda ultrassónica é feita mais rapidamente nas argamassas com 91 dias de idades do que nas argamassas com 28 dias de idade, independentemente da percentagem de catalisador exausto incorporado.

Simultaneamente sabe-se que com o aumento de tempo de hidratação formam-se mais compostos químicos que diminuem os espaços vazios da matriz. Desta forma, a matriz da argamassa tem tendência a densificar, originando argamassas mais compactas, conseqüentemente facilita a passagem da onda, aumentando a velocidade de propagação da mesma, justificando assim os resultados apresentados na Figura 4.21.

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

A Figura 4.21 não apresenta os resultados das argamassas comerciais, devido à impossibilidade de as testar no presente ensaio, uma vez que as amostras de argamassa se encontravam um pouco degradadas nas suas faces extremas (topos). Desta forma, não foi possível criar o contacto necessário entre os topos das amostras e os transdutores, por forma a possibilitar a passagem da onda ultrassónica. Neste sentido não se comparam as argamassas comerciais com as restantes argamassas em estudo.

**Relação entre Velocidade de Propagação de Onda e resistência à compressão aos 28 e 91 dias de idade**

Nas Figuras 4.22 e 4.23 apresentam-se novamente os valores da velocidade de propagação de onda (apresentados na Figura 4.21) e os valores da resistência à compressão (apresentados na Figura 4.5) aos 28 e 91 dias de idade, respectivamente, para os analisar comparativamente.

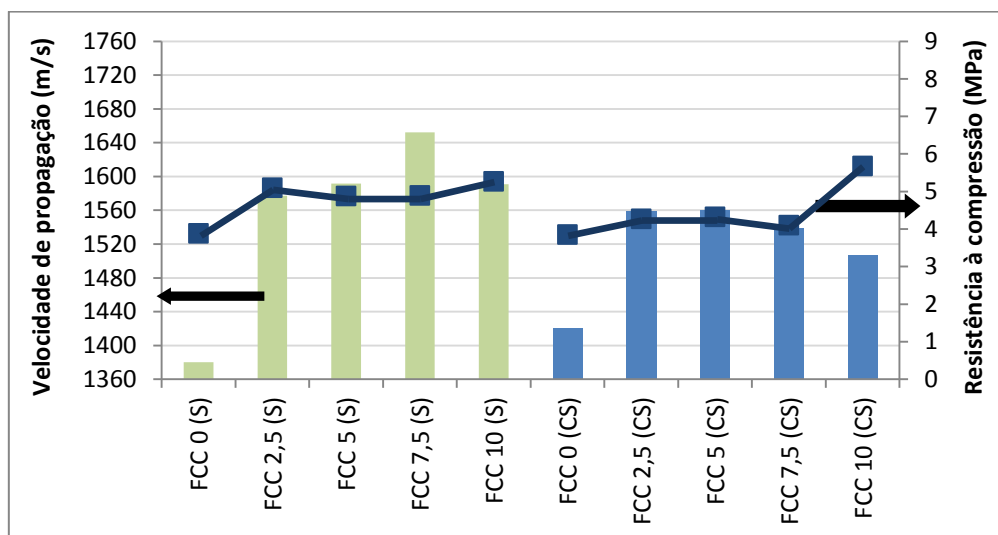


Figura 4.22 - Relação entre velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 28 dias de idade.

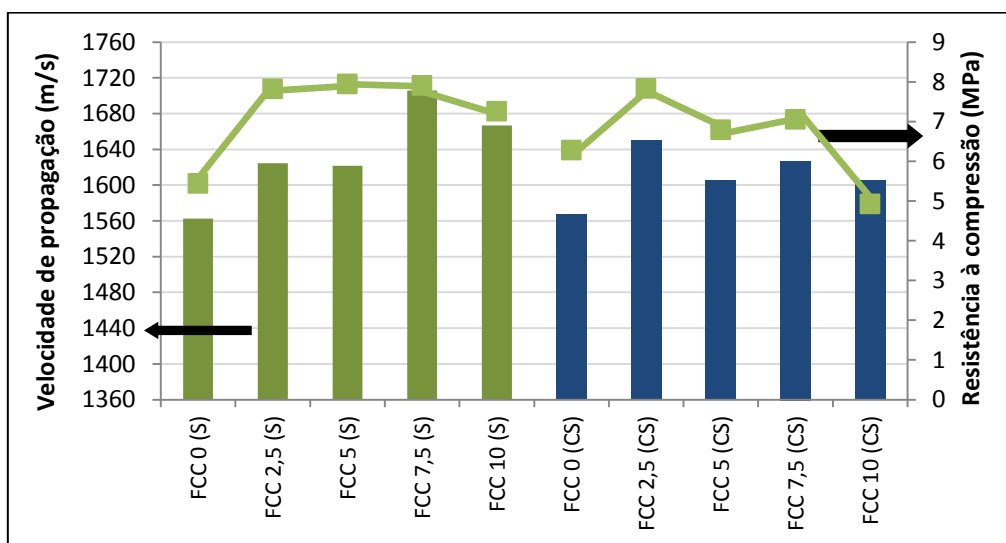


Figura 4.23 - Relação entre velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) e resistência à compressão (MPa) das argamassas, aos 91 dias de idade.

Da análise às Figuras 4.22 e 4.23 verifica-se que as argamassas que têm na sua composição catalisador exausto incorporado, têm valores de velocidade de propagação da onda ultrassônica próximos entre si, isto é, não existe uma variação significativa nem se verificam tendências de aumento ou diminuição dos valores em função da quantidade de resíduo de FCC incorporado. Simultaneamente, verifica-se que os valores de resistência à compressão para as mesmas argamassas também não têm variações de valores significativos.

Tipicamente, quanto maior é a resistência à compressão, maior é a velocidade de propagação da onda. O aumento de resistência à compressão acontece quando a argamassa é mais densa devido à densificação da matriz de ligante, por sua vez, quanto mais densa é a argamassa, maior é a velocidade de propagação da onda, devido à maior facilidade de passagem da mesma.

Neste sentido, os resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas estão coerentes com os resultados da resistência à compressão, na medida em que não existe qualquer tendência quer nos valores obtidos na resistência à compressão quer nos resultados do ensaio de velocidade de propagação da onda.

#### 4.3.6 Resistividade Eléctrica

Na realização deste ensaio, utilizaram-se as recomendações da DURAR [32] específicas para betões, adaptando-as para argamassas. O procedimento utilizado no presente ensaio encontra-se descrito no subcapítulo 3.5.6.

O ensaio da resistividade eléctrica permite a avaliação da condutividade eléctrica do material em estudo. A condutividade de cada material é influenciada por diversos factores como o grau de saturação dos poros, fissuração e as condições cura do mesmo.

A Figura 4.24 mostra os resultados obtidos na realização do ensaio de resistividade eléctrica.

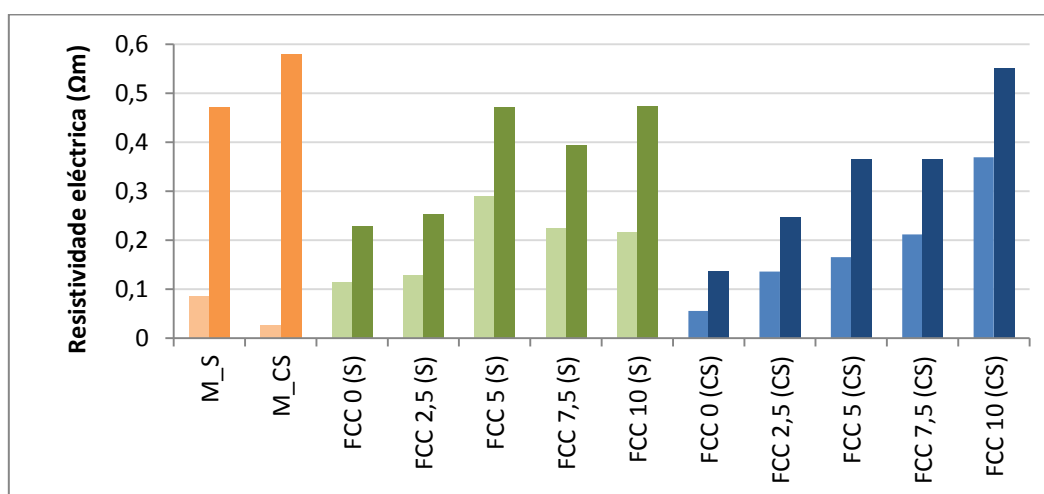


Figura 4.24 – Resistividade eléctrica das argamassas aos 28 e 91 dias de idade.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

Ao analisar os resultados obtidos, observa-se que, essencialmente na família “CS”, à medida que se adiciona mais quantidade de catalisador exausto, o valor da resistividade eléctrica aumenta. Explica-se a verificação anterior, pelo facto da densificação da matriz aumentar, em função do aumento da incorporação de resíduo

de FCC que tem elevada área superficial específica. Assim, quanto mais densa é a argamassa, menor é a resistência eléctrica, por conseguinte, maior é a resistividade da argamassa (eq. 3.10).

(ii) Análise da resistividade eléctrica ao longo do tempo de cura

Da análise da Figura 4.24, verifica-se que aos 91 dias de idade, as argamassas têm sempre maior resistividade do que aos 28 dias de idade. Simultaneamente, verifica-se que, apesar dos valores obtidos serem distintos, dentro de cada família “S” e “CS”, as argamassas têm a mesma tendência aos 28 dias e 91 dias de idade.

A relação existente entre as idades de cura das argamassas era expectável, na medida em que quanto maior é a idade destas, maior será o valor da resistividade eléctrica, devido às reacções de hidratação, tal como se verifica noutro estudo, com betão, com outras pozolanas tais como: escórias de alto forno, cinzas volantes e/ou sílicas de fumo [43].

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

Da análise à Figura 4.24 verifica-se que as argamassas comerciais, aos 28 dias de idade, têm valores de resistividade eléctrica próximos das argamassas da família “S” e “CS” sem incorporação de resíduo de FCC – FCC 0(S) e FCC 0(CS). Na idade de 91 dias, verifica-se que as argamassas comerciais têm um aumento significativo de resistividade eléctrica, o que não se verifica nas argamassas FCC 0(S) e FCC 0(CS).

**Relação entre Resistividade Eléctrica e Velocidade de Propagação de Onda aos 28 dias de idade**

Na Figura 4.25 apresentam-se novamente os valores da velocidade de propagação de onda (apresentados na Figura 4.21) e os valores da resistividade (apresentados na Figura 4.24) aos 28 dias de idade, para os analisar comparativamente.

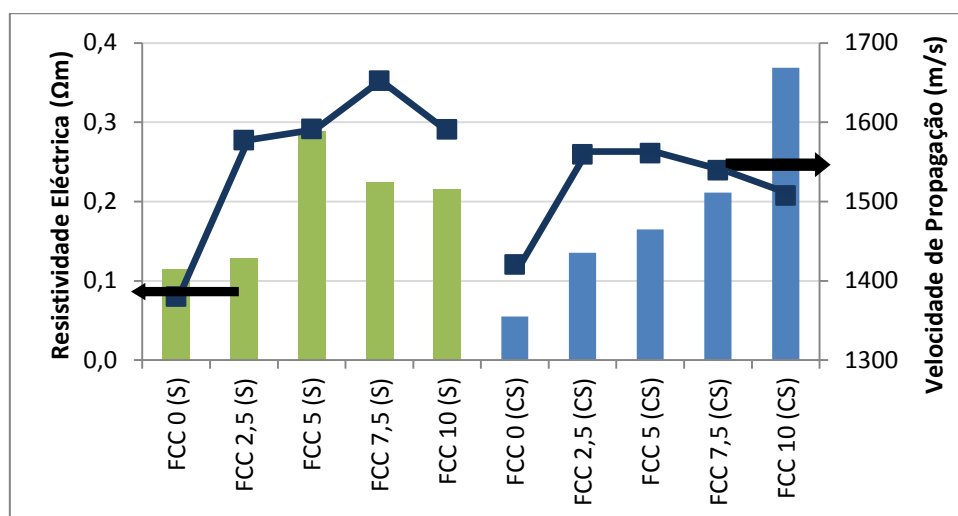


Figura 4.25 – Relação entre resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) e velocidade de propagação de onda (m/s) das argamassas aos 28 dias de idade.

Da análise à Figura 4.25, verifica-se que, independentemente da quantidade de resíduo de FCC incorporado, as argamassas da família “S”, têm valores de velocidade de propagação muito próximos entre si, à excepção da argamassa sem resíduo de FCC (FCC 0(S)).

Relativamente às argamassas da família “CS”, verifica-se que tipicamente há um aumento progressivo dos valores da resistividade paralelamente ao aumento da incorporação de resíduo de FCC. No entanto, para as mesmas composições de argamassas, a velocidade de propagação de onda não verifica o mesmo comportamento, sendo os valores de velocidade de propagação da onda da família “CS” muito próximos entre si.

### **Relação entre Resistividade Eléctrica e Velocidade de Propagação de Onda aos 91 dias de idade**

Na Figura 4.26 apresentam-se novamente os valores da velocidade de propagação de onda (apresentados na Figura 4.21) e os valores da resistividade (apresentados na Figura 4.24) aos 91 dias de idade, para os analisar comparativamente.

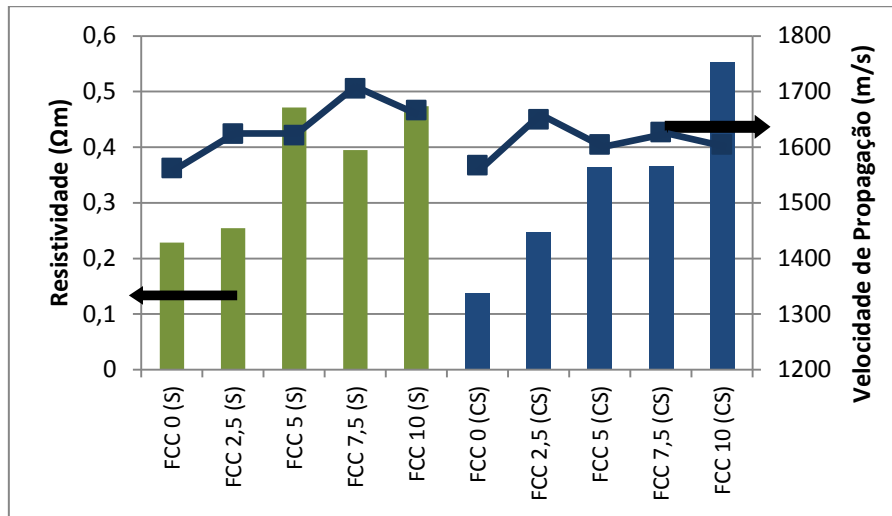


Figura 4.26– Relação entre resistividade eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) e velocidade de propagação de onda (m/s) das argamassas aos 91 dias de idade.

Da análise à Figura 4.26, verifica-se que a tendência do comportamento das argamassas aos 91 de idade é idêntica ao comportamento das mesmas aos 28 dias de idade.

No que diz respeito à relação entre os valores obtidos nos ensaios da resistividade e da velocidade de propagação de onda, verifica-se que apesar dos valores de resistividade aumentarem com a incorporação de resíduo de FCC, nas argamassas da família “CS”, os valores da velocidade de propagação da onda não são influenciados, verificando-se resultados próximos entre si.

Neste sentido, constata-se que a análise dos resultados das argamassas aos 91 dias de idade é idêntica à análise realizada para as mesmas argamassas aos 28 dias de idade.

#### 4.3.7 Análise de Variação Dimensional

O presente ensaio é realizado segundo procedimento descrito no subcapítulo 4.3.7.

Na presente campanha experimental colocaram-se as argamassas em estudo em condições de cura idênticas, na qual umas se encontram expostas ao ar e outras

dentro de água. O procedimento do presente ensaio prevê analisar o comportamento das argamassas depois de sujeitas às respectivas condições de cura, verificando se estas expandem ou retraem.

É expectável que ao longo do tempo possam ocorrer diferentes fenómenos nas argamassas, quando sujeitas a determinadas condições de cura e compostas por diversos materiais, entre os quais a retracção devido a diferentes causas. Desta forma, o fenómeno de retracção pode ser classificado como: retracção plástica, retracção por secagem, retracção química, retracção autógena e retracção térmica [44].

Prevê-se que durante o período de cura, e com o tempo de hidratação se formem mais compostos químicos que dão origem a compostos hidratados. Os compostos hidratados são mais densos e, por isso, ocupam menos espaço do que aqueles que lhes deram origem, prevendo-se assim que este factor seja um dos que contribui para que as argamassas sofram pelo menos retracção química.

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram os resultados obtidos no ensaio de variação dimensional para as diferentes argamassas em estudo.

O cálculo utilizado para a obtenção dos resultados, implica que a apresentação gráfica tenha a retracção como positiva e a expansão como negativa (eq. 3.11).

As argamassas M\_CS, FCC 0(S) e FCC 0(CS) com 28 dias de idade, não foram consideradas na análise de resultados, sendo representadas nas Figuras 4.27 e 4.28, com texturas diferentes, uma vez que apresentam valores díspares dos restantes resultados.

Neste sentido, prevê-se que tenha ocorrido algum erro experimental, na medida em que as argamassas M\_CS e FCC 0(S) são as únicas que não sofreram retracção aos 28 dias de idade, bem como a argamassa FCC 0(CS) que apesar de retrair, o valor é bastante distinto quando comparado com os valores das restantes argamassas.

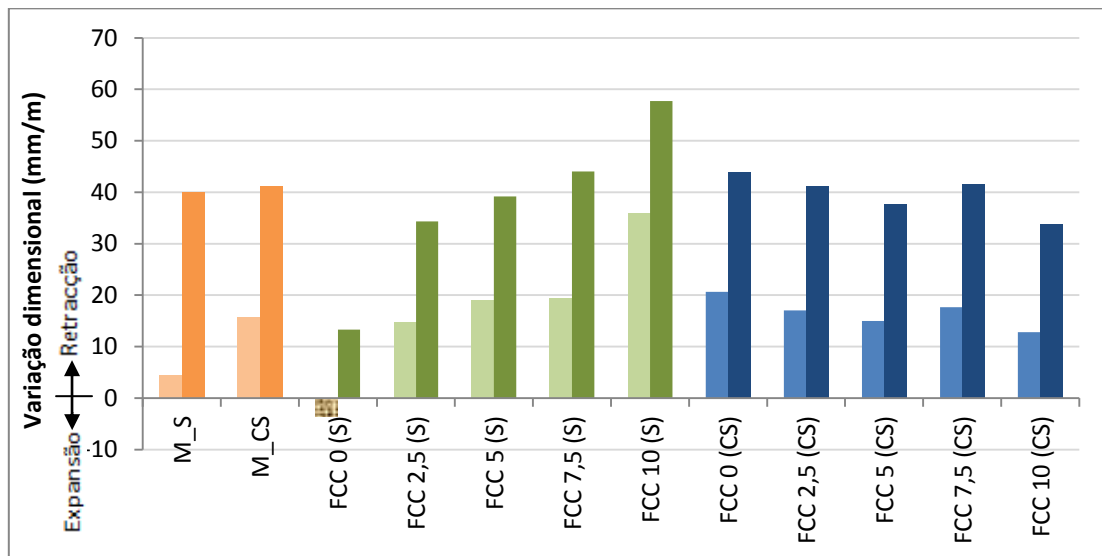


Figura 4.27 – Variação dimensional das argamassas nas condições de cura fora de água, aos 28 e 91 dias de idade.

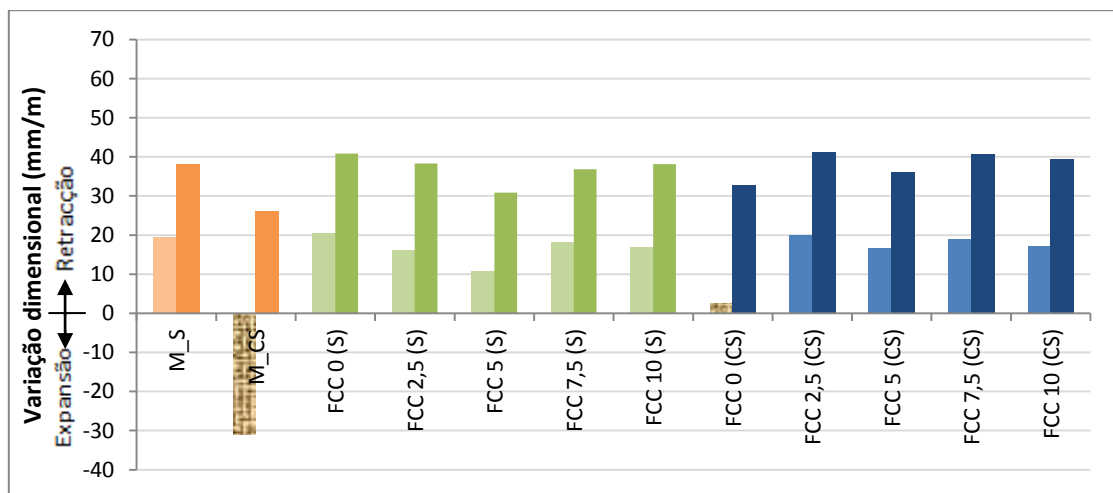


Figura 4.28 – Variação dimensional das argamassas nas condições de cura dentro de água, aos 28 e 91 dias de idade.

Dos gráficos das Figuras 4.27 e 4.28, verifica-se que independentemente das condições a que as argamassas estiveram sujeitas, ar ou água, as amostras têm tendência a retrair. Simultaneamente verifica-se que, quer na cura dentro de água quer na cura fora de água, as argamassas aumentam a sua retracção dos 28 para os 91 dias de idade.

(i) Análise do efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas

Da análise aos gráficos das Figuras 4.27 e 4.28 verifica-se que quer nas argamassas sujeitas ao ar, quer nas argamassas sujeitas à cura dentro de água, aos 28 dias de idade, a percentagem de resíduo de FCC incorporado não tem influência nos valores de retracção obtidos. Excepção a este comportamento, verifica-se nas argamassas da família “S” da Figura 4.27, que apresentam uma ligeira tendência ao aumento de retracção à medida que se aumenta a quantidade de resíduo de FCC. Desta forma, verifica-se que os resultados de retracção, aos 28 dias de idade, das argamassas das famílias “S” e “CS” variam entre 10,78 e 20,64 mm/m. Excepção a este comportamento verifica-se na argamassa FCC 10(S) que tem um aumento significativo de retracção, tendo um valor de 35,98 mm/m.

No entanto, verifica-se, nas argamassas sujeitas à cura fora de água da família “S”, aos 91 dias de idade, que quanto maior a percentagem de resíduo de FCC incorporado, maior é o valor de retracção da argamassa (Figura 4.27).

(ii) Análise variação dimensional ao longo do tempo de cura

Da análise das Figuras 4.27 e 4.28, verifica-se também que aos 91 dias de idade as argamassas têm maior valor de retracção do que aos 28 dias de idade, o que seria expectável pois as argamassas têm mais tempo de hidratação, e por isso formam-se mais composto químicos que dão origem a compostos hidratados. Estes compostos são mais densos e por isso ocupam menos espaço do que os que lhes deram origem.

Desta forma, verifica-se que, independentemente da cura a que as argamassas estiveram sujeitas, os valores das argamassas aos 28 dias de idade variam entre 10,78 e 35,98 mm/m e aos 91 dias de idade variam entre 13,30 e 57,74 mm/m.

(iii) Análise comparativa entre argamassas comerciais e restantes argamassas

Relativamente às argamassas das famílias “S” e “CS” verifica-se que as argamassas que estiveram na cura fora de água (Figura 4.27) sofreram efectivamente retracção, tal como acontece nas argamassas comerciais. A retracção era expectável uma vez que quando sujeitas ao ar durante um determinado período de tempo, formam compostos hidratados que ocupam menos espaço, ficando a argamassa mais densa.

Relativamente ao processo de expansão da argamassa, era expectável que pudesse ocorrer quando as argamassas se encontravam dentro de água, uma vez que com o tempo de hidratação, podem criar-se espaços vazios como as fissuras que ao estarem em contacto com a água, vão ficando preenchidos, dando origem ao aumento de volume da argamassa e consequentemente à expansão da mesma.

Assim, e sendo que a expansão não se verificou nas amostras em estudo, prevê-se que as argamassas em questão tenham poucos poros e fissuras, por forma a deixar a água entrar e ocupar os espaços vazios. Prevê-se que esta situação possa ser benéfica, na medida em que é importante que numa argamassa existam poucos espaços vazios, contribuindo para melhores valores de resistências mecânicas e melhores resultados de coeficientes de capilaridade.

Os valores obtidos no presente ensaio, revelam retracção por parte das argamassas, sendo que o maior valor de retracção é da argamassa FCC 10(S) de 57,74 mm/m, aos 91 dias de idade (Figura 4.27). Convertendo o valor referido, para unidades visíveis na amostra da argamassa testada, revelaria uma diminuição cerca de 0,9 cm, pelo que seria visível a olho nu.

#### **4.3.8 Tensão de aderência à tracção**

O ensaio de tensão de aderência ao suporte (“Pull-Off”) foi realizado de acordo com procedimento da norma EN 1015-12 [33] descrito no subcapítulo 3.5.8. Este ensaio

pretende analisar qual a força a exercer sobre a pastilha metálica quadrada colada, para conseguir arrancar a argamassa que aderiu ao tijolo.

Na Figura 4.29 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de tensão de aderência à tracção das argamassas estudadas, aos 28 e 91 dias de idade.

No entanto, durante o presente ensaio, verificou-se que existiam argamassas soltas do tijolo, impossibilitando a realização do ensaio aos 28 dias de idade, nas argamassas – FCC 10(S) e da família “CS” – e aos 91 dias de idade nas argamassas – das famílias “S” e “CS”.

Assim, sendo que o ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias de idade, apresentam-se na Figura 4.29 os únicos resultados obtidos para uma breve análise.

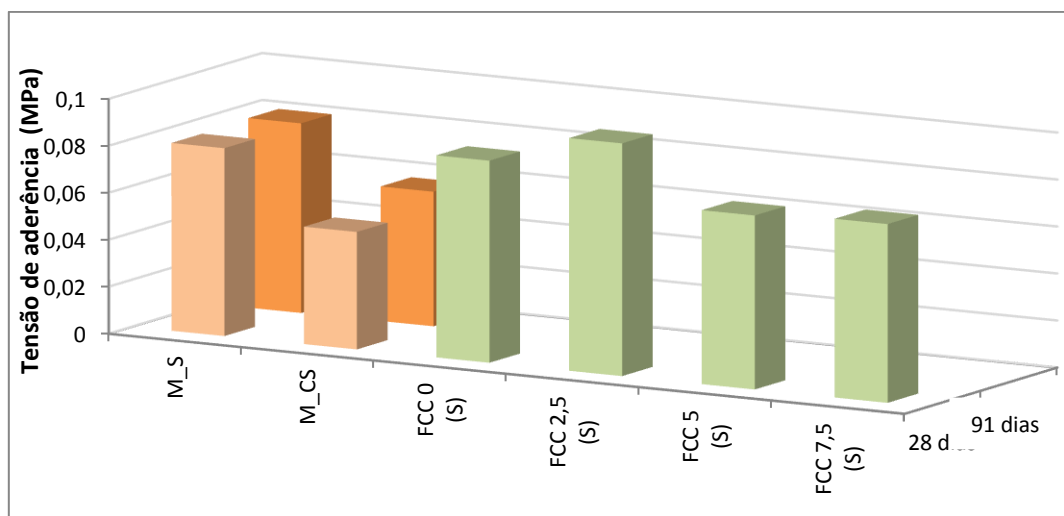


Figura 4.29 –Tensão de aderência ao suporte (MPa), aos 28 e 91 dias de idade.

Através do gráfico da Figura 4.29, é possível verificar que, tanto aos 28 como aos 91 dias de idade, as argamassas comerciais da mesma família apresentam praticamente a mesma tensão aderência ao suporte.

Relativamente ao método utilizado, talvez a utilização de outro tipo de suporte permitisse uma melhor aderência, ou mesmo a incorporação de um adjuvante específico para melhorar a aderência das argamassas das famílias “S” e “CS”.

Da Figura 4.29 verifica-se que além dos valores das argamassas comerciais, os valores apresentados são das argamassas da família “S” aos 28 dias de idade, uma vez que todas as outras argamassas não foram possíveis testar.

Desta forma, verifica-se que as argamassas da família “S” apresentam valores idênticos entre si, independentemente da percentagem de resíduo de FCC incorporado. Simultaneamente, constata-se que os valores obtidos nas argamassas da família “S” são próximos do valor da argamassa comercial “M\_S”.

***“Incorporação de resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para a reabilitação de edifícios.”***

---

## **5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1 CONCLUSÕES**

O presente capítulo expõe as conclusões retiradas da análise dos resultados experimentais obtidos no âmbito do presente trabalho final de mestrado, no qual se estudou a viabilidade de incorporar um resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios. Em concreto, o resíduo reutilizado foi o catalisador exausto de FCC, gerado na Refinaria de Sines. O resíduo foi incorporado nas argamassas como substituto parcial do ligante, cal hidráulica.

Apresentam-se, de seguida, as conclusões obtidas a partir dos ensaios realizados nas argamassas, tanto no estado fresco (subcapítulo 4.2) como no estado endurecido (subcapítulo 4.3). Por fim, no subcapítulo 5.2, apresentam-se propostas de desenvolvimentos futuros a realizar no âmbito da investigação da utilização resíduo de FCC como substituto parcial da cal hidráulica.

#### **Ensaio no estado fresco:**

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados com as argamassas, formuladas no presente trabalho, no estado fresco podem retirar-se as seguintes conclusões:

- A consistência das argamassas é pouco afectada pela presença do resíduo de FCC, na gama de incorporações estudada entre 2,5 a 10%;
- As argamassas das famílias “S” e “CS” têm valores de massa volúmica idênticos entre si, independentemente da percentagem de resíduo de FCC incorporado;
- As argamassas comerciais têm menor valor de massa volúmica relativamente às argamassas das outras famílias, no entanto, são as que requerem maior quantidade de água de amassadura, para o mesmo valor de mesa de espalhamento constante.

**Ensaio no estado endurecido:**

No que diz respeito às propriedades testadas no estado endurecido, as conclusões que se destacam são as seguintes:

- O resíduo de FCC é um material com actividade pozolânica, uma vez que as argamassas estudadas, apresentam valores de IA superiores à percentagem de ligante (cal hidráulica) que a argamassa contém;
- Nos resultados de resistência à flexão não foi possível identificar nenhuma tendência nos valores apresentados, quer em função da família que as argamassas pertencem, quer em função das idades em que foram ensaiadas (28, 56 e 91 dias)
- Os valores da resistência à compressão são idênticos independentemente das percentagens de catalisador incorporado na gama estudada, verificando-se assim que quer aos 28, 56 ou 91 dias de idade, estas apresentam valores próximos entre si. Excepção a este comportamento verifica-se na argamassa FCC 10(CS);
- Os valores da resistência à compressão adquiridos para as argamassas das famílias “S” e “CS” são maiores do que os valores obtidos nas argamassas comerciais, aos 28, 56 e 91 dias de idade;
- Tipicamente verifica-se que nas argamassas das famílias “S” e “CS” a resistência à compressão aumenta dos 28 dias para os 91 dias de idade;
- Os resultados obtidos no ensaio da absorção de água por capilaridade indicam que com o aumento da quantidade de catalisador incorporado, as argamassas têm menor coeficiente de capilaridade, aos 28 dias de idade;
- Aos 91 dias de idade o coeficiente de capilaridade apresenta valores superiores aos 28 dias de idade, apresentando assim, coeficientes de capilaridade idênticos para todas as argamassas, independentemente da percentagem de catalisador exausto incorporado;

- Os valores adquiridos da permeabilidade à água líquida não permitiram tirar conclusões acerca da permeabilidade das argamassas estudadas, uma vez que a forma que se implementou não se adequou às argamassas estudadas;
- Os valores obtidos do ensaio da velocidade de propagação da onda ultrassónica mostram que, aos 28 dias as argamassas com resíduo de FCC incorporado, apresentam valores próximos entre si;
- Aos 91 dias de idade, os valores de velocidade de propagação de ondas são superiores aos valores dos 28 dias de idade, verificando-se que os resultados da velocidade de propagação são idênticos entre si, independentemente da percentagem de catalisador incorporado na gama estudada;
- O aumento da percentagem de catalisador inserido nas argamassas, tipicamente conduz ao aumento do valor de resistividade tanto aos 28 como aos 91 dias de idade;
- Os valores de resistividade aumentam ao longo do tempo, verificando-se aos 91 dias, valores de resistividade eléctrica maiores do que aos 28 dias de idade;
- As argamassas sofrem retracção independentemente das condições de cura a que estão sujeitas;
- Ao longo do tempo de cura, as argamassas têm tendência a retrair mais, obtendo valores de retracção aos 91 dias de idade superiores aos valores obtidos aos 28 dias de idade;
- As argamassas da família “S” testadas, aos 28 dias de idade, apresentam valores de tensão de aderência ao suporte idênticos à argamassa comercial com o mesmo tipo de areia (M\_S). No entanto, todas as restantes argamassas do presente trabalho não foram possíveis testar, por falta de aderência das argamassas ao suporte.

## **5.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Após realizar o presente estudo e as conclusões do mesmo, ficam evidentes diversas questões que ficaram por esclarecer e de ensaios cuja metodologia experimental tem que ser adaptada. Neste sentido, e dado o interesse do aumento do conhecimento sobre a incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica, seguem algumas propostas de trabalhos futuros:

- Realizar os ensaios de permeabilidade ao vapor de água, de porosidade aberta e resistência aos sais mantendo as mesmas características da presente campanha experimental;
- Realizar o ensaio de secagem nas condições ambientais a que o laboratório está sujeito, em vez das câmaras de cura a que foram sujeitos;
- Repetir o ensaio de resistência mecânica, nomeadamente a resistência à flexão, mantendo as mesmas características desta campanha experimental;
- Avaliar a aderência das argamassas formuladas no presente trabalho, utilizando outro tipo de suporte, que não seja o tijolo, verificando qual a aderência das argamassas, mesmo sem adjuvantes incorporados;
- Avaliar adjuvantes interessantes, por forma a corrigir e melhorar alguns valores obtidos na presente campanha experimental, como a tensão de aderência ao suporte e a resistência mecânica (flexão e compressão), otimizando assim as argamassas formuladas.
- Avaliar a viabilidade de incorporar maior quantidade de resíduo de FCC, para a mesma composição das argamassas da presente campanha experimental.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] AFONSO, D. – Efeito da moagem do catalisador exausto de *cracking* catalítico nas propriedades de argamassas de cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [2] APPLETON, J. – Reabilitação de Edifícios Antigos e Sustentabilidade. VI ENEEC 2010 – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil. Universidade de Évora, Abril 2010.
- [3] COUTO, A.B.; COUTO, J.P. - Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios Antigos. APFAC, 2.º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Novembro 2007.
- [4] FARIA, J.F.D.; TORRAL, F.P.; JALALI, S. - Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 1 – Trabalhabilidade e comportamento mecânico. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2011.
- [5] SEABRA, M.P. et al.- Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico de argamassas de cal aérea. APFAC, 2.º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Novembro 2007.
- [6] MARGALHA, M.G. – Argamassas: Conservação e Recuperação do Património. Universidade de Évora – Engenharia Civil. Documento de apoio as aulas de Conservação e Recuperação do Património.
- [7] HENRIQUES, F.M.A.; FARIA, P. - O papel da investigação no estudo das argamassas de Substituição na conservação do património. Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, 2008.
- [8] VEIGA, M. Rosário – Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Actas do 3.º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio 2003.
- [9] COUTINHO, J. S. – Materiais de Construção 2. Porto: Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2002 (actualizado em 2006) pp. 15-27; 102-114.

- [10] COSTA C. - “Ligantes Hidráulicos,” em *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, MARGARIDO, F.; GONÇALVES, C. Eds, IST Press, Lisboa, 2012, pp. 3-54.
- [11] SEQUEIRA, A.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. – Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. APFAC, 2<sup>o</sup> Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Novembro 2007.
- [12] COUTINHO, J.S. – *Materiais de Construção 1*. Porto: Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 1999.
- [13] MARGALHA, M.G.; VEIGA, M.R.; BRITO, J. - Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. APFAC, 2<sup>o</sup> Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Novembro 2007.
- [14] ANTUNES, M. - ECO-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [15] COSTA, C.; GEADA, R. - Efeito de incorporação de resíduo da indústria petrolífera nas propriedades mecânicas de argamassas. APFAC, 4<sup>o</sup> Congresso Português de Argamassas e ETICS. Coimbra, Março 2012.
- [16] GOOGLE, docs, Portugal. Disponível em: <<http://www.iqsc.usp.br/cursos/quimicageral/petroleo2-2.htm> > [Acedido em 2014]
- [17] GOOGLE, docs, Portugal. Disponível em: <<http://www.fcmc.es.gov.br/download/Petroleo.pdf> > [Acedido em 2014]
- [18] COSTA, R. – Utilização de catalisadores de *cracking* catalítico na despolimerização do poli (metracrilato de metilo). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica.
- [19] DIRECTÓRIO DE ARTIGOS GRATUITOS – Artigonal. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/educacao-online-artigos/a-refinacao-do-petroleo-4168842.html>>. [Acedido em 2014]
- [20] GALLY, C. – Desenvolvimento de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental contendo resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo. Brasil,

Salvador: Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana.

- [21] PORTUGAL, Galp Energia – Disponível em: < <http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/RefinariaSines/Paginas/Refinaria-de-Sines.aspx> > [Acedido em 2014].
- [22] CARDOSO, D. - Argamassas de cais e metacaulino sujeitas a diferentes condições de cura: evolução das características e dos compostos mineralógicos formados com a idade. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [23] BANDEIRA, A. - Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [24] CONCEIÇÃO, M. – Reutilização do Catalisador exausto da Industria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [25] BRITO, N. – Efeito da incorporação de resíduo da indústria petrolífera na durabilidade de argamassas de reparação de estruturas de betão. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [26] GOOGLE, docs, Portugal. Disponível em: < [http://www.cimpor-portugal.pt/cache/binImagens/Ficha\\_Tecnica\\_Cal\\_Hidraulica\\_HL\\_5-1124.pdf](http://www.cimpor-portugal.pt/cache/binImagens/Ficha_Tecnica_Cal_Hidraulica_HL_5-1124.pdf) > [Acedido em 2014].
- [27] EN 1015-3. Fevereiro 1999, Methods of test mortar of masonry - Determination of consistence of fresh mortal (by flow table), Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [28] EN 1015-6. Outubro 1998, Methods of test for mortar for masonry - Determination of bulk density of fresh mortar, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [29] EN 1015-11. Agosto 1999, Methods of test for mortar masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Brussels: European committee for standardization (CEN).

- [30] EN 1015-18. Dezembro 2002, Methods of test for mortar masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, Brussels: European committee for standardization (CEN).
- [31] ABNT NBR 15630. Outubro 2008, Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica, Associação Brasileiro de Normas Técnicas (ABTN).
- [32] DURAR. Red Tematica XV. B Durabilidad de la Armadura –Manual de Inspeccion evaluacion Y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV. Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, pp. 88-92.
- [33] EN 1015-12. Fevereiro 2000, Methods of test for mortar for masonry- Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, Brussels: European Committee for standardization (CEN).
- [34] RODRIGUES, A.; FARIA, P.; FLORES-COLEN, I. - argamassa industrial para a reabilitação de rebocos antigos. I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Coimbra, Junho 2014.
- [35] VEIGA, M. R. – As argamassas na conservação. Actas das 1<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes. Aveiro, Novembro 2003. Colecção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa 2003.
- [36] VEIGA, M. R. et al. - *Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings*. Guimarães, 2001, pp. 353-361.
- [37] NP EN 998 -1. Abril 2010, Especificações de argamassas para alvenarias – Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores, Caparica: IPQ.
- [38] ASTM C311-07, Standard Test Methods for sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolanic activity for Use in Portland- Cement Concrete. EUA: American Society for Testing and Materials International, 2007.
- [39] GRILLO, J. et al. – *New Natural Hydraulic Lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions*. Construction and Building Materials.[Acedido em Dezembro 2014]

- [40] FARIA, P.; SILVA, V.; MADEIRA, T. - *Natural hydraulic lime mortars with ceramic wastes for masonry*. Guimarães: *9th International Masonry Conference*, 2014. *International Masonry Society*.
- [41] FARIA, J.F.D.; TORGAL, F.P.; JALALI, S. - Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 2 – Trabalhabilidade e comportamento mecânico. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2011.
- [42] GOMES, M.; GONÇALVES, T.; FARIA, P. - Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais. APFAC, 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Coimbra, Março 2012.
- [43] SILVA, P.; FERREIRA, R.; FIGUEIRAS, H. - Medições de resistividade elétrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura. Encontro Nacional Betão Estrutural, 2012.
- [44] AOKI, J.; MEDEIROS, G. – Retração – Redução de efeito e compensação. Artigos técnicos, Construindo Melhor, Sobre Concreto, Agosto 2010

*“Incorporação de resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para a reabilitação de edifícios.”*

---

## **ANEXOS**



## **ANEXO A - FICHA TÉCNICA**

A.1 – CAL HIDRÁULICA (HL 5)



## A.1 – CAL HIDRÁULICA (HL 5)



### FICHA TÉCNICA

## Cal Hidráulica HL 5



NP EN 459-1 0866

### ► Constituintes

Calário margoso cozido com extinção e moagem  
Sulfato de cálcio regulador de presa



### ► Características

#### ► Químicas

Sulfatos (SO<sub>3</sub>) ≤ 3,0%  
Cal disponível ≥ 4%

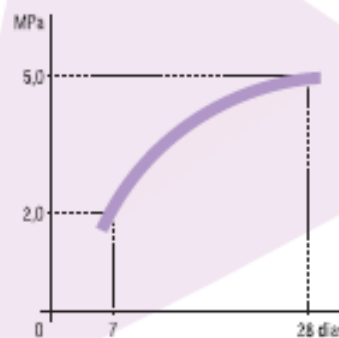
#### ► Físicas

Início de presa (min) > 60  
Expansibilidade (mm) ≤ 20  
Resíduo a 0,090 mm ≤ 15%  
Baridade (g/l) ≥ 600

#### ► Mecânicas

Resistência à compressão  
Valores mínimos  
7 dias: 2,0 MPa  
28 dias: 5,0 MPa

#### Resistência mecânica à compressão Curva de crescimento mínimo



### ► Propriedades especiais das argamassas fabricadas com cal hidráulica do Cabo Mondego

- Grande plasticidade e elevada trabalhabilidade
- Forte aderência
- Grande poder de retenção de água, opondo-se à retração inicial
- Fraca tendência para a fissuração e fendilhamento
- Boa impermeabilidade e durabilidade

Cal Hidráulica  
HL 5



### ► Utilizações recomendadas

- Argamassas de todos os tipos (enchimento, reboco, assentamento e acabamento)
- Pré-fabricação (misturada com cimento)  
Blocos de alvenaria e abobadilha  
Artefactos
- Pavimentos rodoviários  
Na substituição do filler dos betuminosos  
No tratamento de solos húmidos e argilosos
- Em trabalhos diversificados no meio rural

### ► Precauções na aplicação

- Na dosificação e na relação água/ligante
- No processo de cura da argamassa fresca, assegurar uma protecção cuidadosa contra a dessecação, principalmente em tempo quente
- Preparar adequadamente o suporte para receber a argamassa

### ► Contra-indicações

- Trabalhos sob temperaturas muito baixas
- Contacto com ambientes agressivos (águas e terrenos)

### ► Acondicionamento



Saco  
40 kg



Paleta de tara perdida  
30 Sacos = 1200 kg



Paleta a devolver  
40 Sacos = 1600 kg



Granel  
25 toneladas

Camião de 25 toneladas com meios de descarga devidamente selado



**SERVÍÇO COMERCIAL**  
Av. General Figueira, 8 - Edifício CIMPOR - 1649-016 PÓVOA VELHA  
T: 21 940 86 40 - Fax: 21 940 87 02

**SERVÍÇO TÉCNICO-COMERCIAL**  
Av. General Figueira, 8 - Edifício CIMPOR - 1649-016 PÓVOA VELHA  
T: 21 940 86 40 - Fax: 21 940 87 04

**SERVÍÇO DE CONTROLO DE VEZIGAS E CULGAS**  
S. Pedro Fins - Moia - Apartado 1023 - 4490-909 OVAR (DMS) (NOR)  
T: 22 068 82 00 - Fax: 22 067 18 38

[www.cimpor.pt](http://www.cimpor.pt)  
Docu@impor.com

## **ANEXO B - REGISTO**

### **B.1 – DADOS EXPERIMENTAIS REFERENTES A CADA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA**



## B.1 – DADOS EXPERIMENTAIS REFERENTES A CADA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA

### Família das argamassas comerciais

M_S		M_CS	
Materiais	Quantidade (g)	Materiais	Quantidade (g)
Argamassa Comercial siliciosa	3000	Argamassa Comercial calcária	3000
Água	600	Água	642

### Argamassas da família "S"

FCC 0(S)		Quantidade (g)
Materiais		
cal hidráulica		750
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	1563,75
	Areia 0,09 - 0,6	537,75
	"Filler"	148,5
FCC		0
Água		500

FCC 2,5(S)		Quantidade (g)
Materiais		
cal hidráulica		731,25
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	1563,75
	Areia 0,09 - 0,6	537,75
	"Filler"	148,5
FCC		18,75
Água		490

FCC 5(S)		Quantidade (g)
Materiais		
cal hidráulica		712,5
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	1563,75
	Areia 0,09 - 0,6	537,75
	"Filler"	148,5
FCC		37,5
Água		500

FCC 7,5(S)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		693,75
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	1563,75
	Areia 0,09 - 0,6	537,75
	"Filler"	148,5
FCC		56,25
Água		500

FCC 10(S)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		675
Areia mista predominantemente siliciosa	Areia siliciosa SP49	1563,75
	Areia 0,09 - 0,6	537,75
	"Filler"	148,5
FCC		75
Água		510

Argamassas da família "CS"

FCC 0(CS)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		750
Areia calcária	Areia 0,09 - 0,6	1503
	Areia 0,6 - 1,2	596,25
	"Filler"	150,75
FCC		0
Água		510

FCC 2,5(CS)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		731,25
Areia calcária	Areia 0,09 - 0,6	1503
	Areia 0,6 - 1,2	596,25
	"Filler"	150,75
FCC		18,75
Água		510

FCC 5(CS)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		712,5
Areia calcária	Areia 0,09 - 0,6	1503
	Areia 0,6 - 1,2	596,25
	"Filler"	150,75
FCC		37,5
Água		520

FCC 7,5(CS)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		693,75
Areia calcária	Areia 0,09 - 0,6	1503
	Areia 0,6 - 1,2	596,25
	"Filler"	150,75
FCC		56,25
Água		530

FCC 10(CS)		
Materiais		Quantidade (g)
cal hidráulica		675
Areia calcária	Areia 0,09 - 0,6	1503
	Areia 0,6 - 1,2	596,25
	"Filler"	150,75
FCC		75
Água		535

Os dados acima apresentados referem-se às quantidades de cada material utilizado para cada composição de argamassa, por forma a preparar as argamassas para serem ensaiadas nos estados fresco e endurecido, respeitando o valor definido para a mesa de espalhamento.

Os registos obtidos mostram que para cada composição de argamassa das diferentes famílias, adiciona-se uma determinada quantidade de água, sendo que na presente dissertação o valor da mesa de espalhamento é constante, variando assim, a quantidade de água a inserir.



**ANEXO C – ESTUDOS REALIZADOS ÀS ARGAMASSAS NO ESTADO  
FRESCO**

C.1 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO

C.2 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA



## C.1 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO

Designação da argamassa	Média do valor de espalhamento (mm)	Limites estipulados
M_S	171	170 ± 5 mm
M_CS	168	
FCC 0(S)	169	
FCC 2,5 (S)	167	
FCC 5 (S)	171	
FCC 7,5 (S)	166	
FCC 10(S)	174	
FCC 0 (CS)	165	
FCC 2,5 (CS)	165	
FCC 5 (CS)	167	
FCC 7,5 (CS)	167	
FCC 10 (CS)	168	

## C.2 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

Designação da argamassa	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
M_S	1666,3
M_CS	1635,3
FCC 0(S)	2052,2
FCC 2,5 (S)	2052,9
FCC 5 (S)	2045,4
FCC 7,5 (S)	2068,2
FCC 10(S)	2040,6
FCC 0 (CS)	2042,7
FCC 2,5 (CS)	2046,2
FCC 5 (CS)	2056,9
FCC 7,5 (CS)	2038,1
FCC 10 (CS)	2055,0

## **ANEXO D – ESTUDOS REALIZADOS ÀS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO**

D.1 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

D.2 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

D.3 – ENSAIO DE SECAGEM

D.4 – ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

D.5 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

D.6 – ENSAIO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

D.7 – ENSAIO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA À TRACÇÃO – “PULL-OFF”



## D.1 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

### Família das argamassas comerciais

M_S				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,5	± 0,08	1,39	± 0,06
56 Dias	1	± 0,02	1,99	± 0,03
91 Dias	0,59	± 0,15	1,31	± 0,06

M_CS				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,39	± 0,05	1,23	± 0,06
56 Dias	0,49	± 0,00	1,38	± 0,04
91 Dias	0,67	± 0,02	1,27	± 0,10

### Argamassas da família "S"

FCC 0(S)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	1,25	± 0,05	3,89	± 0,32
56 Dias	1,57	± 0,23	5,72	± 0,32
91 Dias	1,58	± 0,05	5,45	± 0,38

FCC 2,5(S)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,89	± 0,07	5,1	± 0,31
56 Dias	0,34	± 0,08	6,1	± 0,32
91 Dias	1,43	± 0,49	7,83	± 0,32

FCC 5(S)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	1,18	± 0,18	4,88	± 0,21
56 Dias	1,65	± 0,75	5,99	± 0,41
91 Dias	1,27	± 0,17	7,95	± 0,25

FCC 7,5(S)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	1	± 0,02	4,89	± 0,35
56 Dias	1,64	± 0,13	6,34	± 0,37
91 Dias	0,89	± 0,07	7,91	± 0,46

FCC 10(S)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,9	± 0,08	5,27	± 0,18
56 Dias	1,48	± 0,05	7,54	± 0,48
91 Dias	2,6	± 0,23	7,26	± 0,63

Argamassas da família "CS"

FCC 0(CS)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,82	± 0,00	3,85	± 0,11
56 Dias	2,65	± 0,10	6,65	± 0,13
91 Dias	2,11	± 0,30	6,29	± 0,31

FCC 2,5(CS)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	1,14	± 0,12	4,27	± 0,35
56 Dias	1,71	± 0,23	6,77	± 0,64
91 Dias	1,91	± 0,48	7,84	± 0,52

FCC 5(CS)				
Dia - Amostra	Rf média (MPa)	Desvio-Padrão	Rc média (MPa)	Desvio-Padrão
28 Dias	0,71	± 0,02	4,34	± 0,26
56 Dias	1,63	± 0,45	7,66	± 0,60
91 Dias	1,79	± 0,28	6,8	± 0,35

<b>FCC 7,5(CS)</b>				
<b>Dia - Amostra</b>	<b>Rf média (MPa)</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Rc média (MPa)</b>	<b>Desvio-Padrão</b>
28 Dias	1,22	± 0,10	4,1	± 0,30
56 Dias	1,32	± 0,05	7,39	± 0,34
91 Dias	2,59	± 0,22	7,06	± 0,28

<b>FCC 10(CS)</b>				
<b>Dia - Amostra</b>	<b>Rf média (MPa)</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Rc média (MPa)</b>	<b>Desvio-Padrão</b>
28 Dias	1,16	± 0,55	5,68	± 0,28
56 Dias	1,11	± 0,18	5,46	± 0,26
91 Dias	1,21	± 0,12	4,93	± 0,22



## D.2 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

### Família das argamassas comerciais

M_S	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,81
91 Dias	0,48

M_CS	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,61
91 Dias	0,71

### Argamassas da família "S"

FCC 0(S)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	1,23
91 Dias	0,66

FCC 2,5(S)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	1,05
91 Dias	0,66

FCC 5(S)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,88
91 Dias	0,57

FCC 7,5(S)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,69
91 Dias	0,57

FCC 10(S)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,62
91 Dias	0,63

Argamassas da família "CS"

FCC 0(CS)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	1,13
91 Dias	0,81

FCC 2,5(CS)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	1,04
91 Dias	0,68

FCC 5(CS)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,84
91 Dias	0,66

FCC 7,5(CS)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,75
91 Dias	0,64

FCC 10(CS)	
Dia - Amostra	C.C. (rectas de ajuste) [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
28 Dias	0,69
91 Dias	0,67



### D.3 – ENSAIO DE SECAGEM

#### Família das argamassas comerciais

M_S			M_CS		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)	Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	19,42	28 Dias	T <sub>inicial</sub>	20,37
	T <sub>final(7dias)</sub>	16,48		T <sub>final(7dias)</sub>	16,64
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	15,62	91 Dias	T <sub>inicial</sub>	16,39
	T <sub>final(10semanas)</sub>	6,70		T <sub>final(10semanas)</sub>	6,49

#### Argamassas da família "S"

FCC 0(S)			FCC 2,5(S)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)	Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	22,54	28 Dias	T <sub>inicial</sub>	15,8
	T <sub>final(7dias)</sub>	20,53		T <sub>final(7dias)</sub>	14,09
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	13,55	91 Dias	T <sub>inicial</sub>	13,15
	T <sub>final(10semanas)</sub>	8,61		T <sub>final(10semanas)</sub>	7,83

FCC 5(S)			FCC 7,5(S)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)	Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	19,07	28 Dias	T <sub>inicial</sub>	20,94
	T <sub>final(7dias)</sub>	12,56		T <sub>final(7dias)</sub>	19,14
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	13,42	91 Dias	T <sub>inicial</sub>	13,27
	T <sub>final(10semanas)</sub>	7,85		T <sub>final(10semanas)</sub>	8,13

FCC 10(S)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	15,52
	T <sub>final(7dias)</sub>	13,42
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	13,84
	T <sub>final(10semanas)</sub>	8,74

Argamassas da família "CS"

FCC 0(CS)			FCC 2,5(CS)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)	Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	18,06	28 Dias	T <sub>inicial</sub>	17,52
	T <sub>final(7dias)</sub>	16,05		T <sub>final(7dias)</sub>	15,78
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	14	91 Dias	T <sub>inicial</sub>	14,03
	T <sub>final(10semanas)</sub>	7,70		T <sub>final(10semanas)</sub>	8,00

FCC 5(CS)			FCC 7,5(CS)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)	Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	17,44	28 Dias	T <sub>inicial</sub>	16,88
	T <sub>final(7dias)</sub>	15,91		T <sub>final(7dias)</sub>	15,26
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	14,37	91 Dias	T <sub>inicial</sub>	14,45
	T <sub>final(10semanas)</sub>	8,46		T <sub>final(10semanas)</sub>	8,49

FCC 10(CS)		
Dia - Amostra	Tempos	Teor em água (%)
28 Dias	T <sub>inicial</sub>	16,85
	T <sub>final(7dias)</sub>	14,81
91 Dias	T <sub>inicial</sub>	14,73
	T <sub>final(10semanas)</sub>	8,36

#### D.4 – ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

##### Argamassas da família “S”

FCC 0(S)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	115,9	1380,1
91 Dias	102,4	1562,5

FCC 2,5(S)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	101,4	1577,39
91 Dias	98,5	1624,37

FCC 5(S)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	100,5	1591,51
91 Dias	98,7	1621,62

FCC 7,5(S)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	96,8	1652,32
91 Dias	93,8	1705,76

FCC 10(S)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	100,6	1590,98
91 Dias	96	1666,67

##### Argamassas da família “CS”

FCC 0(CS)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	112,6	1420,54
91 Dias	102,1	1567,6

FCC 2,5(CS)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	v (m/s)
28 Dias	102,6	1559,45
91 Dias	97	1650,05

FCC 5(CS)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	$v \text{ (m/s)}$
28 Dias	102,5	1560,98
91 Dias	99,7	1604,81

FCC 7,5(CS)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	$v \text{ (m/s)}$
28 Dias	103,9	1539,45
91 Dias	98,3	1627,12

FCC 10(CS)		
Dia - Amostra	$t_{\text{méd}} (\mu\text{s})$	$v \text{ (m/s)}$
28 Dias	106,1	1507,54
91 Dias	99,7	1604,81

## D.5 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

### Família das argamassas comerciais

M_S		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	8,53	0,09
91 Dias	47,12	0,47

M_CS		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	2,63	0,03
91 Dias	58,06	0,58

### Argamassas da família "S"

FCC 0(S)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	11,44	0,03
91 Dias	22,84	0,11

FCC 2,5(S)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	12,91	0,13
91 Dias	25,42	0,25

FCC 5(S)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	28,94	0,29
91 Dias	47,12	0,47

FCC 7,5(S)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	22,5	0,19
91 Dias	39,47	0,23

FCC 10(S)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
28 Dias	21,58	0,22
91 Dias	47,37	0,47

Argamassas da família "CS"

FCC 0(CS)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ m)
28 Dias	5,52	0,06
91 Dias	13,78	0,14

FCC 2,5(CS)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ m)
28 Dias	13,55	0,14
91 Dias	24,59	0,25

FCC 5(CS)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ m)
28 Dias	16,48	0,16
91 Dias	36,44	0,36

FCC 7,5(CS)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ m)
28 Dias	21,13	0,21
91 Dias	36,59	0,37

FCC 10(CS)		
Dia - Amostra	Re ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ m)
28 Dias	36,89	0,37
91 Dias	55,21	0,55

## D.6 – ENSAIO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

### Família das argamassas comerciais

- Cura fora de água

M_S	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	4,46
91 Dias	40,03

M_CS	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	15,65
91 Dias	41,31

- Cura dentro de água

M_S	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	19,52
91 Dias	38,20

M_CS	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	-30,91
91 Dias	26,13

### Argamassas da família "S"

- Cura fora de água

FCC 0(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	-3,57
91 Dias	13,30

FCC 2,5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	14,84
91 Dias	34,35

FCC 5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	19,08
91 Dias	39,21

FCC 7,5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	19,45
91 Dias	44,06

FCC 10(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	35,98
91 Dias	57,74

- Cura dentro de água

FCC 0(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	20,41
91 Dias	40,82

FCC 2,5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	16,05
91 Dias	38,33

FCC 5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	10,78
91 Dias	30,87

FCC 7,5(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	18,15
91 Dias	36,83

FCC 10(S)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	17,03
91 Dias	38,16

## Argamassas da família "CS"

- Cura fora de água

FCC 0(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	20,64
91 Dias	43,92

FCC 2,5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	17,02
91 Dias	41,15

FCC 5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	15,01
91 Dias	37,75

FCC 7,5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	17,68
91 Dias	41,54

FCC 10(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	12,80
91 Dias	33,83

- Cura dentro de água

FCC 0(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	2,50
91 Dias	32,71

FCC 2,5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	20,03
91 Dias	41,28

FCC 5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	16,74
91 Dias	35,97

FCC 7,5(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	19,10
91 Dias	40,62

FCC 10(CS)	
Dia - Amostra	$\epsilon$ (mm/m)
28 Dias	17,12
91 Dias	39,47

Os valores positivos obtidos nas tabelas acima representadas referem-se a retracção e os valores negativos representam a expansão.

Os valores que se encontram a vermelho, não foram considerados na análise dos resultados, uma vez que são díspares dos restantes valores.

### D.7 – ENSAIO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA À TRACÇÃO – “PULL-OFF”

Designação da argamassa	Tensão de Aderência (MPa) - 28 dias	Tensão de Aderência (MPa) - 91 dias
M_S	0,08	0,08
M_CS	0,05	0,06
FCC 0(S)	0,09	Argamassa soltou-se do tijolo
FCC 2,5 (S)	0,1	
FCC 5 (S)	0,07	
FCC 7,5 (S)	0,08	
FCC 10(S)	Soltou-se do tijolo	
FCC 0 (CS)	Argamassa soltou-se do tijolo	Argamassa soltou-se do tijolo
FCC 2,5 (CS)		
FCC 5 (CS)		
FCC 7,5 (CS)		
FCC 10 (CS)		