



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil

**ECO – Argamassas de Cal Hidráulica para
Reabilitação de Edifícios**

MIGUEL SOBRAL DE PAIVA

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na Área de Especialização de Edificações

Orientadores:

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

Dezembro de 2015



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil

ECO – Argamassas de Cal Hidráulica para Reabilitação de Edifícios

MIGUEL SOBRAL DE PAIVA

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na Área de Especialização de Edificações

Orientadores:

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

Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho final de mestrado é o culminar de mais uma importante fase da minha vida, que não teria sido possível sem a ajuda de algumas pessoas a quem deixo o meu agradecimento.

À Professora Dr.^a Carla Maria Costa, orientadora deste trabalho, agradeço todo o apoio, oportunidade e confiança demonstrados para a realização do mesmo. Expresso o meu agradecimento pela orientação, feita com o máximo rigor e seriedade, como pela motivação, incentivo e conhecimentos científicos transmitidos ao longo deste trabalho.

Ao António Fernandes, técnico do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, agradeço todo o apoio durante a realização da campanha experimental, assim como o companheirismo e acolhimento no laboratório.

À Cátia e à Inês, agradeço os conhecimentos transmitidos para que a realização da campanha experimental fosse realizada com sucesso. Agradeço a disponibilidade e espírito de entreajuda sempre demonstrados.

À Eng.^a Ana Cristina Sequeira da Secil Martingança, agradeço a disponibilidade e as informações disponibilizadas, por forma a que conseguisse completar da melhor maneira este trabalho.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), agradeço 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”.

À CIARGA, em especial, ao Eng.^o José Costa, agradeço os materiais disponibilizados, que foram utilizados na realização da campanha experimental, e a sua ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Ao Sr. Pedro Carrasco, técnico do laboratório da CIARGA, agradeço o apoio na execução da campanha experimental.

Agradeço à minha família, em especial, aos meus avós e tia, pelo apoio, incentivo e ajuda sempre demonstrados ao longo da minha vida.

Aos meus pais e à minha irmã deixo o maior dos agradecimentos, não só pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, como também por toda a ajuda, incentivo e amizade sempre demonstrados ao longo das várias fases da minha vida. Agradeço, também, toda a dedicação, por me encaminharem sempre nas alturas mais difíceis e por me terem inculcido sempre um espírito de trabalho e rigor nos vários trabalhos a que me proponho.

Por último, deixo o meu agradecimento ao ISEL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em especial aos seus professores, pelo rigor no trabalho e profissionalismo demonstrados nos últimos cinco anos, que contribuíram para a minha formação em Engenharia Civil.

A todos, um obrigado.

RESUMO

A prática de reabilitação de construções, em geral, e de edifícios, em particular, tem sido progressivamente adotada sobretudo devido: (i) ao aumento de consciência do impacto associado à produção de materiais de construção, bem como da necessidade de otimizar recursos naturais e financeiros; (ii) ao aumento da degradação das infraestruturas; e (iii) à atual situação económica.

As argamassas de reabilitação de edifícios, cujo ligante é a cal hidráulica, têm-se revelado particularmente promissoras. Neste sentido, a presente dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento de novos materiais à base de cal hidráulica, com menor impacto ambiental, substituindo parcialmente a cal hidráulica por um catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico, o FCC. Assim sendo, estudaram-se diversas argamassas com incorporação do resíduo de FCC até 15% em massa do ligante. O presente estudo teve por base de comparação uma argamassa que reproduz uma argamassa comercial para reabilitação de edifícios, fabricada e comercializada pela empresa CIARGA.

As argamassas foram testadas: no estado fresco – massa volúmica e consistência por mesa de espalhamento, e no estado endurecido – velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, resistências mecânicas à flexão e à compressão, profundidade de carbonatação, permeabilidade à água líquida, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência à tração.

A incorporação do resíduo de FCC conduz à perda de fluidez das argamassas. Relativamente aos ensaios realizados no estado endurecido, a incorporação do resíduo de FCC nas argamassas das séries com adjuvantes não tem praticamente influência nas resistências mecânicas das mesmas. Em contrapartida, a incorporação de FCC nas argamassas s/adjuvantes leva ao aumento da resistência à compressão e ao aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. O aumento da incorporação do resíduo de FCC (tipicamente até 10%) conduz à diminuição dos coeficientes de capilaridade em todas as argamassas estudadas.

Nas argamassas das séries com adjuvantes verificou-se que, globalmente, as argamassas estudadas apresentam uma melhoria das suas características face à argamassa que reproduz a comercial e, ao mesmo tempo, cumprem os requisitos definidos na norma NP EN 998-1 [1] e os valores propostos para as argamassas de reabilitação de edifícios antigos [2].

A incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios traduz-se não só na redução das emissões de CO₂ e no consumo de matérias-primas não renováveis, como também na melhoria das características das argamassas face as que são comercializadas atualmente.

PALAVRAS-CHAVE: Cal hidráulica; Argamassas de cal hidráulica; Argamassas de reabilitação de edifícios; Resíduo de FCC; Argamassa comercial.

ABSTRACT

The practice of rehabilitating buildings, in general, and buildings, in particular, has been increasingly adopted mainly due: (i) the increase in awareness of the impact associated to the production of construction materials; as well as the need to optimize natural and financial resources; (ii) the increase of infrastructure deterioration; and (iii) the current economic situation.

Buildings rehabilitation mortars, whose binder is hydraulic lime, have revealed promising. In this sense, this thesis aims to development new materials with hydraulic lime, which have less environmental impact, partially replacing the hydraulic lime by an exhausted catalyst product, the FCC. Therefore, some mortars with FCC were studied, by replacing the hydraulic lime until 15% with FCC. This study, was base on a commercial hydraulic lime mortar, for buildings rehabilitation, manufactured and marketed by CIARGA.

Mortars were studied: in fresh state – bulk density and consistence, and in the hardened state – the propagation velocity of ultrasonic waves, mechanical resistance to bending and compression, the depth of carbonation, the permeability to liquid water, water absorption by capillarity, drying and adhesive strength.

The FCC incorporation leads to a reduction in mortars workability. For tests carried out in the hardened state, the incorporation of FCC in mortars with adjuvants has almost no influence on the mechanical strength of mortars. In turn, when incorporate FCC in mortars without adjuvants, this residue leads to increase mechanical resistance to compression and increase the propagation velocity of ultrasonic waves. Mortars with FCC residue present lower absorption coefficients than those mortars without FCC.

This study showed that, in general, mortars with adjuvants improve their characteristics when compared to mortar that is reproducing the commercial mortar and, at the same time, meet the requirements defined in NP EN 998-1 [1] and meet the values proposed for buildings rehabilitation mortars [2].

The FCC residue incorporation in hydraulic lime mortars is reflected on reducing CO₂ emissions, reducing the consumption of non-renewable raw materials and also improving mortars characteristics, when compared to those mortars that are currently marketed.

KEYWORDS: Hydraulic lime; Hydraulic lime mortars; Buildings rehabilitation mortars; Waste FCC; Commercial mortar.

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1.2 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA	3
1.3 OBJETIVOS DO TFM	4
1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA	5
1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS.....	9
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
2.2 A CAL HIDRÁULICA E A TEMÁTICA AMBIENTAL	13
2.2.1 A INDÚSTRIA DA CAL HIDRÁULICA E O AMBIENTE	13
2.2.2 PRODUÇÃO DE CAL HIDRÁULICA	14
2.2.3 MEDIDAS MITIGADORAS DOS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE CAL HIDRÁULICA.....	19
2.3 ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO	20
2.3.1 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	22
2.3.2 REQUISITOS DAS ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO	29
2.4 SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DA CAL HIDRÁULICA	33
2.4.1 CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA	34
2.4.2 INFLUÊNCIA DE POZOLANAS EM ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA.....	36
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	41
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
3.2 MATERIAIS	46
3.2.1 LIGANTES.....	46
3.2.2 AGREGADOS.....	47
3.2.3 ADJUVANTES.....	49
3.3 DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS	49
3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS	50
3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	52
3.5.1 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA.....	52
3.5.2 ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA	55
3.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	58
3.6.1 MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CONDIÇÕES DE CURA DAS AMOSTRAS	58
3.6.2 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS	64
3.6.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO	67
3.6.4 AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	71
3.6.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	73
3.6.6 ENSAIO DE SECAGEM	76
3.6.7 ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA LIQUÍDA	78
3.6.8 ENSAIO DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF).....	80

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	87
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	89
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	89
4.2.1 CONSISTÊNCIA.....	90
4.2.2 MASSA VOLÚMICA	93
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	95
4.3.1 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS	96
4.3.2 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	105
4.3.3 AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	126
4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	127
4.3.5 SECAGEM	140
4.3.6 PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA	145
4.3.7 ADERÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF).....	146
5. IMPACTO AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DE FCC EM ARGAMASSAS	147
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	149
5.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO ₂	152
5.2.1 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO ₂ NO TRANSPORTE DE MATERIAL	152
5.2.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES ADICIONAIS ASSOCIADAS À INCORPORAÇÃO DE ADIÇÕES.....	156
5.2.3 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO ₂ POR TONELADA DE ARGAMASSA COMERCIAL PRODUZIDA.....	156
5.2.4 EMISSÕES FINAIS DE CO ₂ NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA, COM E SEM INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DE FCC, COMERCIALIZADAS PELA CIARGA	157
5.2.5 ÍNDICE DE DESEMPENHO AMBIENTAL (IDA)	158
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	159
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	161
6.2 ESTADO FRESCO	161
6.3 ESTADO ENDURECIDO.....	162
6.4 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	165
LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
ANEXOS.....	i
ANEXO A – CALENDARIZAÇÕES DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	A.i
ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS	B.i
ANEXO C – FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS - ESTADO FRESCO	C.i
ANEXO D – FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS - ESTADO ENDURECIDO	D.i
ANEXO E – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS (ESTADO ENDURECIDO)	E.i

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Produção anual de cal hidráulica, em Portugal, ao longo dos últimos 3,5 anos, extraído de [11]	15
Quadro 2.2 – Consumo de materiais na produção de cal hidráulica, extraído de [11]	18
Quadro 2.3 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de revestimento para edifícios antigos, adaptado de [2].....	32
Quadro 2.4 - Requisitos estabelecidos para as características de comportamento à água e ao clima das argamassas de revestimento para edifícios antigos, adaptado de [2]	32
Quadro 2.5 - Relação entre as características para as argamassas e as características dos elementos pré-existentes - características mecânicas, adaptado de [63]	33
Quadro 2.6 - Relação entre as características para as argamassas e as características dos elementos pré-existentes, adaptado de [63]	33
Quadro 3.1 - Designação e composição das várias argamassas estudadas na campanha experimental	44
Quadro 3.2 - Campanha experimental de ensaios desenvolvida para as argamassas estudadas.....	46
Quadro 3.3 - Composições químicas do resíduo de FCC, extraído de [76].....	47
Quadro 3.4 - Composição química da areia calcária e normas de ensaio, a partir das quais a areia foi caracterizada.....	48
Quadro 3.5 - Agregados e respetivas quantidades de utilização em cada uma das séries	49
Quadro 3.6 - Equipamentos e utensílios usados no procedimento de mistura das argamassas	51
Quadro 3.7 - Equipamentos e utensílios usados no ensaio de consistência por espalhamento	53
Quadro 3.8 - Equipamentos e utensílios usados no ensaio de massa volúmica.....	55
Quadro 3.9 – Utensílios e produtos usados na moldagem e desmoldagem das amostras prismáticas (40x40x160 mm ³).....	58
Quadro 3.10 - Número de amostras prismáticas realizadas para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e avaliação da profundidade de carbonatação, para cada argamassa em cada idade de hidratação.....	61
Quadro 3.11 – Utensílios utilizados na preparação das amostras cilíndricas de argamassa.....	62
Quadro 3.12 – Número de amostras cilíndricas usadas no ensaio de permeabilidade à água líquida, para cada argamassa em cada idade de hidratação.....	64
Quadro 3.13 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados na realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.....	65
Quadro 3.14 – Equipamentos e utensílios utilizados nos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão	68
Quadro 3.15 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade	73
Quadro 3.16 – Equipamentos e utensílios usados no ensaio de secagem.....	77
Quadro 3.17 – Equipamentos, utensílios e produtos usados no ensaio de permeabilidade à água líquida..	79
Quadro 3.18 – Utensílios e produtos usados na preparação dos tijolos para o ensaio de Pull-off	81
Quadro 3.19 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados na execução do ensaio de Pull-off.....	83

Quadro 4.1 – Consistência, obtida por mesa de espalhamento (mm), das argamassas preparadas com as diferentes composições das séries s/adjuvantes e Hid	92
Quadro 4.2 - Consistência, obtida por mesa de espalhamento (mm), das diferentes composições de argamassas preparadas das séries 0.5Hid e 0Hid	92
Quadro 4.3 - Massa volúmica (kg/m^3) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo	93
Quadro 4.4 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) de propagação das ondas ultrassônicas (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo	98
Quadro 4.5 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo	106
Quadro 4.6 – Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.....	115
Quadro 4.7 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série s/adjuvantes	117
Quadro 4.8 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série Hid.....	119
Quadro 4.9 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série 0.5Hid.....	121
Quadro 4.10 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série 0Hid.....	122
Quadro 4.11 – Coeficiente de ductilidade (R_f/R_c) das argamassas estudadas, para as diferentes idades de hidratação	125
Quadro 4.12 - Relação entre as resistências mecânicas (MPa) - flexão e compressão - ao longo do tempo de hidratação	125
Quadro 4.13 - Coeficientes de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo	130
Quadro 5.1 - Análise do impacto ambiental na produção de uma tonelada de argamassa de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, com incorporação de FCC entre 0 e 15% (em massa do ligante), com incrementos de 5%	151
Quadro 5.2 - Quantidades de FCC e Cal hidráulica para produzir 1500 toneladas e 1 tonelada de argamassa de reabilitação com incorporação, entre 0 e 15%, de FCC.....	153
Quadro 5.3 - Emissões de CO_2 resultantes do transporte do resíduo de FCC e da cal hidráulica para produzir 1 tonelada de argamassa na CIARGA	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Velocidade do crescimento, anual, populacional a nível mundial, extraído de [16].	11
Figura 2.2 – Esquema representativo do processo de produção de cal hidráulica, extraído de [25].	15
Figura 3.1 - Materiais ligantes usados na campanha experimental. a) Cal Hidráulica (HL5); b) Catalisador exausto de FCC.	47
Figura 3.2 - Agregados usados na campanha experimental. a) Areia calcária (0,6-1,2 mm); b) Areia calcária (0,09-0,6 mm); c) "Filler".	48
Figura 3.3 - Esquematisação do procedimento de mistura das argamassas.	52
Figura 3.4 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento. a) Enchimento da 1ª camada de argamassa; b) Compactação da 1ª camada com o pilão de madeira; c) Colocação da 2ª camada de argamassa; d) Regularização da superfície com régua metálica; e) Levantamento vertical do molde tronco-cônico; f) Aspeto final da argamassa após o molde ser retirado; g) Realização de 15 pancadas através da rotação do volante da mesa; h) Medição do diâmetro de espalhamento na direção 1; i) Medição do diâmetro de espalhamento na direção 2.	54
Figura 3.5 – Fases do ensaio da Massa Volúmica. a) Enchimento da 1ª metade do recipiente; b) Compactação da 1ª camada de argamassa; c) Compactação da 2ª camada de argamassa; d) Alisamento da superfície; e) Aspeto final após alisamento; f) Pesagem do recipiente cheio de argamassa.	57
Figura 3.6 - Moldagem das amostras prismáticas (40x40x160 mm ³). a) Colocação do descobrante; b) Colocação da 1ª camada de argamassa; c) Aspeto após colocação da 1ª camada; d) Compactação da 1ª camada de argamassa; e) Colocação da 2ª camada de argamassa; f) Compactação da 2ª camada; g) Regularização da superfície; h) Aspeto final das amostras prismáticas.	59
Figura 3.7 - Condições de cura das amostras. a) Moldes dentro de sacos plásticos na câmara de cura, até ao fim de 7 dias de cura; b) Amostras mantidas em condições de cura até ao dia do ensaio.	60
Figura 3.8 - Fases da preparação das amostras cilíndricas de argamassa para o ensaio de permeabilidade à água líquida. a) Colocação da argamassa no molde de plástico; b) Espalhamento da argamassa; c) Alisamento da superfície da amostra; d) Desmoldagem da amostra.	63
Figura 3.9 - Fases do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. a) Pesagem das amostras; b) Calibração do aparelho; c) Aplicação da vaselina nas extremidades da amostra; d) Medição do tempo que a onda ultrassónica demora a propagar-se entre o transdutor-emissor e o transdutor-receptor.	66
Figura 3.10 – Fases do ensaio da resistência mecânica à flexão. a) Equipamento de ensaio de resistência mecânica; b) Colocação da amostra sobre os apoios metálicos; c) Colocação da amostra para dar início ao ensaio; d) Aplicação de uma carga gradual crescente até se atingir a rotura.	69
Figura 3.11 – Fases do ensaio de resistência mecânica à compressão. a) Posicionamento da amostra no aparelho de ensaio; b) Aplicação da carga gradual e crescente até à rotura da amostra.	71
Figura 3.12 – Fotos da avaliação da profundidade de carbonatação. a) Faces da amostra, em que se deu a rotura, sem áreas de carbonatação; b) Faces da amostra com áreas carbonatadas.	72

Figura 3.13 - Preparação das amostras para o ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Corte das amostras; b) Secagem das amostras na estufa; c) Arrefecimento das amostras no exsiccador; d) Impermeabilização das amostras.....	74
Figura 3.14 – Fases do ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Pesagem inicial das amostras; b) Colocação das amostras nos tabuleiros com água; c) Proteção e condições das amostras entre pesagens.	75
Figura 3.15 - Fases do ensaio de secagem. a) Pesagem das amostras; b) Condições das amostras entre pesagens.	78
Figura 3.16 - Fases do ensaio de permeabilidade à água líquida. a) Fixação do tubo de Karsten com plasticina; b) Medição da altura de água ao fim do 2º min.	80
Figura 3.17 - Fases da preparação dos tijolos para o ensaio de <i>Pull-off</i> . a) Colocação do tijolo no molde metálico; b) Aplicação da argamassa no tijolo; c) Espalhamento da argamassa pelo tijolo; d) Alisamento da superfície da argamassa; e) Aspeto afinal da argamassa; f) Tijolo retirado do molde; g) Colocação do tijolo na câmara de cura.	82
Figura 3.18 - Fases do ensaio de <i>pull-off</i> . a) Corte da argamassa com as dimensões das peças metálicas; b) Colagem das peças metálicas com resina epóxida; c) Posicionamento do tijolo no equipamento de ensaio; d) Arrancamento da peça metálica e registo do respetivo valor.	84
Figura 3.19 - Padrões de roturas que podem ocorrer no ensaio de <i>pull-off</i> . a) Rotura coesiva da argamassa; b) Rotura coesiva do suporte; c) Rotura adesiva entre a argamassa e o suporte; 1 – Peça metálica; 2 – Cola epóxida ; 3 – Argamassa de revestimento; 4 – Suporte de tijolo; adaptado de [93].....	85
Figura 4.1 - Representação gráfica das quantidades de água usadas para cada argamassa preparada com as diferentes composições em estudo.	90
Figura 4.2 - Representação das quantidades de água de cada série de argamassa e respetivas retas de regressão linear.....	91
Figura 4.3 - Massa volúmica (kg/m^3) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.	93
Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica e a quantidade de água usadas nas argamassas estudadas. ..	95
Figura 4.5 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) de propagação de ondas ultrassónicas das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa as barras da esquerda, do centro e da direita representam a velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).	97
Figura 4.6 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas da série s/adjuvantes.	100
Figura 4.7 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas da série Hid.	101
Figura 4.8 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas da série 0.5Hid.	102
Figura 4.9 - Velocidade média ($\text{mm}/\mu\text{s}$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas da série 0Hid.	103

Figura 4.10 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão média de rotura à flexão aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).	106
Figura 4.11 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série s/adjuvantes.	107
Figura 4.12 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série Hid.	109
Figura 4.13 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0.5Hid.	110
Figura 4.14 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0Hid.	111
Figura 4.15 – Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão média de rotura à compressão aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).	115
Figura 4.16 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série s/adjuvantes.	116
Figura 4.17 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série Hid.	118
Figura 4.18 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0.5Hid.	120
Figura 4.19 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0Hid.	121
Figura 4.20 - Coeficientes de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda representam os valores de coeficientes de capilaridade aos 28 dias de hidratação e as da direita os valores de coeficientes de capilaridade aos 91 dias de hidratação).	129
Figura 4.21 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série s/adjuvantes, aos 28 dias de hidratação.	132
Figura 4.22 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série s/adjuvantes, aos 91 dias de hidratação.	133
Figura 4.23 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série Hid, aos 28 dias de hidratação.	133
Figura 4.24 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série Hid, aos 91 dias de hidratação.	134
Figura 4.25 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0.5Hid, aos 28 dias de hidratação.	135
Figura 4.26 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0.5Hid, aos 91 dias de hidratação.	135

Figura 4.27 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0Hid, aos 28 dias de hidratação.	136
Figura 4.28 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0Hid, aos 91 dias de hidratação.	136
Figura 4.29 – Relação entre a tensão de rotura à compressão (MPa) e o coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), aos 28 dias de hidratação, das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.....	139
Figura 4.30 - Relação entre a tensão de rotura à compressão (MPa) e o coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), aos 91 dias de hidratação, das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.....	140
Figura 4.31. - Teor em água das argamassas da série s/adjuvantes, aos 28 dias de hidratação.....	141
Figura 4.32 - Teor em água das argamassas da série Hid, aos 28 dias de hidratação.....	142
Figura 4.33 - Teor em água das argamassas da série 0.5Hid, aos 28 dias de hidratação.....	142
Figura 4.34 - Teor em água das argamassas da série 0Hid, aos 28 dias de hidratação.....	142
Figura 4.35 - Teor em água das argamassas da série s/adjuvantes, aos 91 dias de hidratação.....	143
Figura 4.36 - Teor em água das argamassas da série Hid, aos 91 dias de hidratação.....	144
Figura 4.37 - Teor em água das argamassas da série 0.5Hid, aos 91 dias de hidratação.....	144
Figura 4.38 - Teor em água das argamassas da série 0Hid, aos 91 dias de hidratação.....	144
Figura 5.1 - Representação esquemática dos processos envolvidos na produção de argamassas de cal hidráulica, com resíduo de FCC, para reabilitação de edifícios.....	150

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALFABETO LATINO

Símbolo	Designação	Unidade
A	Área	mm ² /m ²
b	Largura	mm
C	Coefficiente de absorção de água por capilaridade	Kg/m ² .min ^{1/2}
d	Espessura	mm
di	Diâmetro de espalhamento	mm
dm	Diâmetro médio	mm
E	Módulo de deformação	MPa
F	Força	N
f	Tensão	MPa ou N/mm ²
Hid	Hidrófugo	-
IAr	Introdutor de ar	-
L/l	Distância	mm
m/M	Massa	kg/g
MR	Modificador reológico	-
N	Número de amostras ensaiadas	-
Pz	Pozolana	-
R	Resistência	MPa ou N/mm ²
t	Tempo	μs; min
V	Volume; velocidade	m ³ ; mm/μs
W	Teor de água	%

ALFABETO GREGO

Símbolo	Designação	Unidade
ρ	Massa volúmica	kg/m ³

ÍNDICES INFERIORES

Símbolo	Designação
a	Arrancamento
c	Compressão
f	Flexão
i	Instante
t	Tração

NOTAÇÃO DOS COMPOSTOS QUÍMICOS

Fórmula Química	Designação
$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Argila
Al_2O_3	Alumina
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio
CO_2	Dióxido de Carbono
C - S - H	Silicatos de Cálcio Hidratados
C_2S	Silicatos Bicálcicos
C_2AS	Silicoaluminatos Bicálcicos
C_3S	Silicatos Tricálcicos
C_3A	Aluminatos Tricálcicos
C_4AF	Ferroaluminatos Tetracálcicos
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
H_2O	Água
K_2O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
Mn_2O	Óxido de Manganês
Na_2O	Óxido de Sódio
N_2O	Óxido Nitroso
P_2O_5	Pentóxido de Fósforo

Fórmula Química	Designação
SF ₆	Hexafluoreto de Cálcio
SiO ₂	Sílica
SO ₃	Óxido Sulfúrico
SrO	Óxido de Estrôncio
Ti ₂ O ₃	Tistarite

SIGLAS

Siglas	Designação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CIARGA	CIARGA, Argamassas Secas, S.A. – Grupo CIMPOR
EN	Norma Europeia (em inglês, " <i>European Standard</i> ")
FCC	Catalisador Catalítico em Leite Fluidizado (em inglês, " <i>Fluid Catalytic Cracking</i> ")
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
HL	Cal Hidráulica (em inglês, " <i>Hydraulic Lime</i> ")
IA	Índice de Atividade da Pozolana
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
NBR	Norma Brasileira
NH	Cal hidráulica (em inglês, " <i>Hydraulic Lime</i> ")
NHL	Cal Hidráulica Natural (em inglês, " <i>Natural Hydraulic Lime</i> ")
NP	Norma Portuguesa
PFCs	Perfluorcarbonetos
TFM	Trabalho Final de Mestrado

1. INTRODUÇÃO

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente documento apresenta o trabalho elaborado e desenvolvido durante o período compreendido entre Novembro de 2014 e Dezembro de 2015, sob a orientação da Professora Carla Costa do ISEL e coorientação do Eng.º José Costa da empresa CIARGA. Este documento visa a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de especialização de Edificações.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto 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. Este projeto tem como objetivo final o desenvolvimento de novos materiais à base de cimento através da incorporação de um resíduo gerado pela refinaria de Sines, o FCC (em inglês – “*Fluid Catalytic Cracking*”).

1.2 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O sector da construção é um dos maiores consumidores de recursos naturais não renováveis e um dos que mais emite gases poluentes para a atmosfera. Em particular, neste sector de atividade, a indústria produtora dos ligantes hidráulicos (como o cimento e a cal hidráulica) é uma das grandes responsáveis pela emissão de CO₂ para a atmosfera. Em concreto, cerca de 5% da emissão anual de dióxido de carbono, produzido em todo o planeta, é gerado pela produção de cimento [3, 4, 5, 6, 7]. A produção de cal hidráulica tem, também, impactos a nível ambiental, embora menos expressivos que o cimento, por ser produzida a temperaturas mais baixas. Estes impactos ambientais são causados pela emissão de CO₂, libertado durante o processo de produção da cal, e pelo consumo de matérias-primas, que são materiais não renováveis, como o calcário e a argila [8, 9, 10]. Por cada tonelada de cal hidráulica produzida são emitidas 540 kg de CO₂ para a atmosfera [11].

Neste contexto, considerou-se a possibilidade de substituir parcialmente a cal hidráulica, presente na constituição de argamassas para reabilitação de edifícios, por um resíduo gerado na indústria petrolífera. Em concreto, este resíduo é o catalisador exausto gerado na unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC). Este

resíduo tem potencial de utilização como substituto da cal hidráulica, uma vez que contém teores significativos de aluminossilicatos que lhe confere, potencialmente, propriedades pozolânicas [12, 13, 14, 15].

1.3 OBJETIVOS DO TFM

Esta dissertação tem por objetivo contribuir para o desenvolvimento de novas argamassas para reabilitação de edifícios, que visem a diminuição da dependência do consumo de cal hidráulica. A presente dissertação tem como base a continuação de um trabalho experimental realizado anteriormente. Trabalho esse que teve como objetivo avaliar a incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica, sem adjuvantes na sua constituição, para reabilitação de edifícios, comparando-as com uma argamassa comercial [14].

Por forma a dar continuidade ao trabalho experimental já realizado, considerou-se importante avaliar as características dos materiais quando incorporados com adjuvantes. A presença de adjuvantes influencia as propriedades e o comportamento dos materiais em que são incorporados. Neste sentido, propõe-se, também, neste trabalho incorporar, para além do resíduo de FCC, adjuvantes nas várias composições de argamassas, com o intuito de melhorar as propriedades das argamassas para além daquelas já conferidas pela presença do FCC [14]. Pretende-se assim, quantificar a viabilidade e utilização do resíduo de FCC em argamassas, quando usado em simultâneo com adjuvantes, nomeadamente, a sua adequabilidade perante parâmetros estabelecidos relativamente à reabilitação. Estes adjuvantes são os usados em argamassas de reabilitação comerciais, que são usadas como referência neste trabalho.

Assim sendo, os objetivos deste trabalho final de mestrado (TFM) são:

1. Avaliar o efeito da incorporação de resíduo de FCC (e dos adjuvantes) nas propriedades de argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, tanto no estado fresco como no endurecido;
2. Analisar os valores e propriedades das argamassas com incorporação de resíduo de FCC (e de adjuvantes) comparando com os requisitos das normas

européias em vigor e com as recomendações encontradas na literatura para argamassas de reabilitação de edifícios antigos [2];

3. Comparar as propriedades das argamassas, com incorporação do resíduo de FCC (e de adjuvantes), com argamassas comerciais de cal hidráulica para reabilitação de edifícios.

1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Este subcapítulo apresenta as metodologias e técnicas adotadas para a realização da presente investigação, com os objetivos já definidos no subcapítulo 1.3.

Primeiramente, procedeu-se à recolha de informação científica através de fontes nacionais e internacionais, por forma a obter um esclarecimento sobre a temática em questão e sobre os trabalhos científicos realizados até à data, com interesse para este trabalho final de mestrado. Esta informação serviu de base para a elaboração do capítulo 2 desta dissertação (Síntese de conhecimentos).

Na fase seguinte, e com base na informação obtida, definiu-se o plano de ensaios de modo a calendarizar todas as atividades necessárias, a realizar no laboratório, com o objetivo de garantir o cumprimento, dentro dos prazos, da realização desta dissertação.

Após a elaboração do plano de ensaios, foram determinadas as quantidades de materiais necessárias à realização das atividades, garantindo assim o aprovisionamento dos materiais para a realização das mesmas, definidas no plano de ensaios.

De seguida, deu-se início à realização das atividades experimentais. A campanha experimental desenvolveu-se, essencialmente, em 2 fases:

- i. Determinação das quantidades de água necessárias para que as argamassas com diferentes composições tivessem a mesma consistência (Secção 3.5.1 e 4.2.1);

- ii. Preparação de todas as argamassas, com as quais se determinaram as propriedades das mesmas através de ensaios no estado fresco (ensaio de consistência por espalhamento e ensaio da massa volúmica) e no estado endurecido (que contempla os ensaios: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, resistência mecânica à flexão e à compressão, avaliação da profundidade de carbonatação, permeabilidade à água líquida, absorção de água por capilaridade, secagem e o ensaio de aderência à tração).

Concluída a campanha experimental, deu-se início ao tratamento, análise e discussão dos resultados experimentais das diferentes argamassas, com incorporação de FCC.

O trabalho de investigação realizado resultou na redação da presente dissertação, que se encontra devidamente organizada em texto, figuras e quadros relativamente: às informações obtidas, aos dados sobre a campanha experimental, aos resultados dos ensaios, às análises, às discussões e às conclusões.

1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, cuja informação se apresenta, resumidamente, de seguida.

No primeiro e presente capítulo apresenta-se a contextualização do tema em estudo, abordam-se os objetivos do trabalho, descreve-se a metodologia adotada, a forma como a informação se encontra organizada e distribuída nas diferentes partes do trabalho.

O segundo capítulo, por sua vez, apresenta a síntese de conhecimentos resultante de uma pesquisa bibliográfica alargada sobre os temas de maior relevância para este trabalho. É feito um enquadramento da questão problemática, que esteve na origem deste trabalho, apresentando os impactos ambientais associados à produção de cal hidráulica e possíveis medidas de mitigação desses impactos. Apresenta-se a síntese de conhecimentos sobre a cal hidráulica (ligante que se usa nas argamassas objeto de estudo) e sobre o resíduo petroquímico – FCC – utilizado como substituto parcial da

cal hidráulica. Neste capítulo, aborda-se, também, as argamassas de reabilitação (argamassas em estudo neste trabalho), nomeadamente, os seus constituintes e valores propostos das suas características para reabilitação de edifícios antigos.

No terceiro capítulo apresenta-se a campanha experimental realizada ao longo deste trabalho, na qual se expõem o plano de ensaios, os materiais usados, o procedimento de mistura adotado, os ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido e respetivos procedimentos adotados.

Segue-se o capítulo quatro, no qual se apresentam e se faz a análise e discussão de todos os resultados obtidos durante a realização da campanha experimental. Neste capítulo todas as argamassas são caracterizadas no que respeita às suas propriedades mecânicas e físicas. A informação encontra-se exposta em quadros, figuras e em texto, por forma a garantir uma melhor visualização e compreensão dos resultados obtidos. É feita a comparação dos resultados obtidos com as diferentes argamassas, com a argamassa que reproduz a argamassa comercial e com os valores das características propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos.

O capítulo cinco apresenta as diferenças nas emissões de CO₂ na produção de uma argamassa comercial de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, com e sem a incorporação do resíduo de FCC, na empresa CIARGA.

Por fim, apresenta-se o capítulo seis que expõe as conclusões obtidas da análise e discussão dos resultados e se enunciam as contribuições do trabalho realizado, comparando com os objetivos definidos inicialmente. Neste capítulo são também apresentadas propostas de trabalhos futuros, tendo em vista o seu desenvolvimento neste âmbito.

2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS

“The exclusive use of Portland Cement mortar can only indicate ignorance of the qualities of many natural hydraulic limes, and this want of knowledge is dearly paid for”

“A utilização exclusiva de argamassas de cimentos Portland apenas pode significar ignorância sobre as qualidades de muitas cals hidráulicas naturais, e esta miséria de conhecimento é escassamente rentável”

Charles Graham Smith, Stud Inst, CE 'Engineering Papers' 1895

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo das últimas décadas tem-se verificado um decréscimo na velocidade do aumento da população a nível mundial, como ilustra a Figura 2.1. No entanto, apesar desse decréscimo, a população mundial continua a aumentar a cada ano e, no último século, verificou-se um grande aumento populacional a nível mundial, sobretudo após o fim da II Guerra Mundial [16, 17].

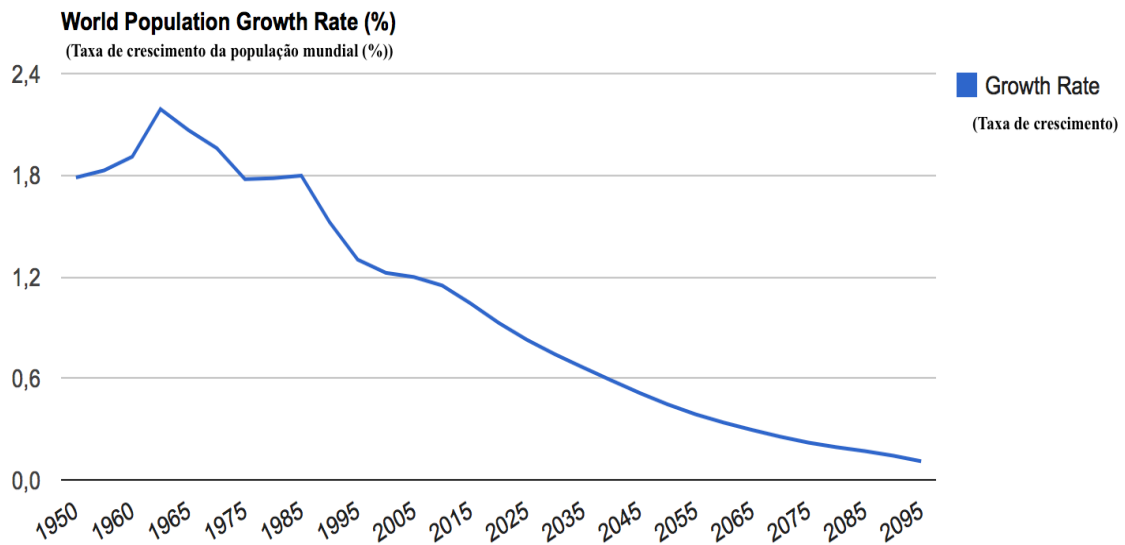


Figura 2.1 - Velocidade do crescimento, anual, populacional a nível mundial, extraído de [16].

Em consequência deste aumento populacional, a humanidade, ano após ano, terá a necessidade de continuar a explorar e a consumir os recursos naturais existentes no nosso planeta. A presença e a atividade humana no nosso planeta tem causado vários estragos na fauna e flora: (i) destruição e poluição dos rios; (ii) aumento do consumo de água; (iii) aumento da área cultivada e, conseqüente, aumento de fertilizantes; e (iv) perda de florestas. Houve, também, um aumento no consumo dos combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural [18].

Com o aumento da atividade humana no planeta, ao longo dos últimos anos, tem-se, também, vindo a verificar um rápido aumento na atmosfera de gases de efeito de estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), que resultam essencialmente das mudanças de uso das terras e da refinação dos combustíveis fósseis, que provocam alterações a nível climático [17].

De acordo com vários cientistas, a principal causa do aquecimento global está relacionada com o aumento da emissão e acumulação na atmosfera de gases de efeito de estufa (GEE), resultantes da atividade humana [19]. Os gases que contribuem para este efeito de estufa, estabelecidos no protocolo de Quioto, são essencialmente: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) [19, 20].

Com vista à redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera é necessário promover um desenvolvimento sustentável. As preocupações com o desenvolvimento sustentável, associadas à desvantajosa situação económica (em alguns países europeus) e à degradação progressiva que se vai assistindo nas infraestruturas (urbanas e rurais), nos edifícios e nos espaços exteriores das cidades, têm promovido a adoção de uma postura de reabilitação. Em Portugal, o segmento da reabilitação de edifícios representa cerca de 26% da atividade do sector da construção. Relativamente à média europeia, este mesmo segmento representa 34,9% da atividade do sector da construção [21].

A reabilitação conduz a menores consumos de energia na aplicação de produtos de construção, reduz as emissões de CO_2 , diminui o consumo de matérias-primas não renováveis, limita a quantidade de demolições e de produtos de demolição a remover, e reduz desta forma os custos associados às intervenções nos edifícios.

Por outro lado, o aumento da atividade de reabilitação conduz ao aumento do consumo de produtos de reabilitação (como argamassas de reabilitação), que muitas vezes incluem na sua constituição cal hidráulica. As argamassas de cal hidráulica são produtos muito utilizados em reabilitação por conferirem bons resultados e por serem compatíveis com os materiais presentes em edifícios antigos e em edifícios modernos [22].

2.2 A CAL HIDRÁULICA E A TEMÁTICA AMBIENTAL

2.2.1 A INDÚSTRIA DA CAL HIDRÁULICA E O AMBIENTE

Esta secção faz referência aos impactos ambientais associados à produção de cal hidráulica. Estes impactos serão, posteriormente, explicados com mais detalhe na secção 2.2.2. No entanto, é importante referir que devido à escassez de informação científica sobre as questões ambientais relacionadas com a produção de cal hidráulica, muitas vezes será necessário extrapolar a partir da informação científica existente sobre a indústria do cimento para a indústria da cal hidráulica.

A produção de cal hidráulica diferencia-se da do cimento, principalmente, por ser produzida a temperaturas entre os 850°C e os 1250°C, enquanto que o cimento é produzido a temperaturas superiores a 1500°C. Isto deve-se à necessidade de se formar maior quantidade de silicatos tricálcicos (C_3S) na composição do cimento, que têm maior teor de cálcio na sua composição [23, 24, 25, 26]. Assim sendo, a produção de cimento exige maior quantidade de calcário ($CaCO_3$) como matéria-prima, em relação à produção de cal hidráulica, libertando mais CO_2 para a atmosfera durante o seu processo de ativação térmica. Adicionalmente, pelo facto do C_3S exigir temperaturas mais elevadas para se formar, é necessário recorrer a temperaturas mais elevadas na formação de cimento, em relação à formação de cal hidráulica. Consequentemente, os consumos energéticos e de combustíveis fósseis são superiores na produção de cimento, em relação à cal hidráulica. Posto isto, e apesar dos impactos ambientais produzidos pela indústria da cal hidráulica não serem tão expressivos para o ambiente como os do cimento, é possível extrapolar os impactos ambientais de uma indústria para a outra, uma vez que os processos de fabrico são muito idênticos e por se estar a tratar de dois ligantes hidráulicos.

Como já foi referido no subcapítulo 2.1, o aumento da população mundial e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e de outras infraestruturas, traduzem-se num maior consumo de matérias-primas não renováveis, aumento das emissões de CO_2 , assim como na produção de resíduos de construção.

O setor da construção é o setor que mais consome matérias-primas em todo o planeta, correspondendo cerca de 60% das matérias-primas extraídas do planeta [27, 28].

Estima-se que este setor consuma cerca de 3000 megatoneladas por ano de matérias-primas. Para além deste facto, este setor é responsável por cerca de 30% das emissões de carbono para a atmosfera todos os anos [28].

A indústria produtora da cal hidráulica, inserida no setor da construção, tem um impacto ambiental significativo, uma vez que consome grandes quantidades de recursos naturais não renováveis (como o calcário e a argila), combustíveis e eletricidade [29]. Outro fator preponderante no impacto ambiental desta indústria são as emissões de gases para a atmosfera, especialmente de CO₂, durante o processo de produção de cal hidráulica. Estes impactos ambientais serão abordados mais detalhadamente na secção 2.2.2.

Com o aumento da atividade de reabilitação prevê-se que haja um maior consumo de cal hidráulica e, conseqüentemente, maior consumo de matérias-primas, uma vez que a cal hidráulica é obtida de rochas constituídas por uma mistura de calcário com um teor significativo de argila (entre 6,5 e 20%) [8, 25, 26].

2.2.2 PRODUÇÃO DE CAL HIDRÁULICA

Esta secção descreve o processo de produção da cal hidráulica, salientando as principais fontes dos seus impactos ambientais (referidos na secção 2.2.1). Deste modo, pretende-se apresentar a temática relacionada com os problemas ambientais associados a este tipo de indústria e, em particular, evidenciar o impacto científico, tecnológico e ambiental para o qual se pretende contribuir com este trabalho (substituição parcial de cal hidráulica por um resíduo da indústria petrolífera).

Em Portugal, tem-se verificado um aumento do consumo e, conseqüentemente, da produção de cal hidráulica nos últimos 3 anos [11]. O Quadro 2.1 apresenta os valores de produção anual de cal hidráulica, em Portugal, ao longo dos últimos três anos e meio.

Quadro 2.1 – Produção anual de cal hidráulica, em Portugal, ao longo dos últimos 3,5 anos, extraído de [11]

PRODUÇÃO Valor Anual (t)	HL5*	NHL5	NHL3,5	NHL2	TOTAL
2012	11 906	1 264	2 261	0	15 431
2013	18 069	2 383	2 673	0	23 125
2014	17 556	3 019	3 413	301	24 289
2015 (Jan-Ago)	13 918	2 195	2 008	107	18 228

*A cal hidráulica HL5 é a cal usada neste estudo. Nota: NHL – cal hidráulica natural; HL – cal hidráulica.

De seguida, iniciar-se-á a explicação detalhada do processo de produção de cal hidráulica.

A Figura 2.2 representa um esquema geral de produção de cal hidráulica, relativo ao qual se apresenta, de seguida, uma descrição resumida do atual processo de produção [8, 11, 25, 26, 30, 31, 32].

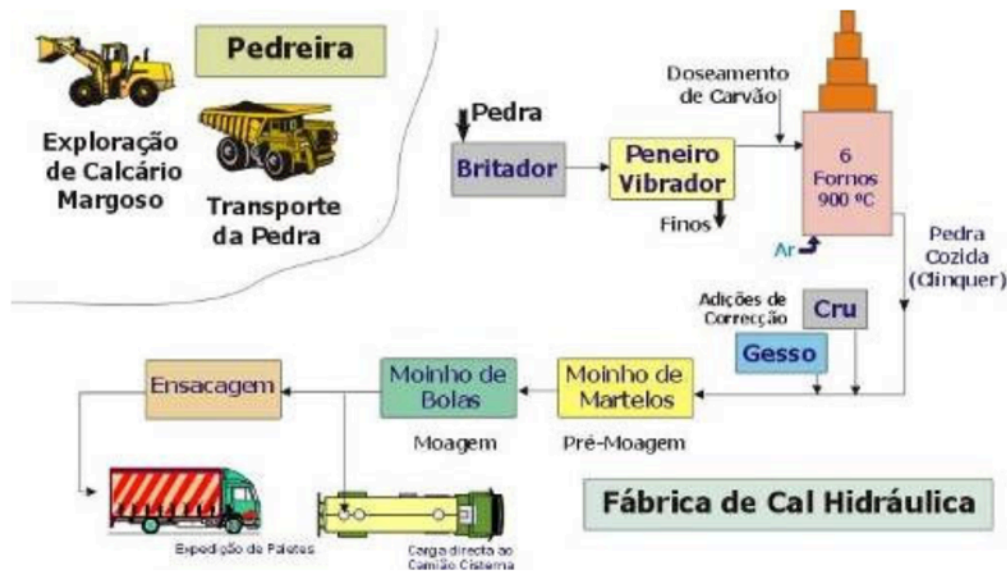


Figura 2.2 – Esquema representativo do processo de produção de cal hidráulica, extraído de [25].

1º. ESCAVAÇÃO/EXTRAÇÃO: como referido, na secção 2.2.1, as matérias-primas usadas na produção de cal hidráulica são rochas calcárias com significativa quantidade de argila (designadas de calcário margoso – Quadro 2.2), cuja exploração, geralmente, é feita a céu aberto com recurso a explosivos ou a meios mecânicos. Após a escavação e extração recorrem-se a camiões basculantes por

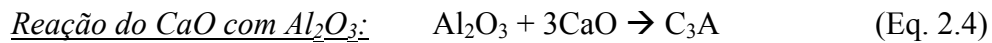
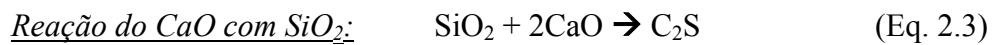
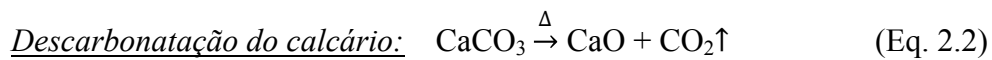
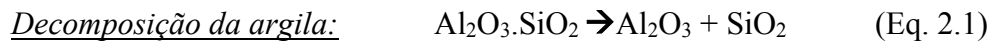
forma a fazer o transporte da matéria-prima extraída da pedreira até à fábrica (“Pedreira”, Figura 2.2) (as quantidades de materiais consumidos na produção de cal hidráulica são apresentadas no Quadro 2.2);

2º. BRITAGEM/PENEIRAÇÃO: após a chegada à fábrica, recorre-se ao uso de britadores e peneiros por forma a garantir um fornecimento contínuo das matérias-primas com uma dimensão de partícula constante (entre os 20 e 80 mm) e eliminar os finos que possam existir (“Britador” e “Peneiro Vibrador”, Figura 2.2);

3º. FORNO: no forno ocorre, por ativação térmica entre os 850 e 1250 °C, um conjunto complexo de reações químicas, simultâneas e sucessivas, que conduzem à transformação das matérias-primas – calcário e argila – nos produtos que constituem a cal hidráulica (“6 Fornos 900°C”, Figura 2.2). A argila pode estar presente na constituição natural do calcário (calcário margoso) ou ser adicionada no forno.

O processo de ativação térmica, que ocorre no forno, engloba várias etapas:

- **Decomposição da argila** ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), que ocorre entre os 400°C e 600°C, dando origem à alumina (Al_2O_3) e à sílica (SiO_2) (Eq. 2.1).
- **Descarbonatação do calcário** – a descarbonatação ou calcinação do calcário (CaCO_3) ocorre a 900°C, formando-se óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), que é libertado para a atmosfera (Eq. 2.2).
- **Reação do CaO com SiO_2 e Al_2O_3** – os dois compostos resultantes da decomposição da argila, SiO_2 e Al_2O_3 , reagem com CaO , entre os 850°C e os 1250°C, dando origem, principalmente, a silicatos bicálcicos (C_2S) (Eq. 2.3) e a aluminatos tricálcicos (C_3A) (Eq. 2.4). Nesta etapa são, também, formados outros compostos, embora em quantidades mais reduzidas, tais como, silicatos tricálcicos (C_3S), ferroaluminatos tetracálcicos (C_4AF), silicoaluminatos bicálcicos (C_2AS).



4º.SAÍDA DO FORNO: a cal retirada do forno deve ser “extinta”, através da reação do CaO com a água (H₂O), com o objetivo de eliminar a cal viva e de desencadear a pulverização de toda a cal hidráulica. Esta reação dá origem à formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) (Eq. 2.5), também designado por cal extinta/apagada. No entanto, uma percentagem (superior a 3% e, geralmente, inferior a 10%) de CaO não reage, permanecendo na sua constituição com a designação de “CaO livre”.



Esta reação leva à expansão do material à saída do forno, uma vez que a densidade do Ca(OH)₂ é cerca de metade da do CaO. No processo de extinção da cal é essencial que se adicione água na quantidade suficiente para hidratar a cal viva, mas sem que fique água disponível para reagir com os silicatos e aluminatos para inviabilizar a hidratação destes compostos nesta fase.

Antes da realização do processo de extinção da cal, a pedra cozida (que sai do forno) passa por um moinho de martelos que lhe reduz a granulometria máxima para cerca de 40 mm (“Moinho de martelos”, Figura 2.2).

5º.MOAGEM: antes do processo de moagem, por vezes, são feitas adições de gesso, com o objetivo de regular a presa que ocorre posteriormente no processo de endurecimento do material. O gesso funciona como regulador de presa uma vez que retarda a hidratação do C₃A, reduzindo a probabilidade de ocorrerem fenómenos de presa instantânea e, também, porque acelera a hidratação dos silicatos de cálcio (“Adições de correção”, Figura 2.2). No caso das cais hidráulicas naturais não é realizada nenhuma adição e a cal extinta é encaminhada

para o moinho de bolas onde se obtém a granulometria final da cal (“Moinho de bolas”, Figura 2.2).

6º. EXPEDIÇÃO: após o processo de moagem, a cal hidráulica pode ser ensacada para mais tarde se fazer a expedição ou sair diretamente do processo de moagem para camiões cisternas, que entregam diretamente ao cliente (“Ensacagem” e “Carga direta ao camião cisterna”, Figura 2.2).

De seguida, salientam-se os principais impactos ambientais associados à produção de cal hidráulica:

- i. *Consumo de recursos naturais não renováveis:* como já foi referido na secção 2.2.1, as principais matérias-primas consumidas no fabrico de cal hidráulica são a argila e o calcário [8, 25, 26]. O Quadro 2.2 apresenta o consumo dos materiais (matéria-prima: calcário margoso; e coque) na produção de cal hidráulica;

Quadro 2.2 – Consumo de materiais na produção de cal hidráulica, extraído de [11]

CONSUMO DE MATERIAIS	HL5*	NHL5	NHL3,5	NHL2	Total
t calcário margoso/t de cal hidráulica	1,25	1,25	1,27	1,38	5,15
kg de coque/t de cal hidráulica	59	67	79	84	289

*A cal hidráulica HL5 é a cal usada neste estudo. **Nota:** o coque é o material usado como combustível nos fornos de cal.

- ii. *Impactos associados à extração das matérias-primas:* durante a fase de exploração/extração de uma pedreira existem vários impactos que resultam do rebenamento de explosivos, da produção de resíduos, da alteração da paisagem, do transporte de materiais e de derrames acidentais de substâncias tóxicas, que podem dar origem à emissão de poeiras, poluição das águas subterrâneas e destruição de *habitats*, com consequências negativas para os ecossistemas [33];
- iii. *Emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera:* o CO₂ que é emitido tem duas origens diferentes. Por um lado, e a fonte de emissão de CO₂ mais

significativa, é devido à descarbonatação do CaCO_3 (Eq. 2.2) (já referido na presente secção) e, por outro, o CO_2 emitido é resultante da queima de combustíveis para se produzir energia (calor), da energia elétrica e dos transportes [8, 34, 35, 36]. Como já foi referido no subcapítulo 1.2, são emitidas 540 kg de CO_2 por tonelada de cal hidráulica produzida [11];

- iv. Consumo de combustíveis e eletricidade associados à exploração das pedreiras, ao fabrico da cal e ao transporte dos materiais. O consumo energético na produção de cal hidráulica é de 40 kWh (energia elétrica) por tonelada de cal produzida e de 500 kcal (energia térmica) por tonelada de cal produzida [11].

2.2.3 MEDIDAS MITIGADORAS DOS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE CAL HIDRÁULICA

Nesta secção descrevem-se as possíveis medidas de mitigação dos impactos ambientais associados à produção de cal hidráulica referidos na secção 2.2.2. Como já foi referido na secção 2.2.1, devido à falta de informação disponível, por vezes, é necessário extrapolar os conteúdos relacionados com os impactos ambientais na produção do cimento para a produção da cal hidráulica. As medidas apresentadas foram baseadas em medidas adotadas para reduzir o impacto ambiental na produção de cimento.

Assim sendo, algumas das medidas mitigadoras possíveis de reduzir os impactos ambientais, associados à produção de cal hidráulica, passam por [37, 38]:

- i. Utilizar “Eco combustíveis” com menor impacto ambiental, obtidos a partir de resíduos sólidos urbanos (como os óleos usados e resíduos de borracha) e de combustíveis com elevadas frações de biomassa. Desta forma, para além da diminuição da dependência de combustíveis tradicionais e da inerente variabilidade dos preços, consegue-se reduzir as emissões de CO_2 , que são mais baixas em “Eco combustíveis” do que nos combustíveis fósseis;
- ii. Na exploração de pedreiras, deve-se recorrer a meios de exploração menos agressivos para o ambiente e fazer reabilitação ambiental de pedreiras. A

reabilitação ambiental das pedreiras consiste no estabelecimento de condições, físicas e naturais, que levem ao aumento da biodiversidade e que tornem possível a introdução de espécies novas, após a exploração das mesmas;

- iii. Substituir parcialmente matérias-primas não renováveis por resíduos ou subprodutos provenientes de outras indústrias, o que leva a uma diminuição da exploração de recursos naturais não renováveis e das emissões de CO₂;
- iv. Incorporar resíduos/subprodutos provenientes de outras indústrias em produtos já produzidos industrialmente, como argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios. Esta medida visa usar menor quantidade do produto final, nomeadamente do ligante da argamassa, não alterando o seu processo de fabrico, substituindo-o, parcialmente, por outro material.

É relativamente ao último tópico (iv) que se irá desenvolver este trabalho, que pretende avaliar o efeito de substituição parcial da cal hidráulica por um resíduo da refinaria de Sines, o FCC, numa argamassa que já é comercializada pela empresa CIARGA. O trabalho desenvolvido tem como objetivo final a formulação de uma argamassa para reabilitação de edifícios.

2.3 ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO

As argamassas de reabilitação são produtos de construção que resultam de uma mistura de um ou mais ligantes, geralmente, inorgânicos (por exemplo, cal hidráulica e cal aérea), agregados, adjuvantes e/ou adições. Os adjuvantes são adicionados à argamassa, com o objetivo de melhorar determinadas características das argamassas [39, 40, 41, 42].

A utilização de argamassas de reabilitação de edifícios tem vindo a ganhar particular interesse por parte da comunidade científica, uma vez que estas argamassas conseguem substituir, potencialmente, as argamassas antigas degradadas e serem compatíveis física e quimicamente com os elementos de construção pré-existentes, sem ser preciso recorrer a construção nova [43]. Este interesse tem-se traduzido em

vários trabalhos de investigação que, por sua vez, têm-se materializado em dissertações e artigos científicos.

As argamassas fazem parte integrante das alvenarias e, por isso, têm que ter uma composição e características compatíveis com o tipo de alvenaria e com os materiais já existentes. Sempre que haja uma intervenção nas alvenarias é imprescindível que se tenha em conta o funcionamento da parede como um todo e que se utilizem materiais e técnicas que preservem esse funcionamento [44].

A boa qualidade e a adequação de uma argamassa podem ser testadas através de ensaios que avaliem: (i) as suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, resistência à flexão e aderência; (ii) as suas propriedades químicas e composição mineralógica; e (iii) as suas propriedades físicas (cor, massa volúmica, condutibilidade térmica e elétrica) [41].

As propriedades mecânicas, químicas e físicas têm mais ou menos relevância dependendo da função para a qual a argamassa se destina. Assim sendo, pode-se classificar as argamassas quanto à sua função [45, 46]:

- **Argamassas de assentamento** – são usadas sobretudo em alvenarias, com o objetivo final de fazer a ligação entre os materiais das alvenarias e garantir que a parede “trabalhe” como um todo.
- **Argamassas de revestimento** – argamassas usadas quando se pretende assegurar um acabamento liso e nivelado (ex: argamassa de betonilha ou de um reboco interior) e quando se quer obter isolamento acústico e térmico. Este tipo de argamassas são também usadas para proteger as alvenarias das intempéries (como o vento, humidade e chuva) e das ações mecânicas externas (como choques).
- **Argamassas de reparação** – são argamassas usadas para reparar ou reforçar as construções (ex: refechamento de juntas, injeções de consolidação e impermeabilização de fachadas).

No presente trabalho, é de salientar que se pretende estudar argamassas de cal hidráulica com incorporação de um resíduo da indústria petrolífera, com o objetivo final de obter uma argamassa de reabilitação de edifícios com função de revestimento.

De seguida, apresentam-se algumas características das argamassas de reabilitação com função de revestimento. Estas características serão abordadas com mais detalhe na secção 2.3.2.

Uma argamassa de reabilitação não deve ser mecanicamente mais resistente que o material a reparar (já existente), a fim de se evitar a introdução de tensões num suporte que seja mais fraco. Assim sendo, e no que ao ligante diz respeito, não é muito aconselhável a utilização de cimento como constituinte principal das argamassas de reabilitação em alvenarias. As argamassas de cimento apresentam uma microestrutura muito densa, que lhes confere elevada resistência mecânica e impede as trocas de humidade do interior para o exterior do revestimento, dificultando a evaporação. Assim sendo, em muitos casos, as argamassas de cimento não apresentam uma boa solução para revestir edifícios em reabilitação, uma vez que é importante garantir trocas de humidade do interior para o exterior dos edifícios [32].

Quando se pretende fazer uma intervenção em edifícios, sobretudo em edifícios antigos, deve-se, sempre que possível, optar pela conservação dos revestimentos já existentes, fazendo reparações pontuais ou operações de consolidação. A opção de conservação é a mais correta do ponto de vista da ética da conservação, uma vez que está relacionada com a ecologia por via da sustentabilidade. Caso haja a necessidade de substituir, parcial ou totalmente, as argamassas pré-existentes, deve-se optar por argamassas adequadas para o fim a que se destinam, cumprindo princípios funcionais e estéticos. Requisitos esses que serão, mais adiante, aprofundados e explicados na Secção 2.3.2 [2, 47].

2.3.1 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Como já foi referido, no início do subcapítulo 2.3, as argamassas são produtos formados, essencialmente, por uma mistura de ligante hidráulico ou aéreo (Subsecção 2.3.1.1) com agregado (Subsecção 2.3.1.2) e água. Eventualmente, as

argamassas podem conter outros materiais, como adjuvantes (Subsecção 2.3.1.3) e adições (Subsecção 2.3.1.4).

Nas próximas subsecções apresenta-se uma breve análise dos constituintes das argamassas.

2.3.1.1 LIGANTES

Os ligantes hidráulicos (como a cal hidráulica) e aéreos, utilizados em argamassas de reabilitação, são, essencialmente, materiais inorgânicos, usados para ligar/aglomerar materiais (como os agregados, tipicamente a areia). Os ligantes hidráulicos ao serem misturados com água dão origem a uma pasta que ganha presa e endurece à temperatura ambiente, quer esteja fora ou dentro de água. Por sua vez, os ligantes aéreos só ganham presa e endurecem em contacto com o ar, não sendo resistentes à água. O ligante assume a função de aglutinador entre os vários constituintes das argamassas, atribuindo coesão e resistência mecânica às argamassas [8, 39].

O processo de endurecimento da cal hidráulica (ligante hidráulico usado neste trabalho) ocorre em duas fases: (i) na primeira dá-se a hidratação dos silicatos (em especial, dos silicatos bicálcicos) e aluminatos de cálcio, dentro e fora de água, originando silicatos de cálcio hidratados (Eq. 2.6); e (ii) numa segunda fase dá-se a recarbonatação do hidróxido de cálcio, originando carbonato de cálcio (Eq. 2.7).



2.3.1.2 AGREGADOS

Os agregados são materiais granulares que não intervêm significativamente na reação de endurecimento das argamassas [42]. São, geralmente, substâncias com baixa absorção (como areia, conchas e gravilha) ou substâncias absorventes e físico-quimicamente ativas (como o tijolo e a cerâmica) [41].

Os agregados são incorporados nas argamassas com o objetivo principal de lhes conferirem resistência aos esforços mecânicos, para além de lhes conferirem resistência ao desgaste e às condições ambientais, de diminuírem a retração das argamassas, de diminuírem a porosidade das mesmas, de melhorarem a permeabilidade ao vapor de água e de diminuírem a quantidade de ligante usado na mistura [41].

A escolha dos agregados deve ser feita com cuidado e de acordo com as funções para a qual a argamassa se destina, uma vez que os agregados têm influência no seu comportamento. Existem vários fatores como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria, a porosidade, a origem e o estado de limpeza dos agregados que influenciam as propriedades das argamassas [41, 48]. A granulometria e a forma das partículas têm bastante influência na percentagem de vazios existentes na argamassa, condicionando desta forma o seu comportamento. Quanto mais angulosas forem as partículas, menor será a percentagem de vazios e, conseqüentemente, menor será a quantidade de ligante e água necessários para a execução da argamassa. Isto leva a que haja uma diminuição da retração, um aumento da compactidade e maior resistência mecânica da argamassa [48, 49].

A escolha de utilização de agregados para argamassas deve ser feita de acordo com as normas europeias em vigor, nomeadamente, a norma NP EN 13139:2005 [50]. Esta norma especifica as propriedades dos agregados e dos “*fillers*” obtidos a partir do processamento de materiais naturais, artificiais ou reciclados, e das misturas destes agregados para utilização em argamassas.

2.3.1.3 ADJUVANTES

Os adjuvantes são materiais orgânicos ou inorgânicos adicionados, durante o processo de mistura das argamassas, em quantidades inferiores a 5% em massa do teor do ligante. A incorporação de adjuvantes tem como objetivo modificar as propriedades das argamassas no estado fresco e/ou endurecido, como melhorar a trabalhabilidade, modificar a velocidade da presa, aumentar a resistência ao ciclos gelo-degelo e diminuir a permeabilidade aos líquidos [42, 51].

Como já referido anteriormente na secção 2.2.3, esta dissertação tem como objetivo contribuir para o estudo da viabilidade de produzir uma argamassa para reabilitação de edifícios com incorporação de FCC. A argamassa usada como referência neste estudo é uma argamassa comercial que tem na sua constituição cal hidráulica, agregado calcário e três adjuvantes: introdutor de ar, modificador reológico (retentor de água), e um hidrófugo. Assim, de entre os adjuvantes disponíveis [52], para diversos fins, nesta subsecção apresenta-se a síntese de conhecimentos no que respeita a estes três adjuvantes.

Os adjuvantes retentor de água e introdutor de ar podem ser classificados como modificadores reológicos, uma vez que permitem modificar a reologia¹ das argamassas, alterando a sua consistência no estado fresco [53]. A consistência da argamassa é o resultado das suas características reológicas, como a tensão de escoamento e a viscosidade, que variam com o teor de água, a temperatura, o processo de mistura e a presença de aditivos e/ou adjuvantes [54].

No entanto, apesar de também modificar a reologia das argamassas, o adjuvante introdutor de ar, usado nas argamassas comerciais e incorporado nas argamassas objeto de estudo neste TFM, não é adicionado como modificador reológico. Aliás, a sua percentagem de incorporação, comparativamente com o adjuvante retentor de água, é significativamente pequena (Subcapítulo 3.1, Quadro 3.1), contribuindo assim em menor escala para a modificação da reologia das argamassas. Assim sendo, sempre que no presente trabalho se classificar o adjuvante como modificador reológico, é referente ao adjuvante retentor de água, que é o adjuvante utilizado nas argamassas comerciais com o objetivo principal de modificar a reologia das mesmas.

A utilização de argamassas exige a supervisão de uma série de etapas, desde os seus métodos de transporte à forma como são aplicadas. A escolha do método de aplicação depende da trabalhabilidade da argamassa, que pode ser modificada pelo uso de

¹ A reologia é a ciência que estuda o fluxo/escoamento e a deformação dos materiais, através da análise das relações entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação num determinado período de tempo. Assim sendo, o comportamento reológico dos materiais é representado através das relações entre a deformação e as forças a que os materiais estão sujeitos [56, 59, 101].

adjuvantes, como os modificadores reológicos [53, 55]. Uma vez que a aplicação das argamassas é realizada no estado fresco, o seu comportamento nesse estado é fundamental para proporcionar uma aplicação adequada e sem anomalias, reduzindo assim o aparecimento de patologias nos revestimentos após o endurecimento (como fissuras, deslocamentos e manchas, que irão determinar a qualidade do revestimento) [56, 57].

Assim sendo, de seguida, apresentam-se os adjuvantes usados neste trabalho.

I. Introdutor de Ar [53, 58, 59, 60]:

Os introdutores de ar são formados por moléculas orgânicas que, em solução aquosa, se separam em iões complexos, cujo agrupamento polar interage com as superfícies das partículas da cal hidráulica e dos agregados. O agrupamento polar permite, durante a mistura da argamassa, a formação de pequenas bolhas de ar fechadas, com diâmetros na ordem dos 0,01 a 1 mm, entre a cal e as partículas do agregado. Estas pequenas bolhas, relativamente compressíveis, interrompem a capilaridade das argamassas, melhorando a impermeabilização e a resistência aos ciclos gelo-degelo (em climas frios).

O ar que é introduzido sob a forma de bolhas funciona como um fluido e como inerte. No que respeita ao fluido, este adjuvante substitui parte da água da mistura, uma vez que é possível reduzir a quantidade de água sem alterar a trabalhabilidade da argamassa. Relativamente ao inerte, o adjuvante substitui parte da areia, com a vantagem de ser deformável, elástico e poder deslizar sem atrito, o que melhora a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco – é neste sentido que o introdutor de ar pode ser classificado como modificador reológico, melhorando a trabalhabilidade da argamassa.

Para além de interromper a capilaridade e melhorar a impermeabilização, os introdutores de ar são utilizados nas argamassas com o objetivo de:

- no *estado fresco* – reduzir a massa volúmica, tornando-as mais leves; aumentar a trabalhabilidade e a homogeneidade das argamassas; minimizar a exsudação, o

que permite reduzir o teor de água na mistura e, conseqüentemente, aumentar a resistência à fissuração.

- no *estado endurecido* – aumentar a porosidade e melhorar a distribuição dos poros, levando à diminuição das resistências mecânicas; diminuir a capilaridade das argamassas; contribuir para a resistência aos ciclos gelo-degelo; reduzir o módulo de elasticidade, contribuindo para aumentar a resistência à fissuração.

O ponto negativo destes adjuvantes é que podem diminuir a aderência das argamassas ao suporte.

II. Retentor de Água [53, 59, 60]:

Os adjuvantes usados como retentores de água são tipicamente éteres de metilcelulose. Este tipo de adjuvantes modificam a reologia das argamassas na medida em que contribuem para uma boa viscosidade das mesmas e facilitam a sua aplicação, tornando-as mais trabalháveis. Isto, porque para além de reterem a água da mistura da argamassa, aumentam a coesão dos seus constituintes, reduzindo desta forma a segregação das mesmas.

Em especial nas argamassas de cal hidráulica, a utilização de um retentor de água promove um efeito espessante, correspondendo a um aumento dos valores da viscosidade. Este aumento é importante em sistemas fluidos (como as argamassas), na medida em que reduz a segregação dos seus constituintes e melhora a homogeneidade das mesmas.

Com a utilização de um retentor de água é possível regular a perda de água da mistura durante o processo de endurecimento da argamassa, sendo assim as fissuras originadas pela retração minimizadas. No entanto, a quantidade de incorporação deste adjuvante deve ser estudada, uma vez que a sua não incorporação origina revestimentos muito secos, com pouca coesão e baixa resistência mecânica, por poder não existir água suficiente para a hidratação da cal, podendo ocorrer fissuração. Por outro lado, o seu uso em excesso nas argamassas aumenta o tempo de presa, dificultando todo o processo de aplicação e acabamento do revestimento.

III. Hidrófugo [53, 61]:

Os hidrófugos são adjuvantes utilizados para impedir, pelo menos parcialmente, a penetração da água e/ou a sua circulação nos vazios das argamassas, através da redução da tensão capilar no sistema poroso. Os hidrófugos são produtos adicionados em pequenas quantidades (não devem exceder 2% da massa do ligante). Estes adjuvantes tendem a diminuir a absorção capilar e a aumentar a impermeabilização das argamassas, reduzindo, desta forma, o aparecimento de eflorescências e criptoflorescências.

Os hidrófugos alteram, essencialmente, as propriedades das argamassas no estado endurecido, tornando-as pouco permeáveis e de maior durabilidade, uma vez que impedem a penetração da água, que é o agente que mais contribui para a sua degradação, como será explicado na secção 2.3.2.

2.3.1.4 ADIÇÕES

Neste trabalho está a ser estudado a incorporação de uma adição pozolânica, o FCC, pelo que se irá dar particular destaque a este tipo de adições.

As adições são materiais inorgânicos, finamente divididos, que podem ser incorporados nas argamassas com o objetivo principal de reduzir os custos associados à produção dos materiais em que são incorporadas. Com a incorporação de adições é possível obter ou melhorar propriedades específicas dos materiais, apesar de não ser esta a principal causa da sua incorporação [39, 42, 48]. Relativamente às adições pozolânicas, estas por si só não têm características de ligantes, mas quando reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), à temperatura ambiente, e na presença de água, formam compostos insolúveis estáveis que possuem características de ligantes [39].

Ao contrário dos adjuvantes (subsecção 2.3.1.3), as adições são materiais adicionados às argamassas em quantidades superiores a 5% em massa do teor em ligante [48].

A terminologia usada como referência, neste trabalho, para classificar as adições em argamassas de cal, é a terminologia definida na norma para betões NP EN 206-1:2007 [62]. Assim sendo, as adições podem ser classificadas como:

- a. **Tipo I** – adições quase inertes, como por exemplo, o “*filler*” calcário;
- b. **Tipo II** – adições pozolânicas (ex: metacaulino, cinza volante e sílica de fumo) (Secção 2.4.2 - Eq. 2.8) ou hidráulicas latentes² (ex: escória de alto forno).

No presente trabalho irá ser abordada, na secção 2.4.2, a influência de adições do Tipo II (pozolânicas), nomeadamente do resíduo de FCC, em argamassas de cal hidráulica.

2.3.2 REQUISITOS DAS ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO

Na presente secção irão ser abordados os “requisitos” propostos para argamassas de reabilitação de edifícios. A bibliografia encontrada sobre esta temática faz referência aos “requisitos” das argamassas em edifícios antigos. No entanto, e apesar de não terem sido encontradas referências específicas sobre os “requisitos” das argamassas de reabilitação em edifícios “modernos”, usar-se-á como referência os “requisitos” definidos para os edifícios antigos.

Os revestimentos de paredes, designados por rebocos, têm vindo a ser utilizados há vários anos por toda a Europa e durante vários séculos têm cumprido as funções de regularização das alvenarias, impermeabilização das fachadas, proteção das paredes contra ações externas, acabamento e de decoração [63].

As argamassas, particularmente as usadas em revestimentos exteriores, devem ser criteriosamente seleccionadas antes da sua utilização, uma vez que este tipo de revestimento é dos elementos de construção que mais exposição tem às ações ambientais, às ações mecânicas e a outro tipo de ações externas (como por exemplo: *graffitis* e degradação biológica) [2, 64].

² Designam-se por hidráulicas latentes as adições que, por si só, apresentam características hidráulicas, ou seja, as que têm capacidade de reagir diretamente com a água e endurecer, como é o caso da escória de alto-forno.

Para cumprirem as funções para as quais se destinam, os revestimentos devem verificar determinados “requisitos” funcionais. O respeito por estes critérios visa evitar problemas nos revestimentos, como a aceleração da degradação das paredes e, também, o surgimento de fenómenos de envelhecimento que possam ocorrer entre os novos e velhos revestimentos [2, 63, 64, 65].

Os critérios gerais de compatibilidade que os novos revestimentos devem respeitar não têm consenso por parte da comunidade científica, no entanto, existem alguns critérios que apresentam um consenso generalizado [63]. Assim, quando é necessário proceder à substituição, quer parcial, quer total, do revestimento pré-existente, o novo revestimento deverá respeitar princípios gerais, dos quais se destacam [2, 63, 64, 66]:

- i. Não contribuir para degradar os elementos pré-existentes, em especial as alvenarias;
- ii. Proteger as paredes, sobretudo contra ações externas;
- iii. Não danificar o aspeto visual arquitetónico, nem descaracterizar o edifício;
- iv. Ser reversível, ou, pelo menos, reparável;
- v. Ser durável e contribuir para a durabilidade do conjunto.

Para que estes princípios sejam cumpridos, é essencial que os novos revestimentos ofereçam resistência à penetração da água até ao suporte e que favoreçam a secagem/evaporação da água que se introduz, quer através da própria argamassa, quer através da sua ascensão capilar. Para além da resistência à água, os novos revestimentos devem [63, 66]:

- a. ter resistência mecânica, mas não transmitir tensões elevadas ao suporte;
- b. ter resistência mecânica, mas inferior à dos suportes pré-existentes;
- c. não ter na sua constituição materiais com elevado teor em sais solúveis, para evitar o aparecimento de eflorescências salinas ou criptoflorescências nos revestimentos;
- d. ter aderência ao suporte suficiente por forma a garantir a durabilidade do conjunto e a aderência nunca deve ter rotura coesiva pelo suporte;
- e. ter módulo de elasticidade igual ou inferior ao do suporte pré-existente para não desenvolverem tensões elevadas quando sofrerem variações dimensionais;
- f. permitir a sua reparação ou substituição sem danificar o suporte;
- g. resistir ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte.

A durabilidade do revestimento em si e do seu conjunto é o “requisito” que apresenta maior importância, na medida em que os restantes requisitos dependem deste para serem cumpridos. A durabilidade prende-se com o facto de a nova argamassa ter uma boa resistência mecânica (resistência aos choques, boa coesão interna, boa aderência entre camadas e ao suporte), uma boa resistência química, sobretudo aos sais existentes em paredes de edifícios antigos, permitir a reversibilidade do revestimento e, principalmente, um bom comportamento à água: absorção lenta de água e, como já foi referido, facilidade na evaporação/secagem da mesma [2].

Tipicamente, a durabilidade das argamassas, que têm a cal como seu ligante, está essencialmente ligada à sua estrutura porosa, isto é, à capacidade da argamassa de revestimento para transportar, reter e expulsar a água por evaporação, o que influencia, conseqüentemente, o seu comportamento aos sais, ao gelo e à sua resistência mecânica [2].

No entanto, não é demais salientar que todas estas funções são cumpridas considerando o revestimento como um todo e não só por uma única camada de argamassa, que é executada em condições de ensaio [2, 63].

Assim sendo, e tendo em conta que é preciso e recomendável fazer uma avaliação caso a caso dos revestimentos dos edifícios a serem intervencionados, existem recomendações de intervalos de valores que se incluem nos Quadros 2.3 e 2.4. Por sua vez, as relações entre as características dos revestimentos a aplicar e as características dos elementos pré-existentes apresentam-se nos Quadros 2.5 e 2.6 [2, 63, 66, 67].

Uma nota importante a ter em conta aquando da definição dos “requisitos” para argamassas de reabilitação: de forma geral, a informação “científica” encontrada caracteriza os requisitos para argamassas de reabilitação qualitativamente (ex: bom, mau, melhor, etc.) e não quantitativamente. Isto deve-se ao facto de a reabilitação ser um processo de intervenção “subjetivo”, ou seja, cada caso é um caso e, muitas vezes torna-se difícil generalizar os valores de um caso particular. Assim sendo, sempre que se encontrarem “requisitos” classificados qualitativamente, essa classificação depende do edifício que esteja a ser alvo de uma intervenção de reabilitação, quer este seja histórico, classificado ou habitacional.

Os Quadros 2.3 e 2.4 apresentam, respetivamente, os valores estabelecidos para as características mecânicas e os valores para as características de comportamento à água e ao clima das argamassas de revestimento para edifícios antigos.

Quadro 2.3 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de revestimento para edifícios antigos, adaptado de [2]

Uso	Características Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)
	Rt	Rc	E	
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000	0,1 – 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000	
Juntas	0,4 - 0,8	0,6–3	3000-6000	0,1 – 0,5 ou rotura coesiva pela junta

Rt – Resistência à tracção por flexão; Rc – Resistência à compressão; E – Módulo de deformabilidade dinâmico por frequência de ressonância;

Quadro 2.4 - Requisitos estabelecidos para as características de comportamento à água e ao clima das argamassas de revestimento para edifícios antigos, adaptado de [2]

Uso	Comportamento à água	
	Ensaio clássico	
	S_D (m)	C kg/m ² .h ^{1/2}
Reboco exterior	< 0,08	< 12 ; > 8
Reboco interior	< 0,10	-
Juntas	< 0,10	< 12 ; > 8

S_D - espessura da camada de ar de difusão equivalente (valor relacionado com a permeância); C - coeficiente de capilaridade;

Os Quadros 2.5 e 2.6 apresentam a relação entre as características para as argamassas e as características dos elementos pré-existentes (características mecânicas).

Quadro 2.5 - Relação entre as características para as argamassas e as características dos elementos pré-existentes - características mecânicas, adaptado de [63]

Argamassa	Características mecânicas aos 90 d			Aderência ao suporte	Comportamento às forças desenvolvidas por retracção restringida
	Resistência à tracção R_t	Resistência à compressão R_c	Módulo de deformação E	R_a	F_r máx
Reboco exterior	Características mecânicas semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte.			Resistência ao arrancamento (R_a) inferior à resistência à tracção do suporte: a rotura nunca deve ser coesiva pelo suporte.	Força máxima desenvolvida por retracção restringida (F_r máx) inferior à resistência à tracção do suporte.
Reboco interior					
Refechamento de juntas					

Quadro 2.6 - Relação entre as características para as argamassas e as características dos elementos pré-existentes, adaptado de [63]

Argamassa	Comportamento à água Ensaio clássico			Comportamento aos sais	Comportamento térmico	Durabilidade
	Permeabilidade ao vapor de água	Coefficiente de capilaridade C	Porosidade	Teores de sais solúveis	Características térmicas	Resistência às acções climáticas; resistência aos sais
Reboco exterior	Capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhantes às argamassas originais e superiores às do suporte.			Baixos teores de sais solúveis	Coefficiente de dilatação térmica e condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas originais e à do suporte.	Média a elevada
Reboco interior						
Refechamento de juntas						

2.4 SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DA CAL HIDRÁULICA

Como já foi mencionado anteriormente, na secção 2.2.3, uma das medidas para reduzir o impacto ambiental, associado à produção de cal hidráulica, consiste na substituição parcial da cal por outros materiais nas argamassas. Os materiais substitutos podem ser recursos naturais ou subprodutos provenientes de outras indústrias. A produção de argamassas com substituição parcial de cal por outros materiais apresenta vantagens ambientais, das quais se destacam:

- i. Diminuição das emissões de CO_2 , associadas à produção de cal hidráulica;

- ii. Redução do consumo e exploração de recursos naturais, associados à produção de cal hidráulica;
- iii. Atenuação do consumo de energia elétrica e combustível, associados à exploração de matérias-primas e produção de cal hidráulica.

Para além destas vantagens, a incorporação parcial de outros materiais em argamassas de cal hidráulica pode conduzir a melhores propriedades e ao aumento de durabilidade, em relação às argamassas sem substituição parcial de cal. Estas vantagens podem traduzir-se, nomeadamente, em melhor trabalhabilidade, aumento das resistências mecânicas e num melhor comportamento à água.

O catalisador exausto de FCC é um subproduto proveniente da indústria petroquímica e que é alvo de estudo neste trabalho com o objetivo de substituir parcialmente a cal hidráulica em argamassas de reabilitação. Este resíduo é classificado como adição pozolânica do Tipo II (Subsecção 2.3.1.4) [15].

2.4.1 CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

O catalisador exausto da indústria petroquímica, o FCC, é um produto proveniente da refinação do petróleo. O petróleo é um recurso energético não renovável, um combustível fóssil, que resulta da decomposição de matéria orgânica, ao longo do tempo, como os resíduos vegetais e seres marinhos. O petróleo bruto (tal como é extraído da natureza) é composto por uma complexa mistura de hidrocarbonetos (moléculas formadas por átomos de carbono e hidrogénio), que é depois refinado, uma vez que no seu estado bruto não apresenta qualquer tipo de utilização [68, 69].

A refinação do petróleo é um processo que consiste no “*cracking*” das moléculas de hidrocarbonetos e que tira partido das suas diferentes massas e, conseqüentemente, das volatilidades e das diferentes temperaturas de ebulição das frações obtidas, para os separar. Este processo dá origem a produtos intermédios ou finais para a produção de combustíveis, como: gás, gasóleo, querosene (parafina), entre outros [69, 70].

Atualmente, em algumas refinarias, como a de Sines, existem as unidades de “*cracking*” catalítico em leite fluidizado (do inglês “Fluid Catalytic Cracking” -

FCC). Estas unidades otimizam a quebra/“*cracking*” das moléculas de hidrocarbonetos em moléculas menores e mais leves, com maior valor acrescentado. Nomeadamente, este processo de “*cracking*” aumenta os rendimentos e a qualidade da gasolina, gasóleo e do GPL (gás propano liquefeito) contribuindo para satisfazer as necessidades do mercado [71, 72, 73, 74].

O processo de *cracking* catalítico em leito fluidizado é realizado na presença de um catalisador. Este catalisador de FCC apresenta-se sob a forma de microesferas com tamanho médio de partícula na ordem dos 60 a 100 μm [75]. O resíduo de FCC em estudo apresenta um tamanho de partícula muito pequeno, na ordem dos 80 μm [76]. Os principais constituintes deste catalisador são: (i) Zeólito Y (aluminossilicato – 5 a 40%) com estrutura cristalina tridimensional, constituída por túneis e cavidades, que conferem ao catalisador elevada área superficial (interna e externa) específica³; (ii) matriz com atividade catalítica constituída por alumina; (iii) um ligante, constituído essencialmente por sílica, que estabelece a ligação entre os diferentes elementos e confere resistência ao catalisador; e (iv) um *filler* (geralmente é uma argila), que tal como o ligante confere resistência e integridade ao catalisador. A composição química exata dos catalisadores de FCC é definida em função do processo da refinaria em que vão ser usados e dos produtos que se pretendem obter [71, 73, 75, 76].

A atividade química, durante o processo de “*cracking*”, que está associada à separação dos hidrocarbonetos, produz um resíduo de alto teor de carbono – coque (composto poliaromático insaturado) – que se deposita sobre a superfície do catalisador, diminuindo a sua atividade catalítica. Isto leva a que haja necessidade de substituição do catalisador, embora este seja previamente regenerado, diversas vezes, usando temperaturas elevadas, entre os 680 e os 750 °C [15, 74]. O catalisador é substituído por quantidades equivalentes de catalisador “fresco” (que ainda não foi usado) [74]. O catalisador removido do processo de “*cracking*” gera um resíduo que é tipicamente enviado para aterros sanitários.

³ A elevada área superficial específica do catalisador de FCC contribui para a elevada afinidade que este resíduo apresenta com a água [76].

Atualmente, são usados cerca de 500 000 tons/ano de catalisador de FCC nas refinarias de petróleo, 20% dos quais usados nas refinarias europeias [76]. Em Portugal, são gerados 780 tons/ano do resíduo de FCC [77].

Este resíduo de FCC, em vez de ser enviado para aterros sanitários, tem vindo a ser testado através da sua incorporação em materiais de construção, sobretudo em Portugal, no desenvolvimento de betões e de novas argamassas à base de cimento e de cal hidráulica. Em Portugal, os estudos com incorporação do resíduo de FCC têm vindo a ser desenvolvidos pela Professora Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa, docente no ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). Estes estudos têm comprovado as vantagens da substituição parcial de ligantes hidráulicos (cimento e cal hidráulica) pelo resíduo [14, 15, 78, 79, 80]. Os resultados destes estudos serão abordados posteriormente na secção 2.4.2.

Sendo o catalisador exausto de FCC a pozolana em estudo nesta dissertação, a sua influência em argamassas de cal hidráulica e de cimento, nos trabalhos encontrados, será mais detalhada na secção 2.4.2. No subcapítulo 2.2 foi feita uma comparação, devido à lacuna de informação sobre a cal hidráulica, entre o cimento e a cal hidráulica para explicar o processo de produção e os impactos ambientais na produção de cal hidráulica. Por analogia, na secção 2.4.2, ir-se-á abordar os efeitos de incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica e de cimento.

O resíduo de FCC é um material pozolânico [15, 76], uma vez que quando entra em contacto com uma mistura de cal hidráulica ou de cimento e água, reage com o Ca(OH)_2 – um dos produtos de hidratação da cal hidráulica e do cimento – formando-se compostos químicos idênticos aos produtos de hidratação do cimento e da cal, e que apresentam propriedades de ligantes [76]. Esta reação química designa-se por reação pozolânica (Secção 2.4.2, Eq. 2.8).

2.4.2 INFLUÊNCIA DE POZOLANAS EM ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA

As pozolanas são materiais compostos siliciosos ou aluminossilicatos com pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando em contacto com água e à

temperatura ambiente, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), como se apresenta na equação 2.8. Os silicatos de cálcio hidratados contêm propriedades de ligantes que contribuem para a densificação da microestrutura das argamassas e, conseqüentemente, para a resistência das mesmas [8].



As pozolanas podem ter efeitos diferentes nas propriedades das argamassas em que são incorporadas, podendo aumentar a densidade e a resistência à compressão e diminuir a porosidade das mesmas. Os materiais pozolânicos, como o pó de tijolo, produzido a temperaturas inferiores a 900°C , podem originar o aumento da permeabilidade e da flexibilidade das argamassas, enquanto que os materiais pozolânicos produzidos a temperaturas mais elevadas, tendem a formar argamassas mecanicamente mais resistentes [81].

A utilização de pozolanas em argamassas de cal hidráulica tem vindo a ganhar interesse por parte da comunidade científica, como já foi abordado na secção 2.4.1. Nomeadamente, os trabalhos desenvolvidos, em Portugal, usando pozolanas têm mostrado, claramente, o benefício do seu uso em argamassas de cal hidráulica. Das pozolanas usadas nestes trabalhos destacam-se: o metacaulino e o FCC.

Relativamente à utilização de metacaulino em argamassas de cal hidráulica, foi demonstrado que uma substituição até 10% do ligante por metacaulino garante uma melhoria nas resistências mecânicas, resistência aos sulfatos e do módulo de deformação dinâmico, em comparação com uma argamassa sem metacaulino. Relativamente à absorção capilar, as argamassas com metacaulino absorvem mais lentamente a água, em relação às argamassas sem metacaulino e, no que à secagem diz respeito, quanto maior a percentagem de metacaulino, mais tempo demoram as argamassas na secagem da água [82, 83].

Relativamente à incorporação do resíduo de FCC, resíduo em estudo no presente trabalho, em argamassas de cal hidráulica os resultados do único estudo encontrado (e

realizado no mesmo laboratório com o mesmo FCC) mostram que [14]: com o aumento de incorporação de FCC (até 10% de incorporação) há uma tendência de diminuição dos coeficientes de capilaridade das argamassas. Isto pode ser explicado pela reação pozolânica, que pode originar argamassas mais densas e, conseqüentemente, menos porosas. Relativamente à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação, as argamassas com FCC apresentam valores mais elevados relativamente às argamassas sem FCC.

No que respeita à influência da incorporação do resíduo de FCC na resistência mecânica à compressão das argamassas de cal hidráulica verifica-se que, aos 28 dias de hidratação, todas as argamassas com incorporação de FCC apresentam valores de resistência mecânica superiores aos das argamassas sem FCC. Verifica-se, também, que, aos 91 dias de hidratação, a partir dos 10% de incorporação de FCC há uma diminuição das resistências mecânicas à compressão. De forma geral, verifica-se que as argamassas com incorporação de FCC apresentam valores de resistência mecânicas mais elevados relativamente às argamassas sem FCC.

No que respeita à incorporação do mesmo resíduo em argamassas de cimento, existe um maior número de estudos sobre esta matéria, o que permite uma melhor compreensão sobre a influência deste resíduo em argamassas de cimento [15, 76, 78, 79, 80].

A substituição parcial do cimento pelo resíduo de FCC tem influência na fluidez e, portanto, na trabalhabilidade das argamassas, verificando-se que o aumento da incorporação do resíduo de FCC conduz à uma diminuição dos valores de espalhamento e, conseqüentemente, da fluidez da argamassa e da sua trabalhabilidade [15, 76, 78, 79, 80]. Isto é atribuído ao facto de o resíduo de FCC ter uma elevada área superficial específica, o que o torna num material absorvente de água (Secção 2.4.1).

O aumento de FCC diminui, globalmente, a resistência à flexão das argamassas de cimento, para o mesmo tempo de hidratação, quando comparadas com argamassas de referência sem FCC [15, 76, 79].

Relativamente à resistência à compressão das argamassas de cimento, com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC, verifica-se que para idades de hidratação “jovens” (2 dias e 7 dias), os valores da resistência à compressão são inferiores aos da argamassa de referência e diminuem com o aumento de incorporação de FCC. No entanto, a partir dos 28 e 56 dias de hidratação, as argamassas com substituição de FCC até 10-15%, recuperam e até podem superar os valores das resistências à compressão, quando comparados com os da argamassa de referência sem FCC [15, 76].

No que respeita à incorporação do resíduo de FCC em betões, até 30% de incorporação, os betões com FCC apresentam resistências mecânicas superiores ao betão sem FCC, a partir dos 56 dias de hidratação. Esse aumento é mais acentuado para os 20% de incorporação, em relação ao betão de referência [80].

Relativamente à absorção de água por capilaridade, em argamassas de reparação de estruturas de betão [79] e em eco-betões convencionais [80] com incorporação até 15 e 20% de FCC, respetivamente, há uma diminuição da absorção de água por capilaridade com o aumento de incorporação de FCC.

A presente campanha experimental irá dar continuidade ao desenvolvimento de argamassas de cal hidráulica com substituição parcial pelo resíduo de FCC.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

“Quem nunca errou, nunca experimentou nada de novo.”

Albert Einstein

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar o efeito da incorporação do resíduo de FCC (que provém das unidades de “cracking” catalítico em leito fluidizado) nas propriedades de argamassas de cal hidráulica, comparando-as com uma argamassa que reproduz a argamassa comercial (argamassa de referência - HL_wFCC0_Hid), que tem como finalidade a reabilitação de edifícios.

Este trabalho vem dar continuidade a um trabalho de mestrado [14], desenvolvido no ISEL, no mesmo laboratório e com o mesmo resíduo, que analisa a viabilidade da substituição parcial de cal hidráulica pelo resíduo de FCC. Nesse trabalho estudou-se a incorporação do resíduo de FCC até 10% do ligante e verificou-se que a percentagem de incorporação do mesmo resíduo ainda não tinha atingido o seu limite máximo de substituição (em comparação com argamassas de referência). Assim sendo, para além do objetivo descrito no parágrafo anterior, pretende-se também alargar a percentagem de incorporação de FCC, até 15% da massa do ligante⁴, nas diversas argamassas.

Por conseguinte, para o desenvolvimento da campanha experimental foram preparadas quatro séries de argamassas com substituição parcial (até 15% em massa do ligante, com incrementos de 5%,) de cal hidráulica pelo resíduo FCC (Quadro 3.1). As séries de argamassas diferem entre si na composição de adjuvantes. Isto é, uma das séries não contém adjuvantes nas composições das argamassas e nas outras três séries, com adjuvantes, as composições de argamassas diferem entre si na percentagem de hidrófugo (Hid). Os adjuvantes escolhidos para esta campanha experimental são os mesmos adjuvantes usados na argamassa que reproduz a argamassa comercial em estudo (HL_wFCC0_Hid).

O Quadro 3.1 apresenta a designação e a composição das diferentes argamassas estudadas neste trabalho. A quantidade de adjuvantes usada na preparação das argamassas da série Hid é igual à usada nas argamassas comercializadas pela CIARGA. Assim sendo, e em acordo com a empresa, decidiu-se apresentar uma gama de valores relativamente à percentagem usada dos adjuvantes.

⁴ Neste trabalho, considera-se “ligante” o conjunto de cal hidráulica e do resíduo de FCC.

Quadro 3.1 - Designação e composição das várias argamassas estudadas na campanha experimental

Razão ligante/sólidos* (%mássica)	Série	Notação das argamassas	Ligante (% mássica)		% adjuvantes		
			Cal Hidráulica	FCC	MR**	IAr**	Hid**
25%	S/adjuvantes	HL_wFCC0	100	0	0	0	0
		HL_wFCC5	95	5			
		HL_wFCC10	90	10			
		HL_wFCC15	85	15			
	Hid	HL_wFCC0_Hid ⁵	100	0	0,05 a 0,5	0,005 a 0,05	0,025 a 0,25
		HL_wFCC5_Hid	95	5			
		HL_wFCC10_Hid	90	10			
		HL_wFCC15_Hid	85	15			
	0.5Hid	HL_wFCC0_0.5Hid	100	0	0,05 a 0,5	0,005 a 0,05	0,0125 a 0,125
		HL_wFCC5_0.5Hid	95	5			
		HL_wFCC10_0.5Hid	90	10			
		HL_wFCC15_0.5Hid	85	15			
	0Hid	HL_wFCC0_0Hid	100	0	0,05 a 0,5	0,005 a 0,05	0
		HL_wFCC5_0Hid	95	5			
		HL_wFCC10_0Hid	90	10			
		HL_wFCC15_0Hid	85	15			

(*)Ligante: cal hidráulica e FCC; Sólidos: ligante + areia + adjuvantes. Todas as composições são preparadas com 3000g de materiais (ligante + sólidos) em cada mistura. (**)MR – Modificador reológico; IAr – Introduzidor de ar; Hid –Hidrôfugo.

Como exemplificação do significado da notação das argamassas (Quadro 3.1): a argamassa com a notação “HL_wFCC5_0.5Hid” corresponde a uma argamassa de cal hidráulica (HL – cal hidráulica, em inglês “*Hydraulic Lime*”) com 5% de incorporação de FCC (wFCC5 – 5% do resíduo da unidade de *cracking* catalítico, em inglês “*waste Fluid Catalytic Cracking*”) e com 50% de incorporação do adjuvante hidrófugo (0.5Hid – 50% do hidrófugo usado relativamente à argamassa comercial).

Na série de adjuvantes Hid são utilizadas as mesmas quantidades de adjuvantes presentes nas argamassas comerciais de cal hidráulica para reabilitação de edifícios (comercializadas pela CIARGA). Nas séries 0.5Hid e 0Hid, comparativamente com a série Hid, há alteração na percentagem do adjuvante hidrófugo. Na série 0.5Hid, a incorporação do adjuvante hidrófugo é metade da quantidade usada na série Hid e, na

⁵ A argamassa HL_wFCC0_Hid é a argamassa que reproduz a argamassas comercial e que é usada como referência no presente trabalho.

série 0Hid, não se incorpora o hidrófugo nas argamassas. A redução da percentagem de hidrófugo usada nas diferentes séries de argamassas deve-se aos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, num estudo anteriormente realizado, no mesmo laboratório e com o mesmo resíduo [14]. Os resultados desse ensaio mostram uma diminuição dos coeficientes de capilaridade à medida que se aumenta a incorporação do FCC nas argamassas. Assim, verificou-se que o resíduo de FCC é um potencial substituto do adjuvante hidrófugo, o que permite reduzir ou eliminar a utilização do adjuvante hidrófugo nas argamassas. Assim sendo, pretende-se estudar o comportamento das argamassas, comparativamente com a argamassa que reproduz a comercial, quando incorporadas com 100%, 50% e 0% do adjuvante hidrófugo usado na argamassa comercial usada como referência.

Para o desenvolvimento do trabalho experimental definiram-se 16 argamassas de cal hidráulica, com e sem incorporação do resíduo de FCC (Quadro 3.1), que foram ensaiadas no estado fresco – nos instantes após a sua preparação – e no estado endurecido, mais especificamente, aos 28, 56 e 91 dias de idade⁶. Cada ensaio foi realizado seguindo o procedimento experimental descrito numa norma europeia (EN) ou em especificações técnicas.

O Quadro 3.2 apresenta o programa de ensaios experimentais para todas as argamassas estudadas, o local de realização dos ensaios e as respetivas normas que lhes estão associadas.

O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do ISEL e no Laboratório da CIARGA. Com o intuito de evitar possíveis acidentes de trabalho, aquando do manuseamento dos materiais e dos equipamentos laboratoriais, foi utilizado material de proteção adequado, como luvas de proteção, bata, proteção ocular, proteção respiratória, entre outros tipos de proteção.

⁶ Entende-se por *idade* o tempo contado a partir do momento da adição de água ao ligante, no processo de preparação da argamassa, até ao momento em que o material é ensaiado.

Quadro 3.2 - Campanha experimental de ensaios desenvolvida para as argamassas estudadas

	ENSAIOS	LOCAL DO ENSAIO	NORMAS/ ESPECIFICAÇÕES	IDADES DE ENSAIO (dias)
ESTADO FRESCO	Fluidez (mesa espalhamento)	ISEL	EN 1015 - 3:1999	-
	Massa volúmica	ISEL	EN 1015 - 6:1998	-
ESTADO ENDURECIDO	Resistência à flexão e à compressão	CIARGA	EN 1015 - 11:1999	28, 56 e 91
	Módulo de deformação dinâmico (ultrassons)	ISEL	ABNT NBR 15630:2008	28, 56 e 91
	Absorção de água por capilaridade	ISEL	EN 1015 - 18:2002	28 e 91
	Permeabilidade à água líquida	CIARGA	Método de Karsten	28 e 91
	Secagem de água	ISEL	-	28 e 91
	<i>Pull-Off</i>	CIARGA	EN 1015 -12:2000	28 e 91
	Análise Fenolftaleína	CIARGA	-	28, 56 e 91

3.2 MATERIAIS

Nesta campanha experimental foram utilizados os seguintes materiais sólidos: Cal Hidráulica (HL5), resíduo da indústria petroquímica (catalisador exausto de FCC), agregados calcários e adjuvantes. Estes materiais foram armazenados e separados, convenientemente, dentro de sacos plásticos resistentes, fechados e colocados em cima de paletes. Assim, conseguiu-se manter as condições de humidade dos materiais e evitar o contacto destes com outro tipo de material, desde o momento em que saem da fábrica até ao instante em que são usados na produção das argamassas.

O outro material usado na produção das argamassas foi a água. Ao contrário do estabelecido pelas normas, a água utilizada foi água da rede pública (água da torneira do Laboratório de Materiais de Construção, Departamento de Engenharia Civil, do ISEL), em substituição de água destilada. Esta alteração foi feita para reproduzir as condições de fabrico o mais próximo possível das argamassas comerciais.

3.2.1 LIGANTES

Os materiais ligantes utilizados nesta campanha experimental foram a cal hidráulica (HL5) e o resíduo de FCC.

A cal hidráulica (Figura 3.1.a) usada nesta campanha é fornecida e comercializada pela empresa CIARGA, cujas especificações e critérios de conformidade são estabelecidos pela norma NP EN 459-1:2011 [84]. A ficha técnica, da cal hidráulica (HL5), pode ser consultada no Anexo B.1.

Relativamente ao catalisador exausto de FCC, que substitui parcialmente a cal hidráulica enquanto ligante, é um resíduo fornecido pela refinaria de Sines da Galp (Figura 3.1.b). O Quadro 3.3 apresenta as composições químicas deste catalisador [76].

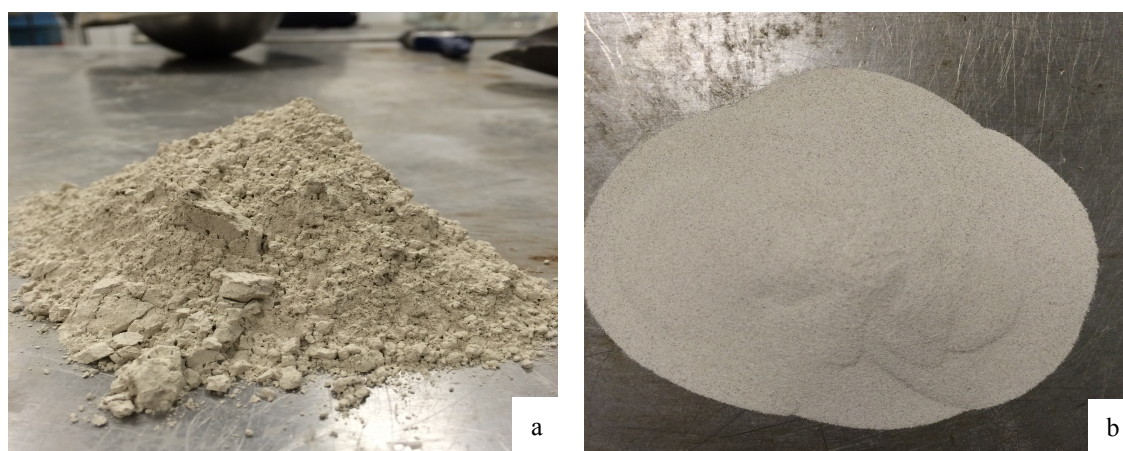


Figura 3.1 - Materiais ligantes usados na campanha experimental. a) Cal Hidráulica (HL5); b) Catalisador exausto de FCC.

Quadro 3.3 - Composições químicas do resíduo de FCC, extraído de [76]

Composto	Composição química (% mássica)	Composto	Composição química (% mássica)
	FCC		FCC
SiO ₂	39.59	Na ₂ O	0.68
Al ₂ O ₃	52.81	Ti ₂ O ₃	0.82
Fe ₂ O ₃	0.55	P ₂ O ₅	0.06
CaO	0.09	Mn ₂ O	0.00
MgO	0.19	SrO	0.00
SO ₃	0.23	Perda ao Fogo	1.49
K ₂ O	0.04		

3.2.2 AGREGADOS

Na presente campanha experimental utilizou-se sempre a mesma família de agregados, em concreto agregado calcário, composta por três tipos de agregados: areia

calcária (dimensão entre 0,09 - 0,6 mm) (Figura 3.2.b), areia calcária (dimensão entre 0,6 - 1,2 mm) (Figura 3.2.a) e “filler” (Figura 3.2.c). O Quadro 3.4 apresenta a composição química da areia calcária e respetivas normas de ensaio, a partir das quais a areia calcária foi caracterizada. O Anexo B.2 apresenta as curvas granulométricas dos três agregados usados na presente campanha experimental.

Quadro 3.4 - Composição química da areia calcária e normas de ensaio, a partir das quais a areia foi caracterizada

Composição Química	Areia Calcária	Normas
Teor em carbonato de cálcio	≥98%	-
Teor em Cloretos	<0,05%	EN 1744-1:2009
Teor em Enxofre total	<0,02%	EN 1744-1:2010
Teor de Húmus	Teste negativo	EN 1744-1:2011
Absorção de água	<1,50%	NP EN 1097-6/2003:A1:2010

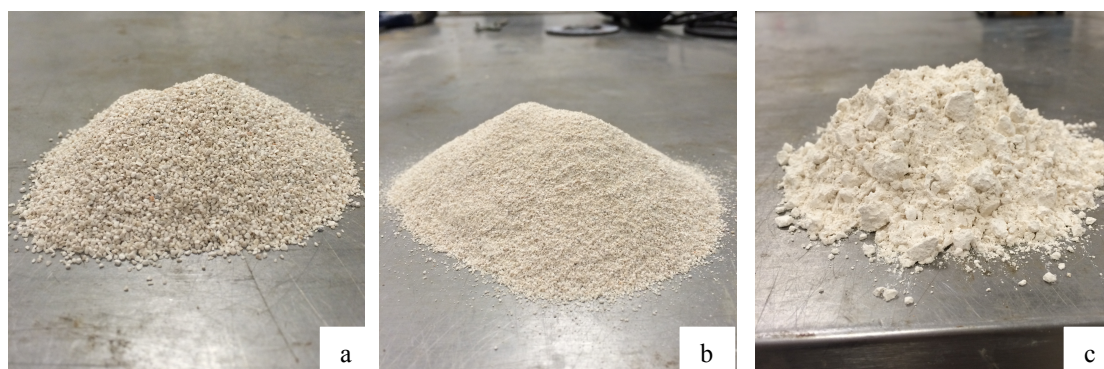


Figura 3.2 - Agregados usados na campanha experimental. a) Areia calcária (0,6-1,2 mm); b) Areia calcária (0,09-0,6 mm); c) “Filler”.

A mistura de argamassas é sempre realizada com 3000 g de materiais sólidos (agregados, ligantes e adjuvantes). Assim sendo, a quantidade de agregados usada em cada série de argamassas varia de acordo com a quantidade de adjuvante usada. O Quadro 3.5 apresenta os diferentes tipos de agregados com as respetivas quantidades de utilização em cada uma das séries (já apresentadas anteriormente no Quadro 3.1).

Quadro 3.5 - Agregados e respectivas quantidades de utilização em cada uma das séries

Série	Família de Areia Calcária	
	Agregados (DTP-dimensão do tamanho de partícula)	Quantidades (g)
S/adjuvantes	Agregado calcário (0,09 - 0,6 mm)	1503,00
	Agregado calcário (0,6 - 1,2 mm)	596,25
	"Filler"	150,75
Hid	Agregado calcário (0,09 - 0,6 mm)	1487,20 – 1501,40
	Agregado calcário (0,6 - 1,2 mm)	589,99 – 595,62
	"Filler"	149,17 – 150,59
0.5Hid	Agregado calcário (0,09 - 0,6 mm)	1491,00 – 1501,80
	Agregado calcário (0,6 - 1,2 mm)	591,48 – 595,77
	"Filler"	149,54 – 150,63
0Hid	Agregado calcário (0,09 - 0,6 mm)	1494,70 – 1502,20
	Agregado calcário (0,6 - 1,2 mm)	592,97 – 595,92
	"Filler"	149,92 – 150,67

3.2.3 ADJUVANTES

Como já foi referido no subcapítulo 3.1, a incorporação de adjuvantes nas argamassas só é feita em três das quatro séries de argamassas estudadas, em concreto nas séries Hid, 0.5Hid e 0Hid. A quantidade de incorporação do adjuvante Hid (hidrófugo) é a única que difere de série para série, sendo que a quantidade de incorporação dos adjuvantes modificador reológico e introdutor de ar se mantém a mesma nas três séries de argamassas, como já foi apresentado no Quadro 3.1.

Como já foi abordado na subsecção 2.3.1.3, os adjuvantes utilizados nesta campanha experimental são um introdutor de ar, um modificador reológico (retentor de água) e um hidrófugo. No entanto, e por uma questão de proteção comercial das argamassas usadas como referência, optou-se por não apresentar os componentes químicos e as designações comerciais dos adjuvantes usados.

3.3 DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS

O plano de ensaios foi estabelecido por forma a que se preparassem todas as argamassas no menor intervalo de tempo possível. Assim sendo, e uma vez que os desmoldes foram feitos ao fim de 7 dias da mistura das argamassas, a realização de misturas englobou o período compreendido entre o dia 15 de Abril de 2015 e o dia 8 de Junho de 2015. Foram realizadas, em média, 8 misturas por dia, durante 15 dias de produção. As calendarizações das misturas apresentam-se no Anexo A.1.

Para todas as argamassas estudadas definiu-se um intervalo de espalhamento entre os 165-175 mm. O intervalo de espalhamento foi definido com base nos valores de espalhamento aceites nas argamassas de cal hidráulica comercializadas pela CIARGA. Previamente à realização das misturas realizaram-se misturas de “acerto” para todas as argamassas, com o objetivo de definir as quantidades de água necessárias para cada uma. À medida que foi feito o “acerto” das águas, para cada argamassa, realizaram-se os ensaios no estado fresco:

- Primeiramente, e para garantir que a fluidez da argamassa se encontrava no intervalo 165-175 mm, realizou-se o ensaio de consistência obtida por mesa de espalhamento (secção 3.5.1).
- De seguida, e após verificar o espalhamento pretendido, realizou-se o ensaio de massa volúmica (secção 3.5.2).

Após a definição das quantidades de água e da realização dos ensaios no estado fresco, procedeu-se à execução das argamassas que foram objeto de ensaios no estado endurecido (Subcapítulo 3.6).

O plano de ensaios encontra-se apresentado no Anexo A.2, o qual apresenta a calendarização de todos os ensaios realizados no estado endurecido.

3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS

As argamassas estudadas nesta campanha experimental, tanto para os ensaios realizados no estado fresco (Subcapítulo 3.5) como no estado endurecido (Subcapítulo 3.6), foram preparadas de acordo com o mesmo procedimento de mistura.

Na produção das argamassas usou-se uma misturadora mecânica, garantindo assim condições normalizadas para todas as misturas. A misturadora consiste numa cuba em aço inoxidável e numa pá de mistura, que é acionada por um motor elétrico. A pá da misturadora tem um movimento circular que percorre todo o interior da cuba.

O Quadro 3.6 apresenta os equipamentos e utensílios usados durante o procedimento de mistura das argamassas.

Quadro 3.6 - Equipamentos e utensílios usados no procedimento de mistura das argamassas

Equipamentos	Utensílios
- Misturadora mecânica (marca: Perta; modelo: PL5M)	- Gobelé
- Cronómetro	- Colher de metal
	- Pano Húmido

O procedimento de mistura adotado na presente campanha experimental seguiu os passos que se descrevem abaixo e que estão, esquematicamente, representados na Figura 3.3:

- 1º. Colocaram-se todos os materiais sólidos, necessários para a realização das argamassas, dentro da cuba da misturadora;
- 2º. Acionou-se a misturadora que homogeneizou os sólidos, durante 4 minutos, à velocidade 1 (145 ± 5 rpm);
- 3º. Ao fim dos 4 minutos, parou-se a misturadora e incorporou-se a água na mistura com a ajuda de um gobelé. Por forma a evitar desperdícios e poeiras, antes de voltar a acionar a misturadora, realizou-se uma amassadura manual durante 1 minuto, com a ajuda de uma colher de metal;
- 4º. Voltou-se a acionar a misturadora (velocidade 1) para que esta misturasse todos os materiais e homogeneizasse a argamassa, durante 2 minutos;
- 5º. De seguida, parou-se a misturadora e realizou-se uma amassadura manual (durante 1 minuto) com a ajuda de uma colher de metal, por forma a retirar do fundo e das laterais da cuba possíveis sólidos que estivessem depositados;
- 6º. De seguida, acionou-se a misturadora (velocidade 1) por forma a realizar a amassadura durante mais 2 minutos, homogeneizando todos os materiais, obtendo assim uma argamassa uniforme;
- 7º. De seguida, desligou-se a misturadora e com a ajuda de uma colher raspam-se as laterais da cuba e envolveu-se a argamassa, para evitar que ficassem resíduos “agarrados” às laterais e garantir a homogeneização da argamassa;

8°. Deixou-se a argamassa “repousar”, dentro da cuba e tapada com um pano húmido, durante 5 minutos para verificar se ao fim dos 5 minutos ocorria ou não exsudação.

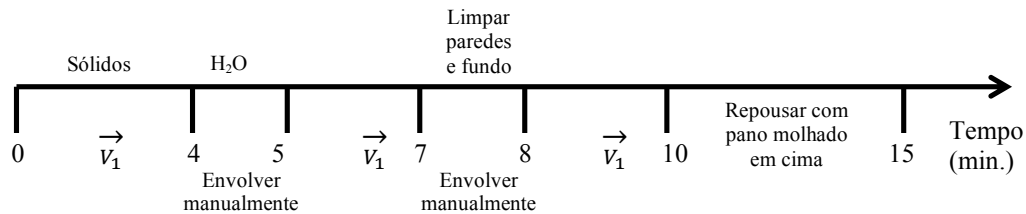


Figura 3.3 - Esquematização do procedimento de mistura das argamassas.

Antes dos ensaios realizados no estado fresco (Subcapítulo 3.5) e do enchimento e preparação das amostras no estado endurecido (Subcapítulo 3.6), a argamassa foi mexida com uma colher de metal, para evitar “falsa” presa.

3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

3.5.1 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de consistência, obtida por mesa de espalhamento, permite analisar a consistência da argamassa quando findo o seu processo de amassadura. A consistência está associada à fluidez da argamassa fresca e dá informação relativamente à deformabilidade da mesma.

Através deste ensaio pretende-se avaliar se os valores de espalhamento das argamassas estão dentro do intervalo definido de 165-175 mm (Subcapítulo 3.3). Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3:1999 [85].

▪ *Metodologia*

Na realização deste ensaio foram utilizados os equipamentos e os utensílios apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Equipamentos e utensílios usados no ensaio de consistência por espalhamento

Equipamentos	Utensílios
- Mesa de espalhamento	- Pano húmido
- Molde tronco-cônico	- Pilão de madeira
	- Colher de metal
	- Régua metálica

Como já foi mencionado na presente secção, deu-se início ao ensaio quando findo o processo de mistura da argamassa. Antes de se proceder ao ensaio propriamente dito, com a ajuda de um pano húmido humedeceu-se os bordos e o interior do molde tronco-cônico e a superfície da mesa de espalhamento. Esta etapa tem como objetivo eliminar possíveis poeiras que possam existir e permitir que a argamassa deslize livremente na superfície da mesa de espalhamento.

De seguida, colocou-se o molde tronco-cônico no centro da mesa de espalhamento e, segurando o molde firmemente nesta posição, colocou-se a argamassa com a ajuda de uma colher, até cerca de metade da sua capacidade (Figura 3.4.a). Posteriormente, procedeu-se à compactação da argamassa com a ajuda do pilão de madeira, efetuando 10 compactações na 1ª camada, no sentido horário (Figura 3.4.b). A fase seguinte consistiu em encher completamente o molde (2ª camada de argamassa), deixando um ligeiro excesso e, voltou-se a compactar com mais 10 compactações (Figura 3.4.c). Completo o processo de compactação, rasou-se ao nível do molde, com a ajuda de uma régua, o excesso da argamassa com um movimento de serra (Figura 3.4.d). Antes de retirar o molde limpou-se a superfície da mesa de espalhamento, para retirar possíveis fragmentos de argamassa que tenham caído durante o processo de alisamento da superfície. De seguida, retirou-se o molde na vertical (Figuras 3.4.e e 3.4.f) e submeteu-se a argamassa a uma tensão, que resulta da realização de 15 pancadas (durante, sensivelmente, 15 segundos), através da rotação do volante da mesa de espalhamento (Figura 3.4.g).

Com o auxílio da régua metálica, mediu-se o diâmetro de espalhamento da argamassa em duas direções perpendiculares, segundo dois eixos marcados na mesa (Figuras 3.4.h e 3.4.i).



Figura 3.4 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento. a) Enchimento da 1ª camada de argamassa; b) Compactação da 1ª camada com o pilão de madeira; c) Colocação da 2ª camada de argamassa; d) Regularização da superfície com régua metálica; e) Levantamento vertical do molde tronco-cônico; f) Aspeto final da argamassa após o molde ser retirado; g) Realização de 15 pancadas através da rotação do volante da mesa; h) Medição do diâmetro de espalhamento na direção 1; i) Medição do diâmetro de espalhamento na direção 2.

▪ ***Cálculo do diâmetro de espalhamento***

O valor da consistência obtida por espalhamento é calculado como sendo o resultado da média aritmética de duas leituras medidas ortogonalmente na argamassa, e é apresentado ao mm (Eq. 3.1).

$$d_m = \frac{d_i}{2} \text{ (mm)} \quad \text{(Eq. 3.1)}$$

onde,

d_m – diâmetro médio de espalhamento (mm);

d_i – diâmetro de espalhamento (mm), para $i=1$ e 2 .

Se os dois valores individuais dos ensaios desviarem da sua média menos de 10%, usa-se o valor da sua média como o valor da consistência por espalhamento. Caso os dois valores individuais desviem mais de 10% da sua média, repete-se o ensaio usando a mesma amostra de argamassa e, se as novas medições desviarem da sua média menos de 10%, utiliza-se o valor da média como o valor da consistência. Caso contrário, considera-se as medições insatisfatórias e volta-se a repetir o teste, com uma nova amostra de argamassa.

3.5.2 ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA

Este ensaio tem como objetivo avaliar a massa volúmica aparente da argamassa fresca. A massa volúmica das argamassas no estado fresco depende: da massa volúmica dos agregados, da cal hidráulica, do resíduo de FCC e do tipo de adjuvantes usados.

No ensaio de massa volúmica adotou-se o procedimento de ensaio descrito na norma EN 1015-6:1998 [86].

Este ensaio foi realizado após o ensaio de consistência (secção 3.5.1) e após verificação dos valores de espalhamento definidos (165-175 mm).

▪ *Metodologia*

Na realização deste ensaio foram utilizados os equipamentos e os utensílios apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Equipamentos e utensílios usados no ensaio de massa volúmica

Equipamentos	Utensílios
- Balança (Marca: OHAUS; modelo: E0RW60; Precisão: 0,1g)	- Régua metálica
- Recipiente de medição	- Colher de metal
	- Pano húmido

Antes de se iniciar o ensaio propriamente dito mexeu-se a argamassa com uma colher, durante 5 a 10 segundos, por forma a evitar falsa presa, mas sem que fosse introduzida qualquer mistura adicional à amostra. De seguida, limpou-se o recipiente (com capacidade de 0,75 l) com um pano húmido, para retirar possíveis poeiras, e pesou-se na balança. Posteriormente, encheu-se cerca de metade do recipiente com a ajuda de uma colher (Figura 3.5.a) e inclinou-se o recipiente cerca de 30 mm de altura, alternadamente de cada lado, deixando-o cair até perfazer 10 pancadas (Figura 3.5.b), garantindo assim a compactação da 1ª camada de argamassa. Após as 10 primeiras pancadas encheu-se o recipiente até cima, deixando um excesso, e voltou-se a repetir o mesmo procedimento de compactação (Figura 3.5.c). Após a compactação da 2ª camada de argamassa, rasou-se o topo do recipiente com o auxílio de uma régua (Figura 3.5.d), e limparam-se os bordos e o exterior do recipiente para eliminar possíveis resíduos de argamassa, que resultaram do processo de alisamento da superfície (Figura 3.5.e).

Imediatamente, após os processos anteriormente descritos, pesou-se o recipiente cheio com argamassa e registou-se o valor medido (Figura 3.5.f).



Figura 3.5 – Fases do ensaio da Massa Volúmica. a) Enchimento da 1ª metade do recipiente; b) Compactação da 1ª camada de argamassa; c) Compactação da 2ª camada de argamassa; d) Alisamento da superfície; e) Aspetto final após alisamento; f) Pesagem do recipiente cheio de argamassa.

▪ **Cálculo da massa volúmica**

A massa volúmica da argamassa no estado fresco é calculada através do quociente entre a massa de uma amostra de argamassa e o volume do recipiente, já conhecido (Eq. 3.2).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(Eq.3.2)}$$

onde,

ρ – massa volúmica da argamassa fresca (kg/m³);

m_1 – massa do recipiente vazio (kg);

m_2 – massa do recipiente cheio com argamassa (kg);

V_v – volume do recipiente (m³).

3.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.6.1 MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CONDIÇÕES DE CURA DAS AMOSTRAS

Esta secção apresenta os procedimentos de moldagem e desmoldagem das amostras de argamassas usadas nos ensaios no estado endurecido, assim como as respetivas condições de cura a que estiveram submetidas até ao dia dos ensaios. Nesta campanha experimental foram usados dois tipos de amostras, sujeitas ao processo de moldagem e desmoldagem, consoante o tipo de ensaio no estado endurecido: amostras prismáticas (Subsecção 3.6.1.1) e amostras cilíndricas (Subsecção 3.6.1.2).

3.6.1.1 AMOSTRAS PRISMÁTICAS

As amostras prismáticas (dimensões 40x40x160 mm³) foram usadas nos seguintes ensaios realizados no estado endurecido: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (Secção 3.6.2), resistência mecânica à flexão e à compressão (Secção 3.6.3), avaliação da profundidade de carbonatação (Secção 3.6.4), absorção de água por capilaridade (Secção 3.6.5) e secagem (Secção 3.6.6).

Para as condições de moldagem, desmoldagem e de cura das amostras prismáticas, usadas nos ensaios acima descritos, foi adotado o procedimento descrito na norma EN 1015-2:1998 [87].

▪ *Metodologia*

Na realização dos processos de moldagem e desmoldagem das amostras prismáticas foram utilizados os utensílios e produtos expostos no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Utensílios e produtos usados na moldagem e desmoldagem das amostras prismáticas (40x40x160 mm³)

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- N/A	- Pilão de madeira - Pincel - Régua metálica - Colher de metal - Martelo - Moldes prismáticos	- Descofrante universal (SIKA)

Inicialmente, antes da colocação da argamassa no molde, aplicou-se o descofrante, com a ajuda de um pincel, em todas as faces de contacto do molde com a argamassa (Figura 3.6.a). A 1ª camada de argamassa foi colocada em cada compartimento do molde, com a ajuda de uma colher, até cerca de metade da altura do mesmo (Figuras 3.6.b e 3.6.c). Com a ajuda de um pilão de madeira procedeu-se à compactação manual da 1ª camada de argamassa, que é obtida após 25 pancadas com o pilão (sentido horário) na argamassa (Figura 3.6.d). Os processos de colocação e compactação da 2ª camada de argamassa efetuaram-se da mesma forma dos da 1ª camada (Figuras 3.6.e e 3.6.f), não esquecendo que se deve deixar sempre um excesso de argamassa na colocação da 2ª camada. A regularização da superfície do molde foi efetuada com o auxílio de uma régua metálica com o objetivo de rasar o molde. O processo de rasamento/alisamento foi feito com um movimento de serragem, a partir do meio do molde para o seu exterior (Figura 3.6.g). Após a regularização da superfície do molde, este deve ficar com aspeto liso e isento de outros materiais (Figura 3.6.h).

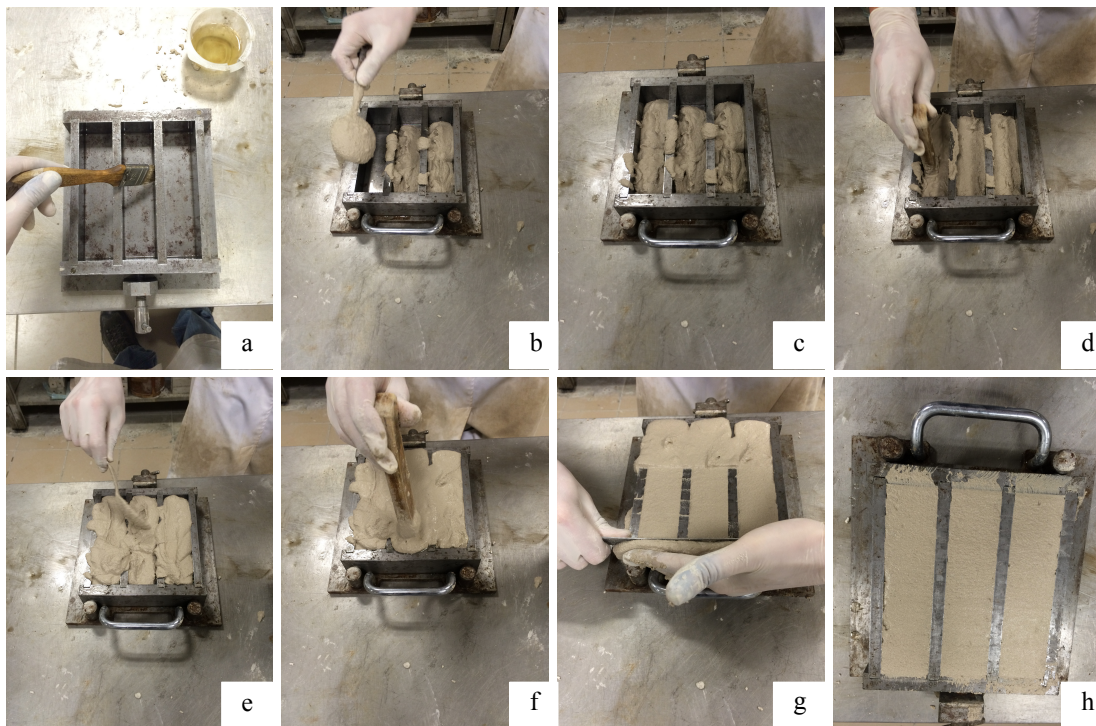


Figura 3.6 - Moldagem das amostras prismáticas (40x40x160 mm³). a) Colocação do descofrante; b) Colocação da 1ª camada de argamassa; c) Aspeto após colocação da 1ª camada; d) Compactação da 1ª camada de argamassa; e) Colocação da 2ª camada de argamassa; f) Compactação da 2ª camada; g) Regularização da superfície; h) Aspeto final das amostras prismáticas.

Imediatamente após o processo de enchimento do molde prismático, iniciou-se o processo de cura das amostras. O processo de cura consistiu em colocar o molde dentro de um saco plástico resistente e depois colocar o molde dentro da câmara de cura, que se encontrava à temperatura de 20 ± 2 °C e com humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

As amostras foram mantidas dentro do molde e do saco durante de 7 dias (Figura 3.7.a). O desmolde foi feito com recurso a um martelo, por forma a deslocar as partes metálicas do molde das amostras. Este processo de desmoldagem foi feito com o máximo cuidado possível, para evitar danificar as amostras. Após desmoldagem, as amostras foram colocadas novamente dentro da câmara de cura, nas mesmas condições de temperatura e humidade, até ao dia do ensaio (Figura 3.7.b).

Na fase preliminar desta campanha fizeram-se os desmoldes ao fim de 2 dias de cura, no entanto, e após desmoldagem das amostras de argamassas que continham adjuvantes na sua composição, verificou-se que estas ainda não se encontravam suficientemente endurecidas para se proceder ao desmolde. As amostras ficavam agarradas ao molde e desfaziam-se facilmente durante o processo de desmoldagem e, por isso, optou-se por fazer o desmolde ao fim de 7 dias de cura.

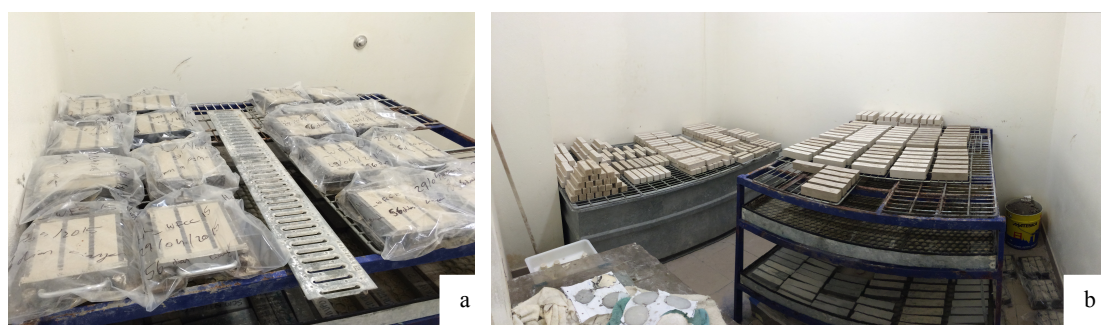


Figura 3.7 - Condições de cura das amostras. a) Moldes dentro de sacos plásticos na câmara de cura, até ao fim de 7 dias de cura; b) Amostras mantidas em condições de cura até ao dia do ensaio.

O Quadro 3.10 apresenta o número de amostras prismáticas realizadas para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e avaliação da profundidade de carbonatação, de cada argamassa em cada idade de hidratação.

Quadro 3.10 - Número de amostras prismáticas realizadas para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e avaliação da profundidade de carbonatação, para cada argamassa em cada idade de hidratação

Série	Argamassas	Idades dos ensaios (dias)		
		28	56	91
		nº amostras	nº amostras	nº amostras
s/adjuvantes	HL_wFCC0	6	6	6
	HL_wFCC5	6	6	6
	HL_wFCC10	6	6	6
	HL_wFCC15	6	6	6
Hid	HL_wFCC0_Hid	6	6	6
	HL_wFCC5_Hid	6	6	6
	HL_wFCC10_Hid	6	6	6
	HL_wFCC15_Hid	6	6	6
0.5Hid	HL_wFCC0_0,5Hid	6	6	8*
	HL_wFCC5_0,5Hid	6	6	9*
	HL_wFCC10_0,5Hid	6	6	9*
	HL_wFCC15_0,5Hid	6	6	8*
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	6	6	6
	HL_wFCC5_0Hid	6	6	4*
	HL_wFCC10_0Hid	6	6	6
	HL_wFCC15_0Hid	6	6	6

*Ver explicação no parágrafo seguinte.

A série 0.5Hid apresenta, aos 91 dias, um maior número de amostras que as outras séries, uma vez que, inicialmente, se tinha decidido realizar 9 amostras⁷ por cada composição de argamassa, com desmolde ao fim de 2 dias de cura. No entanto, o desmolde teve que ser feito ao fim de 7 dias de cura, como já foi explicado na presente subsecção, optando-se por realizar 6 amostras por cada argamassa, devido ao tempo e ao equipamento disponível. Aquando da decisão do desmolde ao fim de 7 dias, as amostras da série 0.5Hid já se encontravam na câmara de cura. Assim, optou-se por utilizar todas as amostras disponíveis nos ensaios do estado endurecido. As composições HL_wFCC0_0,5Hid e HL_wFCC15_0,5Hid apresentam, aos 91 dias, 8 amostras cada uma devido a problemas no desmolde, em que uma amostra se partiu. O mesmo aconteceu com a composição HL_wFCC5_0Hid.

⁷ Inicialmente tinha-se planeado realizar 9 amostras prismáticas por cada composição de argamassa uma vez que, tipicamente, as argamassas de cal hidráulica apresentam alguma dispersão nos resultados obtidos nos ensaios. Assim, pretendia-se obter uma melhor amostragem e reduzir a dispersão dos valores obtidos.

Relativamente aos ensaios de capilaridade e de secagem, foram testadas as características das argamassas aos 28 e 91 dias de hidratação em 6 amostras para cada argamassa em cada idade.

3.6.1.2 AMOSTRAS CILÍNDRICAS

As amostras cilíndricas (com 15 cm de diâmetro e 1 cm de espessura) foram usadas apenas num único ensaio no estado endurecido: no ensaio de permeabilidade à água líquida (Secção 3.6.7).

Ao contrário das amostras prismáticas, para as condições de moldagem, desmoldagem e de cura das amostras cilíndricas, não foi possível seguir nenhum procedimento normativo. No entanto, e dependentes das condições logísticas do laboratório, tentou-se que as amostras cilíndricas seguissem um procedimento de cura semelhante ao das amostras prismáticas (Subsecção 3.6.1.1) e que fossem preparadas de acordo com o descrito na norma NP EN 1015-19:2000 [88].

▪ *Metodologia*

Os utensílios utilizados na preparação das amostras cilíndricas de argamassa são descritos no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Utensílios utilizados na preparação das amostras cilíndricas de argamassa

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- N/A	- Régua metálica - Colher de metal - Molde cilíndrico de plástico	- N/A

Findo o processo de mistura, realizado de acordo com o descrito no subcapítulo 3.4, a argamassa foi colocada no interior do molde (Figura 3.8.a) e espalhada pelo interior do mesmo, com a ajuda de uma colher de metal (Figura 3.8.b). Após o enchimento do molde, com o auxílio de uma régua metálica, procedeu-se à regularização da superfície da amostra (Figura 3.8.c). A regularização deve ser feita com um movimento de serragem e inclinada ligeiramente para compactar a argamassa no

molde. De seguida, procedeu-se à remoção do molde que ficou, assim, disponível para a preparação de outras amostras cilíndricas (Figura 3.8.d). As amostras de argamassa foram colocadas na câmara de cura, onde ficaram sujeitas a uma temperatura de 20 ± 2 °C e a uma humidade de $55 \pm 5\%$ até ao dia do ensaio.



Figura 3.8 - Fases da preparação das amostras cilíndricas de argamassa para o ensaio de permeabilidade à água líquida. a) Colocação da argamassa no molde de plástico; b) Espalhamento da argamassa; c) Alisamento da superfície da amostra; d) Desmoldagem da amostra.

O Quadro 3.12 apresenta o número de amostras cilíndricas usadas no ensaio de permeabilidade à água líquida para cada argamassa em cada idade de hidratação.

Quadro 3.12 – Número de amostras cilíndricas usadas no ensaio de permeabilidade à água líquida, para cada argamassa em cada idade de hidratação

Ensaio	Idade do ensaio (dias)	
	28	91
	n° amostras	n° amostras
Permeabilidade à água líquida	4	4

3.6.2 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um ensaio não destrutivo que consiste em emitir uma onda ultrassônica e registrar o tempo que essa onda demora a percorrer as extremidades da amostra prismática (com 160 mm de comprimento). Este ensaio permite avaliar, indiretamente, as propriedades mecânicas dos materiais sem os danificar fisicamente, e permite detetar a existência, ou não, de descontinuidades ou anomalias internas, uma vez que a velocidade de propagação é determinada pelo tempo que a onda ultrassônica demora a percorrer uma determinada distância. Através deste ensaio podemos avaliar indiretamente a densidade do material, uma vez que quanto maior for a velocidade de propagação das ondas, teoricamente, mais denso é o material e, conseqüentemente, maior será a resistência mecânica do mesmo. Assim sendo, é possível relacionar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com a resistência mecânica do material. Com este ensaio é possível, também, estimar o módulo de deformação dinâmico das argamassas e, assim, verificar a capacidade das mesmas para absorverem deformações do suporte sem fissurarem. Quanto menor o módulo de deformação maior será, teoricamente, a capacidade das argamassas para absorverem deformações sem fissurarem.

A velocidade de propagação das ondas depende de vários fatores como: o tipo de ligante usado na argamassa, a composição da própria argamassa, idade da argamassa e do equipamento de ensaio.

No ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas adotou-se o procedimento de ensaio descrito na norma ABNT NBR 15630:2008 [89].

▪ **Metodologia**

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado aos 28, 56 e 91 dias de hidratação.

Os equipamentos, utensílios e produtos utilizados na realização deste ensaio encontram-se presentes no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados na realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Equipamentos	Utensílios	Produtos
-Aparelho de ultrassons (Marca: Proceq; Modelo: TICO)	- Espátula	- Vaselina sólida

Na data do ensaio as amostras foram retiradas da câmara de cura, com a ajuda de um tabuleiro, e foram pesadas na balança com precisão de 0,01g (Figura 3.9.a). Após a pesagem, as amostras foram transportadas no tabuleiro até ao local onde se encontra o aparelho de ultrassons.

O aparelho de medição foi ligado e realizou-se a calibração do mesmo usando uma barra de referência (Figura 3.9.b). Esta calibração consiste em colocar os transdutor-emissor e transdutor-recetor das ondas ultrassônicas nos topos mais distantes da barra de referência e verificar que o tempo percorrido pelo impulso elétrico de frequência ultrassônica 45 kHz, entre o emissor e o recetor, foi igual a 21 μs (valor definido pelo fabricante do aparelho). A ligação dos transdutores à barra de referência foi realizada através da aplicação de vaselina sólida nas extremidades da barra.

Findo o processo de calibração do aparelho deu-se início ao ensaio propriamente dito. O ensaio consistiu, primeiramente, em colocar a vaselina nas extremidades da amostra, por forma a garantir aderência entre as extremidades da amostra e os

transdutores (Figura 3.9.c). De seguida, colocaram-se os transdutores nas extremidades mais distantes da amostra, fazendo movimentos circulares para que estes ficassem “colados” às extremidades. Acionou-se o botão para o equipamento emitir um impulso elétrico de frequência ultrassónica 45 (kHz) e registou-se o tempo, em μs , que a onda demorou a percorrer a amostra com 160 mm de comprimento (Figura 3.9.d).



Figura 3.9 - Fases do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. a) Pesagem das amostras; b) Calibração do aparelho; c) Aplicação da vaselina nas extremidades da amostra; d) Medição do tempo que a onda ultrassónica demora a propagar-se entre o transdutor-emissor e o transdutor-receptor.

▪ **Cálculo da velocidade de propagação**

O cálculo da velocidade de propagação da onda ultrassónica é dado pelo quociente entre o comprimento da amostra e o tempo de propagação da onda ultrassónica entre as extremidades da amostra (Eq.3.3).

$$v = \frac{L}{t} \text{ (mm}/\mu\text{s)} \quad \text{(Eq.3.3)}$$

onde,

v – velocidade de propagação da onda ultrassónica, em mm/ μ s;

L – distância entre os transdutores (emissor e recetor), em mm;

t – tempo registado pelo aparelho, em μ s.

Foram realizadas as leituras necessárias até se obterem 2 leituras consecutivas na mesma amostra com diferença não superior a 0,5 μ s, registando-se essas duas leituras. Sendo que, sempre que se fez uma leitura ajustaram-se os transdutores às extremidades da amostra.

Após o ensaio, foi retirado o excesso de vaselina das amostras e, assim, estas puderam ser usadas nos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão (Secção 3.6.3).

3.6.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO

Os ensaios de avaliação da resistência mecânica à flexão e à compressão das argamassas são ensaios destrutivos sobre as amostras. Estes ensaios consistem em aplicar, gradualmente, uma força externa às amostras prismáticas até à rotura.

Em concreto, o ensaio de resistência à flexão consiste em aplicar, gradualmente, uma força a meio vão da amostra até esta atingir a rotura, dando origem a duas metades da amostra. O valor da carga máxima registado pelo aparelho de ensaio, antes da rotura, é usado no cálculo da resistência à flexão das argamassas. As metades da amostra, resultantes do ensaio à flexão, são depois usadas no ensaio de resistência à compressão, onde lhes é aplicada uma força de compressão até estas atingirem a

rotura. É importante referir que as metades das amostras resultantes do ensaio à flexão, antes de serem ensaiadas à compressão, são testadas no ensaio de avaliação da profundidade de carbonatação, como será descrito na secção 3.6.4.

Nos ensaios de resistência à flexão e à compressão adotaram-se os procedimentos de ensaios descritos na norma EN 1015-11 [90].

▪ **Metodologia**

O ensaio de resistência à flexão e o ensaio de resistência à compressão foram realizados aos 28, 56 e 91 dias de hidratação em amostras prismáticas (Subsecção 3.6.1.1).

Os equipamentos e utensílios utilizados nos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão encontram-se descritos no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 – Equipamentos e utensílios utilizados nos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Equipamento de ensaio de resistências mecânicas (flexão e compressão) - HOYTOM 07M6498.1 (Figura 3.10.a)	- Escova	- N/A

Como já foi mencionado na secção 3.6.2, as amostras usadas no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas são as mesmas usadas para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão. Assim sendo, no que respeita ao ensaio de resistência à flexão, as amostras foram colocadas sobre dois apoios metálicos, afastados 100 mm, sempre com as faces laterais de moldagem perpendicular aos apoios (Figura 3.10.b). Isto para evitar possíveis irregularidades existentes na face da amostra que fica exposta no molde. Impôs-se a descida do cutelo, que aplica a força a meio vão, até este ficar quase em contacto com a amostra (Figura 3.10.c). De seguida, desceu-se o cutelo, que aplicou uma carga gradual crescente, até se atingir a rotura da amostra (Figura 3.10.d) e registou-se o valor da tensão de rotura, em Newton (N). Este procedimento foi feito para todas as amostras. Foi tida em atenção a necessidade

de limpar o aparelho de ensaio com uma escova, entre ensaios, para evitar interferências de resultados.

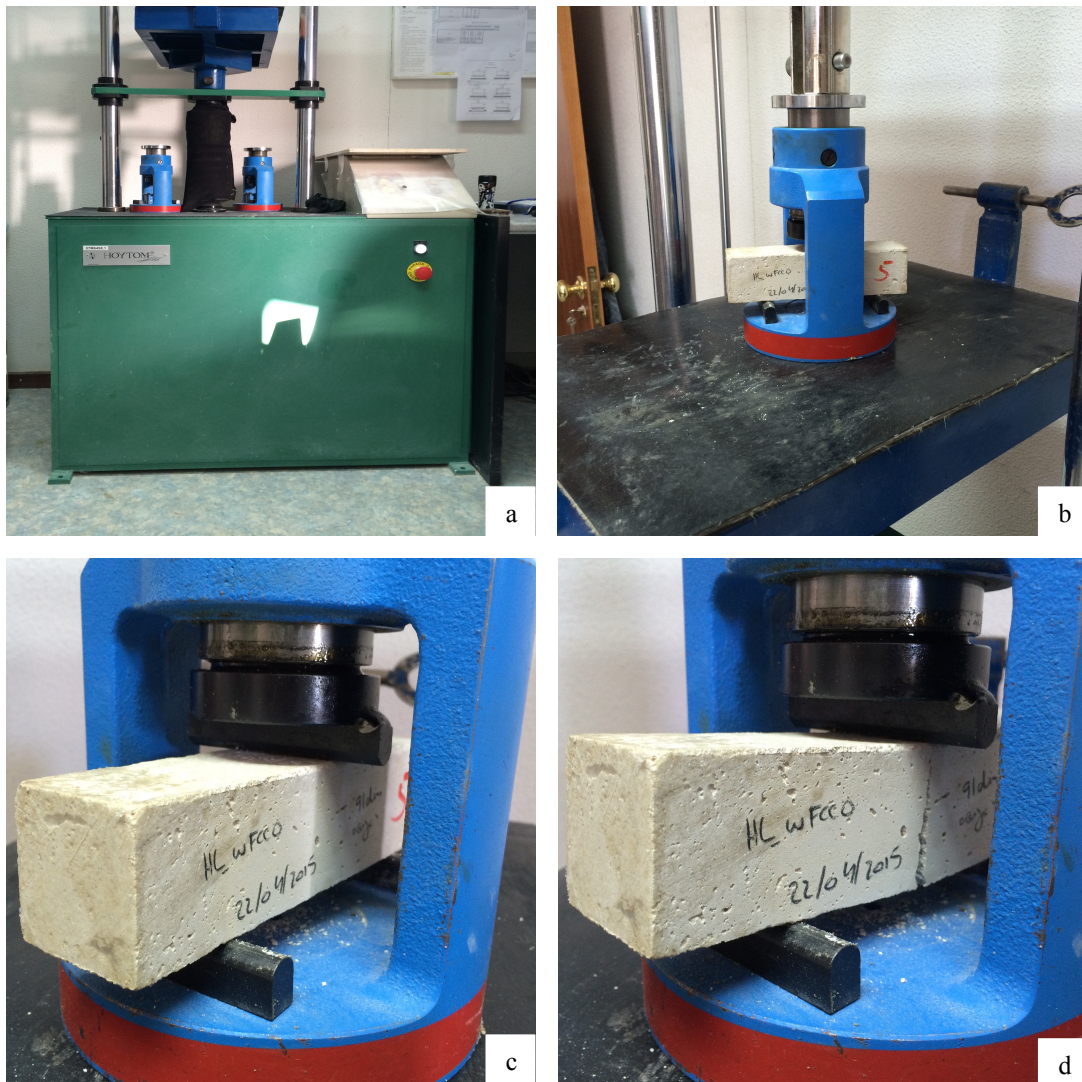


Figura 3.10 – Fases do ensaio da resistência mecânica à flexão. a) Equipamento de ensaio de resistência mecânica; b) Colocação da amostra sobre os apoios metálicos; c) Colocação da amostra para dar início ao ensaio; d) Aplicação de uma carga gradual crescente até se atingir a rotura.

▪ *Cálculo da resistência à flexão*

O valor da tensão de rotura à flexão é dado pelo quociente do produto da carga máxima aplicada e a distância entre os apoios metálicos, com as dimensões laterais da amostra (largura e espessura) (Eq. 3.4). O valor da resistência à flexão de cada amostra é arredondado a $0,05 \text{ N/mm}^2$ e o valor de resistência à flexão da argamassa é

a média dos valores obtidos com as várias amostras de cada composição, arredondada a 0,1 N/mm².

$$R_f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (\text{Eq.3.4})$$

onde,

R_f – resistência à flexão (N/mm² ou MPa);

F – força máxima aplicada à amostra (N);

l – distância entre os apoios metálicos (mm);

b – largura da amostra (mm);

d – espessura da amostra (mm).

As metades das amostras, antes de serem submetidas a avaliação no ensaio à compressão, foram avaliadas com o ensaio de fenolftaleína (Secção 3.6.4). Após o ensaio de resistência à flexão e de avaliação da profundidade de carbonatação, as metades das amostras são testadas no ensaio de resistência à compressão. O ensaio de resistência mecânica à compressão consistiu em colocar as metades das amostras sobre o prato inferior do equipamento e fazer descer o cutelo de ensaio até este ficar praticamente em contacto com a metade da amostra (Figura 3.11.a). De seguida, acionou-se o equipamento de ensaio que aplicou uma força gradual e crescente sobre a metade da amostra, até esta atingir a rotura (Figura 3.11.b). Por fim, registou-se o valor, em N, relativo à força máxima aplicada antes da rotura.

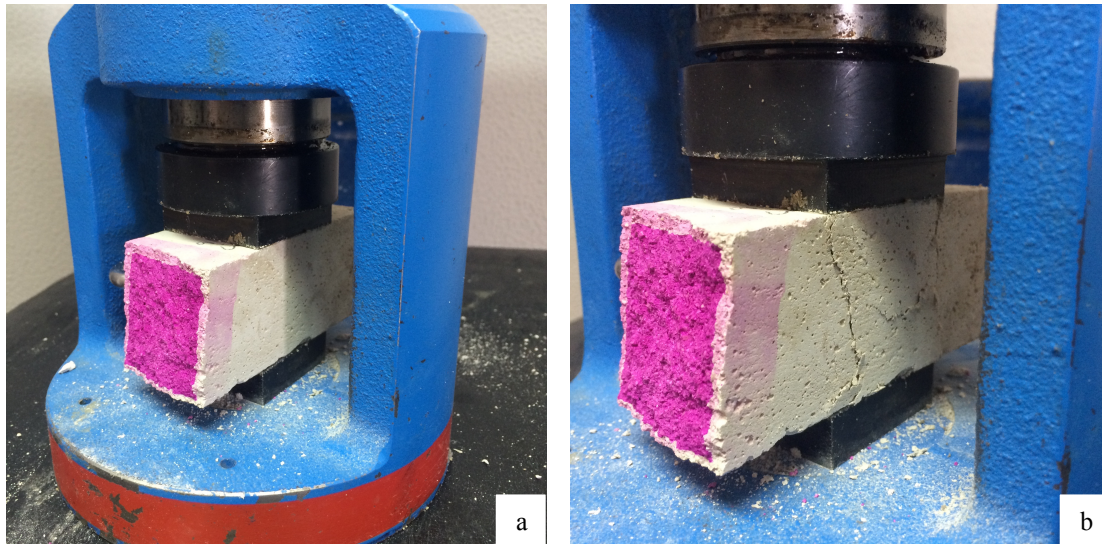


Figura 3.11 – Fases do ensaio de resistência mecânica à compressão. a) Posicionamento da amostra no aparelho de ensaio; b) Aplicação da carga gradual e crescente até à rotura da amostra.

▪ *Cálculo da resistência à compressão*

O valor da tensão de rotura à compressão é dado pelo quociente entre a força máxima aplicada à amostra e a área da secção transversal da amostra onde é aplicada a força (Eq. 3.5). O valor da resistência à compressão de cada amostra é arredondado a $0,05 \text{ N/mm}^2$ e o valor de resistência à compressão da argamassa é a média dos valores obtidos com as várias amostras de cada composição, arredondada a $0,1 \text{ N/mm}^2$.

$$R_c = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad \text{(Eq.3.5)}$$

onde,

R_c – resistência à compressão (N/mm^2 ou MPa);

F – força máxima aplicada à amostra (N);

A – área onde a força é aplicada (mm^2).

3.6.4 AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A avaliação da profundidade de carbonatação das argamassas consiste na aplicação de um indicador de pH, uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%. Como já foi abordado anteriormente na secção 3.6.3, as metades das amostras resultantes do ensaio de flexão são usadas neste ensaio aplicando nas suas faces a solução alcoólica

de fenolftaleína. A face da amostra que é ensaiada é a face resultante da separação da amostra, ou seja, onde se deu a rotura por flexão (Figura 3.12.a).

Ao aplicar a solução de fenolftaleína sobre a amostra, esta indicará a profundidade de carbonatação, mudando de cor (roxo/rosa) nas zonas não carbonatadas (Figura 3.12.a) e não alterando a sua cor nas zonas carbonatadas (Figura 3.12.b).

O dióxido de carbono, presente no ar, penetra nos poros da argamassa e reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio e água (Eq. 3.6). Este processo é acompanhado pela redução da alcalinidade das argamassas.

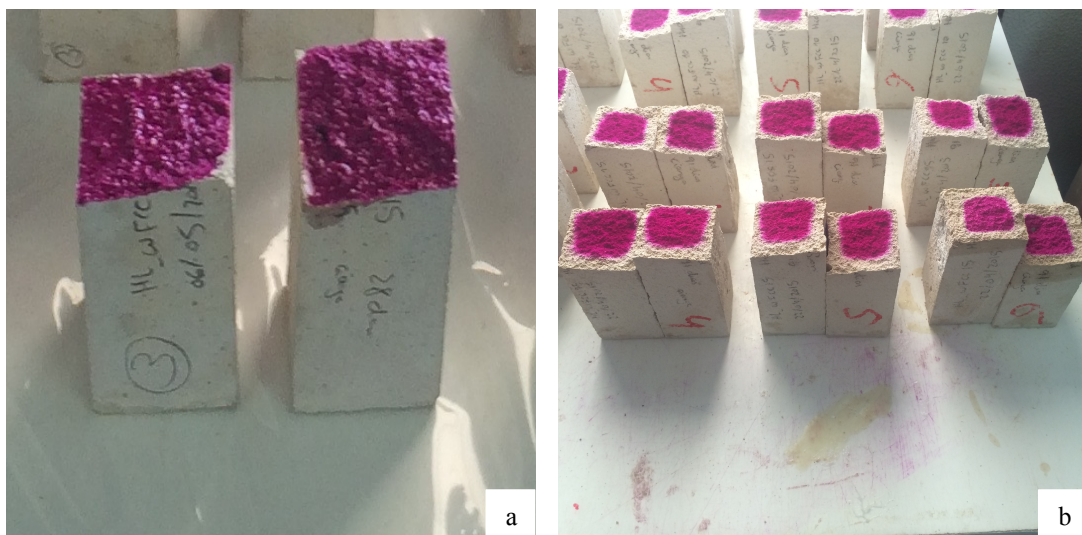
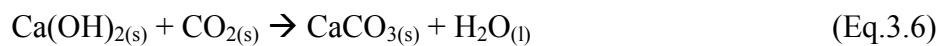


Figura 3.12 – Fotos da avaliação da profundidade de carbonatação. a) Faces da amostra, em que se deu a rotura, sem áreas de carbonatação; b) Faces da amostra com áreas carbonatadas.

▪ *Metodologia*

A avaliação da profundidade de carbonatação foi realizada ao fim de 28, 56 e 91 dias de idade, onde foram avaliadas as características das argamassas sobre 12 semi-amostras, resultantes do ensaio à flexão.

A profundidade de carbonatação de cada semi-amostra foi medida perpendicularmente à superfície da mesma, com o auxílio de um paquímetro. Assim

sendo, a profundidade de carbonatação é a média das medições realizadas em cada uma das quatro arestas da semi-amostra.

3.6.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade consiste em submeter as argamassas ao contacto com água durante um determinado período de tempo. Este ensaio permite avaliar, indiretamente, a porosidade das argamassas, uma vez que quanto mais porosa for a argamassa mais facilidade a água tem em se movimentar entre os poros da argamassa e, assim, contribuir para a degradação global da argamassa.

Na realização deste ensaio foi adotado o procedimento descrito na norma EN1015-18:2002 [91].

▪ *Metodologia*

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado ao fim de 28 e 91 dias de idade, em 6 semi-amostras, resultantes do corte a meio vão de 3 amostras prismáticas.

Os equipamentos, utensílios e produtos utilizados na realização deste ensaio encontram-se discriminados no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Balança (marca: Kern; modelo: PFB 300-3; precisão de 0,001g)	- Régua	- Água da torneira
- Estufa	- Tabuleiros de plástico e alumínio	- Impermeabilizante SIKA
- Máquina de corte	- Papéis de limpeza	
- Cronómetro	- Esponja	

A preparação do ensaio foi iniciada uma semana antes do mesmo. As amostras foram retiradas da estufa e cortadas, sensivelmente a meio, na máquina de corte com serra de água (Figura 3.13.a). Após cortadas, foram colocadas na estufa a 65 °C (Figura 3.13.b) até adquirirem massa constante, ou seja, a diferença de massa entre

duas pesagens consecutivas, no intervalo de 24 h, não pôde exceder 0,2 % da massa do dia anterior. Depois de adquirirem massa constante, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas a arrefecer no exsicador (Figura 3.13.c). Após arrefecerem, foram impermeabilizadas com a ajuda de uma esponja, aplicando um produto impermeabilizante SIKA (Figura 3.13.d). À face da amostra que ficou em contacto com a água não lhe foi aplicada o produto. Feita a impermeabilização deixou-se secar o produto e voltaram-se a colocar as amostras dentro do exsicador até ao dia do ensaio.



Figura 3.13 - Preparação das amostras para o ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Corte das amostras; b) Secagem das amostras na estufa; c) Arrefecimento das amostras no exsicador; d) Impermeabilização das amostras.

No dia do ensaio as amostras foram retiradas do exsicador e pesadas na balança (Figura 3.14.a), antes de serem colocadas em contacto com água, obtendo assim a massa seca das mesmas (M_0). Após esta pesagem, as amostras foram colocadas dentro dos tabuleiros (Figura 3.14.b), ficando imersas com água até à altura entre os 5 a 10 mm (Figura 3.14.b) e tapadas para evitar que ocorresse secagem e interferências do ambiente exterior (Figura 3.14.c).

Em intervalos de tempo regulares, durante um período de 7 dias, as amostras foram retiradas do tabuleiro, secas com papéis de limpeza e pesadas. No 1º dia, as pesagens foram feitas ao fim de: 0 min (obteve-se a massa seca das amostras – M_0), 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 7 h, 8 h, das amostras estarem em contacto com a água. A partir do 2º dia e até ao 5º dia de ensaio, foram feitas pesagens de 24 h em 24 h. A última pesagem foi feita ao fim de 7 dias, último dia de ensaio e primeiro dia do ensaio de secagem, que será abordado na secção 3.6.6. Isto é, a pesagem realizada no 7º dia do ensaio de absorção de água por capilaridade é a mesma pesagem realizada no 1º dia do ensaio de secagem.

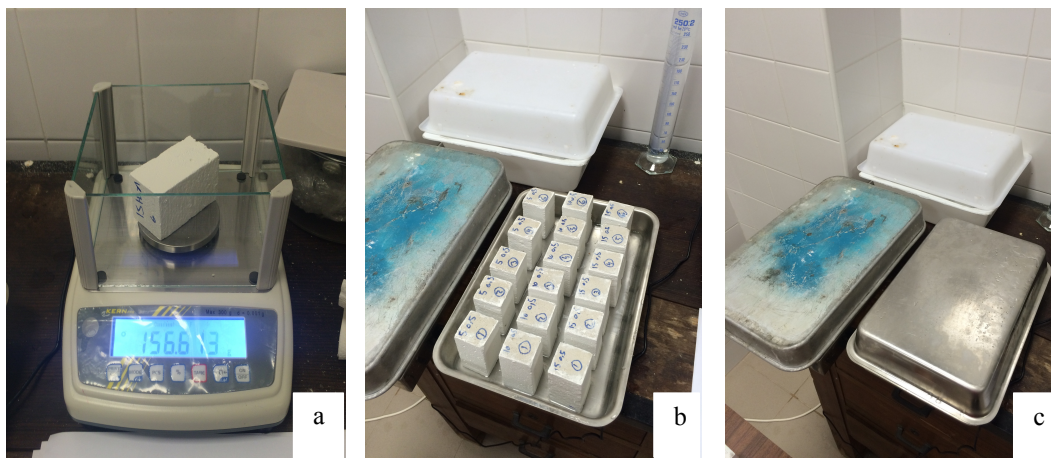


Figura 3.14 – Fases do ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Pesagem inicial das amostras; b) Colocação das amostras nos tabuleiros com água; c) Proteção e condições das amostras entre pesagens.

▪ *Cálculo da absorção de água por capilaridade*

A absorção de água por capilaridade é calculada pela diferença de massa da amostra que esteve, durante um determinado período de tempo, em contacto com a água e a massa da amostra seca (M_0), dividida pela área da amostra em contacto com a água (Eq. 3.7).

$$M = \frac{M_i - M_0}{A} \text{ (Kg/m}^2\text{)} \quad \text{(Eq. 3.7)}$$

onde,

M – quantidade de água absorvida (Kg/m^2);

M_i – massa da amostra no instante de pesagem i (Kg);

M_0 – massa da amostra seca no instante $t=0$ min (Kg);

A – área da amostra em contacto com a água (m^2).

O coeficiente de absorção capilar foi determinado recorrendo ao declive das retas, dos troços iniciais do gráfico (valores compreendidos entre os tempos 0 min e 5 h), que unem os pontos das medições das absorções capilares. No entanto, a norma EN 1015-18:2002 [91] refere que os valores dos coeficientes de capilaridade devem ser calculados segundo a equação (Eq. 3.8):

$$C = 0,1(M_2 - M_1) \text{ [Kg/(m}^2\text{.min}^{0.5}\text{)]} \quad (\text{Eq.3.8})$$

onde,

C – coeficiente de absorção de água por capilaridade [Kg/(m².min^{0.5})];

M_1 – massa da amostra ensaiada aos 10min (Kg);

M_2 – massa da amostra ensaiada aos 90min (Kg);

0,1 – (m².min^{0.5})⁻¹.

A escolha de determinar o coeficiente de absorção capilar recorrendo ao declive das retas prende-se com o facto de que através deste processo se consegue incluir mais pontos, o que leva a um maior rigor e a uma melhor perceção da evolução da absorção de água por capilaridade por parte de cada argamassa estudada.

3.6.6 ENSAIO DE SECAGEM

O ensaio de secagem tem como objetivo avaliar a capacidade que as diferentes argamassas têm em libertar a água absorvida durante o ensaio de absorção de água por capilaridade. Assim sendo, este ensaio tem início no último dia do ensaio de capilaridade, ou seja, ao 7º dia do mesmo, como já foi referenciado na secção 3.6.5.

▪ *Metodologia*

O ensaio de secagem foi realizado ao fim de 28 e 91 dias de hidratação. Este ensaio foi realizado nas mesmas argamassas do ensaio de absorção de água por capilaridade (Secção 3.6.5).

Os equipamentos e utensílios usados no ensaio de secagem encontram-se expostos no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 – Equipamentos e utensílios usados no ensaio de secagem

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Balança (marca: Kern; modelo: PFB 300-3; precisão de 0,001g)	- Tabuleiros de plástico e alumínio	- N/A

Neste ensaio pretende-se avaliar o tempo de secagem das amostras durante o mesmo período a que estas foram avaliadas no ensaio de absorção por capilaridade, ou seja, durante 7 dias. Assim sendo, inicialmente, e devido ao facto de não haver alterações significativas nas medições das massas das argamassas, optou-se por efetuar pesagens todos os dias (exceto ao 5º e 6º dia por questões logísticas) e com intervalos de 24 h. No 7º dia fez-se a última pesagem.

Como se pretendeu obter resultados com o maior rigor possível decidiu-se prolongar as pesagens das amostras, para além do 7º dia, até estas começarem a ficar com massa constante entre pesagens. Uma vez que as diferentes séries de argamassas têm comportamentos diferentes de secagem ao longo do tempo, as medições não foram feitas todas nos mesmos dias. As medições foram realizadas conforme a evolução da secagem das amostras de argamassas das diferentes séries.

A primeira pesagem ($t=0$ min) do ensaio de secagem coincide com a última pesagem do ensaio de capilaridade. A partir do instante $t=0$ min, as pesagens (Figura 3.15.a) são efetuadas conforme o descrito nos parágrafos acima referidos. Entre os intervalos de pesagens, as amostras são mantidas nos tabuleiros e nas mesmas condições a que estiveram sujeitas durante o ensaio de capilaridade, mas sem estarem tapadas (Figura 3.15.b).

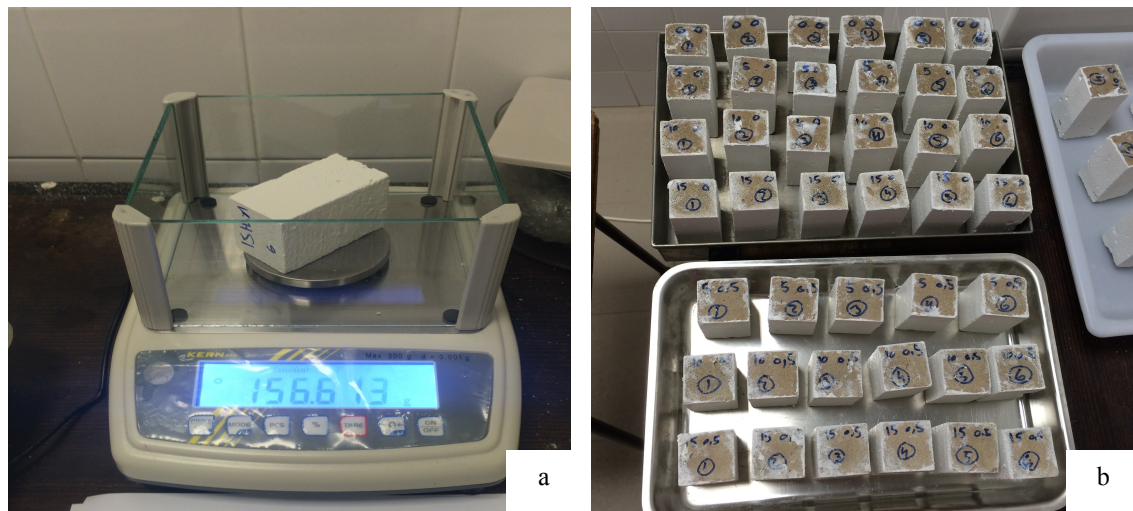


Figura 3.15 - Fases do ensaio de secagem. a) Pesagem das amostras; b) Condições das amostras entre pesagens.

▪ **Cálculo da secagem**

A avaliação da secagem das amostras é feita através do teor em água das mesmas. O valor do teor em água das amostras relaciona a massa das amostras no instante i com a massa das amostras seca e é expresso em percentagem (Eq. 3.9).

$$W_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} * 100 (\%) \quad (\text{Eq.3.9})$$

onde,

W_i – teor em água (%);

M_i – massa da amostra no instante i (kg);

M_0 – massa da amostra seca, 1ª pesagem ($t = 0$ min) do ensaio de capilaridade (kg).

3.6.7 ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA LIQUÍDA

O ensaio de permeabilidade à água líquida ou ensaio do tubo de Karsten consiste em aferir a porosidade das argamassas. A permeabilidade define-se pela aptidão que os materiais têm em se deixarem atravessar por um fluido, quando sujeito a um gradiente de pressão. Este ensaio é realizado com um tubo de Karsten, cheio com água, que fica em contacto direto com o material, criando-se uma determinada pressão. A avaliação da porosidade da argamassa é feita a partir da quantidade de água absorvida por uma determinada superfície da amostra de argamassa, após um determinado período de

tempo. Quanto mais compacto for o material, teoricamente, menor será a permeabilidade à água líquida.

▪ **Metodologia**

O ensaio de permeabilidade à água líquida foi realizado ao fim de 28 e 91 dias de idade, onde foram avaliadas as propriedades das argamassas sobre 4 amostras cilíndricas (Subsecção 3.6.1.2 – Quadro 3.12).

Os equipamentos, utensílios e produtos usados na realização deste ensaio encontram-se descritos no Quadro 3.17.

Quadro 3.17 – Equipamentos, utensílios e produtos usados no ensaio de permeabilidade à água líquida

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Cronómetro	- Tubo de Karsten graduado de 4cm ³ de capacidade	- Água - Plasticina - Silicone

O ensaio de permeabilidade à água líquida consiste em fixar o tubo de Karsten à amostra cilíndrica de argamassa, com a ajuda de plasticina ou de silicone (Figura 3.16.a). Depois de fixo o tubo à amostra, encheu-se o tubo com água até à marcação da graduação 0 cm³ e iniciou-se a contagem dos tempos no cronómetro. As medições das quantidades de água, absorvidas pela amostra, foram realizadas ao fim de 1, 2 e 3 minutos de contacto da água com a argamassa (Figura 3.16.b). Para cada argamassa são feitas 4 medições, uma em cada amostra (4 amostras por argamassa).

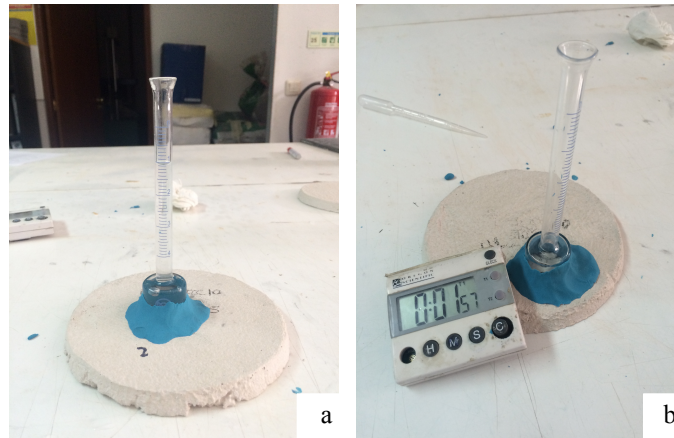


Figura 3.16 - Fases do ensaio de permeabilidade à água líquida. a) Fixação do tubo de Karsten com plasticina; b) Medição da altura de água ao fim do 2º min.

Os resultados do ensaio de permeabilidade à água líquida são apresentados como a média, em cm^3 , das 4 medições realizadas em cada amostra.

3.6.8 ENSAIO DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO (*PULL-OFF*)

O ensaio de *pull-off* consiste em determinar a resistência de aderência à tração, entre a camada de argamassa e o suporte, através da aplicação gradual de uma força externa que resulta no arrancamento de uma peça metálica colada à argamassa com uma resina epóxida.

3.6.8.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Na realização do ensaio de *pull-off* foram preparadas amostras de argamassas em suporte de tijolo furado, com dimensões 30 cm x 20 cm x 7 cm. Com o objetivo de avaliar a aderência das argamassas ao suporte, para cada argamassa e para cada idade de hidratação (28 e 91 dias), foram preparados 2 tijolos.

Na preparação dos tijolos para o ensaio de Pull-off foram utilizados os utensílios e produtos descritos no Quadro 3.18.

Quadro 3.18 – Utensílios e produtos usados na preparação dos tijolos para o ensaio de Pull-off

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- N/A	- Colher de metal - Régua metálica - Tijolos - Molde metálico	- Água

Os tijolos, antes de lhes ser aplicada a argamassa, foram colocados num balde com água, cerca de 10 min, para evitar que estes absorvessem a água da mistura das argamassas, evitando desta forma fissuras nas argamassas que comprometessem o ensaio. De seguida, e após o término da mistura da argamassa, o tijolo foi colocado dentro do molde metálico (Figura 3.17.a) e foi aplicada a argamassa no mesmo, com a ajuda de uma colher de metal (Figura 3.17.b). Com o auxílio de uma régua metálica, a argamassa foi espalhada uniformemente pelo tijolo, cobrindo todas as partes do mesmo (Figura 3.17.c). Para a regularização da superfície da argamassa, usou-se uma régua metálica, fazendo um movimento de serra, desde o meio do tijolo para o seu exterior (Figura 3.17.d), ficando com o aspeto final apresentado na Figura 3.17.e. Por fim, o tijolo foi retirado do molde metálico (Figura 3.17.f) e levado para a câmara de cura, onde permaneceu até ao dia do ensaio sujeito a uma temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e humidade de $55 \pm 5\%$ (Figura 3.17.g).



Figura 3.17 - Fases da preparação dos tijolos para o ensaio de *Pull-off*. a) Colocação do tijolo no molde metálico; b) Aplicação da argamassa no tijolo; c) Espalhamento da argamassa pelo tijolo; d) Alisamento da superfície da argamassa; e) Aspeto afinal da argamassa; f) Tijolo retirado do molde; g) Colocação do tijolo na câmara de cura.

3.6.8.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para cada argamassa foram feitas 10 medições, 6 num tijolo e 4 noutro tijolo, uma vez que só é possível colocar no máximo 6 peças metálicas em cada tijolo.

Na realização do ensaio de *pull-off* foi adotado o procedimento descrito na norma EN 1015-12:2000 [92].

▪ **Metodologia**

O ensaio de aderência à tração é realizado ao fim de 28 e 91 dias de idade, onde foram avaliadas as propriedades das argamassas sobre 2 amostras (2 tijolos) com, no máximo, 10 medições.

Na realização do ensaio de *pull-off*, foram utilizados os equipamentos, utensílios e produtos apresentados no Quadro 3.19.

Quadro 3.19 – Equipamentos, utensílios e produtos utilizados na execução do ensaio de Pull-off

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Equipamento de ensaio <i>pull-off</i> – HOYTOM 07M6498.1 - Máquina de corte	- Tijolos - Peças metálicas	- Resina epóxida

Inicialmente, antes de se proceder ao ensaio propriamente dito, os revestimentos de argamassa em cima do tijolo foram cortados na máquina de corte, com as dimensões das peças metálicas (5 cm x 5 cm) e com uma profundidade superior à espessura da argamassa (Figura 3.18.a). Isto deveu-se à necessidade de garantir que o arrancamento ocorresse apenas sob a área da peça metálica. Após este corte, as peças metálicas foram coladas, com pelo menos 2 dias antes da realização do ensaio, para garantir a secagem da cola epóxida (Figura 3.18.b). No dia do ensaio, os tijolos, já com as peças metálicas coladas, foram colocados no equipamento de ensaio (Figura 3.18.c) e acionou-se o mesmo, que aplicou uma força de tração à peça metálica até ao seu arrancamento do suporte (Figura 3.18.d). Por fim, registou-se o valor da força necessária para ocorrer o arrancamento da peça metálica.

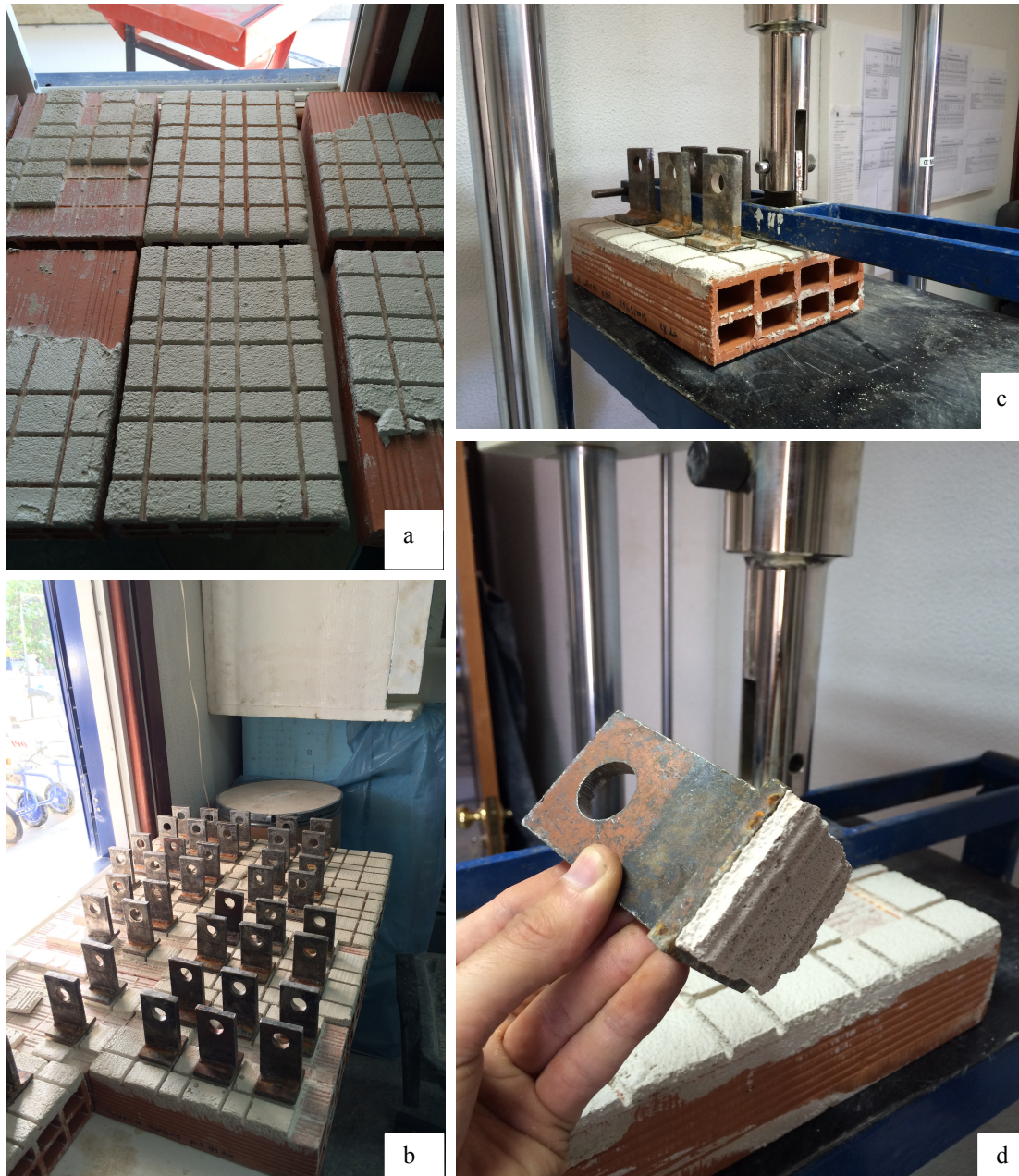


Figura 3.18 - Fases do ensaio de *pull-off*. a) Corte da argamassa com as dimensões das peças metálicas; b) Colagem das peças metálicas com resina epóxida; c) Posicionamento do tijolo no equipamento de ensaio; d) Arrancamento da peça metálica e registo do respetivo valor.

▪ ***Cálculo da tensão aderência***

A determinação da resistência ao arrancamento é dada pelo quociente entre a força máxima registada até ao arrancamento e a área da peça metálica (Eq. 3.10).

$$f_u = \frac{F_u}{A} \text{ (MPa ou N/mm}^2\text{)} \quad \text{(Eq.3.10)}$$

onde,

f_u – tensão de aderência (MPa ou N/mm^2);

F_u – força de rotura à tração (N);

A – área da superfície da peça metálica em contacto com o revestimento (mm^2).

O valor da tensão de aderência de cada amostra é arredondado a $0,05 N/mm^2$ e o valor da tensão de aderência da argamassa é o resultado da média dos valores obtidos (até 10 valores) com as várias amostras de cada argamassa, arredondada a $0,1 N/mm^2$.

Neste ensaio, para além do registo da força de rotura à tração, é também importante analisar, visualmente, de que forma se deu o arrancamento. O arrancamento pode originar 3 tipos de roturas diferentes: *rotura adesiva entre a argamassa e o suporte* – quando o arrancamento ocorre entre a interface da argamassa e do suporte (Figura 3.19.c); *rotura coesiva da argamassa* – quando o arrancamento ocorre por rotura da própria argamassa (Figura 3.19.a); *rotura coesiva do suporte* – quando o arrancamento ocorre por rotura do próprio suporte (Figura 3.19.b).

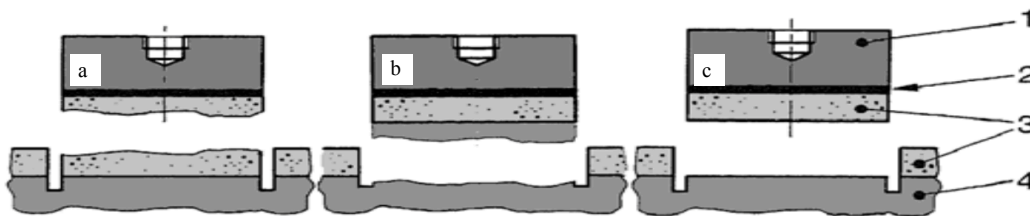


Figura 3.19 - Padrões de roturas que podem ocorrer no ensaio de *pull-off*. a) Rotura coesiva da argamassa; b) Rotura coesiva do suporte; c) Rotura adesiva entre a argamassa e o suporte; 1 – Peça metálica; 2 – Cola epóxida; 3 – Argamassa de revestimento; 4 – Suporte de tijolo; adaptado de [93].

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

“Queremos ter certezas e não dúvidas, resultados e não experiências, mas nem percebemos que as certezas só podem surgir através das dúvidas e os resultados somente através das experiências.”

Carl Jung

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta os resultados experimentais, obtidos nos ensaios realizados na campanha experimental (descritos no capítulo 3), das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo (Quadro 3.1). Este capítulo tem também como objetivo fazer uma análise crítica dos resultados obtidos e compará-los com os resultados da argamassa que reproduz a argamassa comercial, assim como com os requisitos propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Subsecção 2.3.2).

Através da análise dos resultados pretende-se também avaliar o efeito da incorporação do resíduo de FCC e dos adjuvantes nas argamassas. Os resultados, sempre que possível, serão também comparados com o estado da arte, sobretudo com estudos onde se tenha incorporado o resíduo de FCC.

Os resultados obtidos apresentam-se sob a forma de tabelas e gráficos, elaborados com o intuito de serem coerentes para o leitor, tanto no conteúdo como na forma. Assim sendo, para cada ensaio são apresentados os gráficos relativos a cada idade de hidratação e a cada série de argamassas (Quadro 3.1), permitindo uma avaliação do comportamento de todas elas relativamente à característica avaliada. A série s/adjuvantes é apresentada nos gráficos com cor azul, a série Hid com cor vermelha, a série 0.5Hid com cor verde e a série 0Hid com cor roxa.

No estado endurecido, os resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistências mecânicas são apresentados também com intervalos relativos à média \pm desvio padrão. Desta forma, é possível fazer uma comparação estatística dos resultados das argamassas, avaliando a dispersão dos mesmos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

No presente subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios das argamassas no estado fresco e respetiva análise crítica. Os métodos dos ensaios realizados no estado fresco foram abordados no subcapítulo 3.5.

4.2.1 CONSISTÊNCIA

O ensaio de consistência por mesa de espalhamento permite avaliar a consistência das argamassas, uma vez que avalia a sua fluidez no estado fresco. Este ensaio, descrito na secção 3.5.1, foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da substituição parcial da cal hidráulica pelo resíduo de FCC e o efeito da incorporação dos adjuvantes nas argamassas. Os valores obtidos na realização do ensaio de consistência apresentam-se no Anexo C.1

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os valores determinados experimentalmente das quantidades de água adicionadas às argamassas preparadas, por forma a garantir o espalhamento no intervalo de 165 mm e 175 mm (Subcapítulo 3.3).

A Figura 4.1 está apresentada, da esquerda para a direita, da seguinte forma: aumentando a incorporação de FCC em cada série de argamassas, desde 0% até 15% de incorporação, sendo que primeiro está representada a série s/adjuvantes, de seguida a série Hid, a 0.5Hid e, por último, a série 0Hid. Como referido no início do capítulo, cada uma das séries está representada com uma cor diferente, por forma a facilitar uma melhor compreensão ao leitor e melhor comparação entre as diversas séries de argamassas.

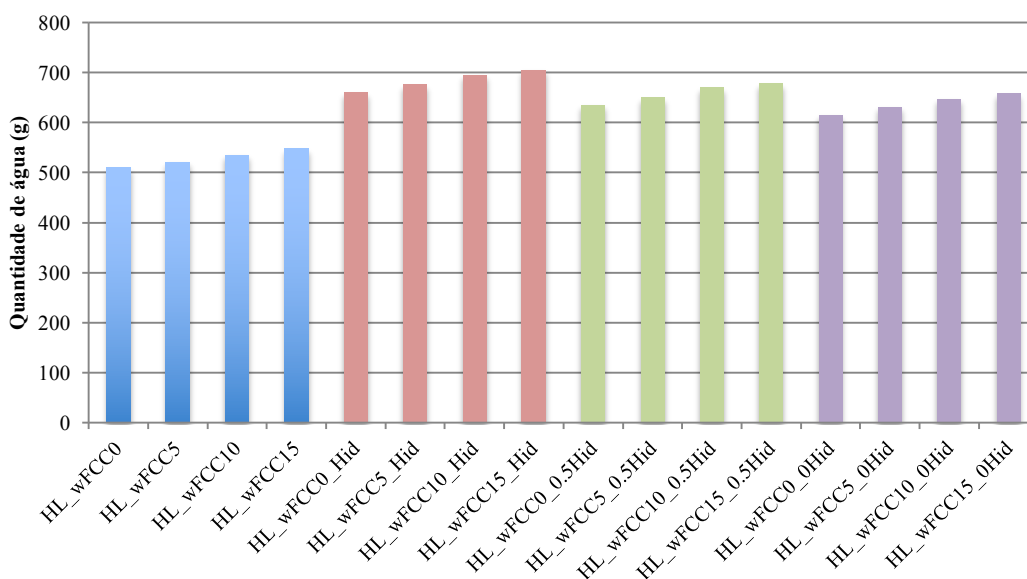


Figura 4.1 - Representação gráfica das quantidades de água usadas para cada argamassa preparada com as diferentes composições em estudo.

A Figura 4.2 apresenta os mesmos valores apresentados na Figura 4.1 e as respetivas retas de regressão linear.

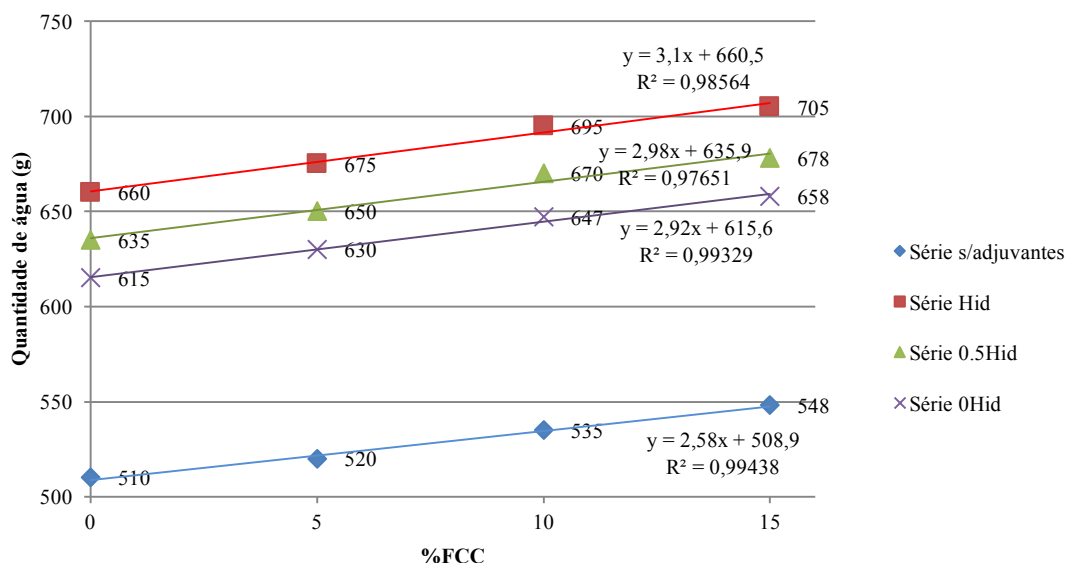


Figura 4.2 - Representação das quantidades de água de cada série de argamassa e respetivas retas de regressão linear.

As retas de regressão e as respetivas expressões das equações (Figura 4.2) evidenciam a correlação linear que se verificou entre a quantidade de água obtida para cada argamassa, em função da incorporação do resíduo de FCC e dos adjuvantes. Através da análise das Figura 4.1 e 4.2, é notório o aumento da quantidade de água adicionada às argamassas com o aumento da incorporação do resíduo de FCC. Isto deve-se ao facto desse resíduo ter uma elevada área superficial específica, o que leva à perda de fluidez das argamassas e, conseqüentemente, à necessidade do aumento da quantidade de água adicionada na mistura das argamassas para que se obtenha o mesmo intervalo de espalhamento.

Este resultado foi também verificado em outros estudos com argamassas de cal hidráulica com incorporação de FCC [14] e em argamassas de cimento com incorporação do resíduo de FCC [76, 78, 79], que constataram a perda de fluidez das argamassas com o aumento de incorporação do resíduo de FCC.

Analisando as Figuras 4.1 e 4.2 observa-se também que a presença de adjuvantes nas argamassas leva ao aumento da quantidade de água necessária na composição das mesmas, por forma a obter-se o mesmo espalhamento no estado fresco. Observando as séries com adjuvantes, nas quais há variação da quantidade do adjuvante hidrófugo usado, verifica-se que o hidrófugo tem influência na fluidez e, conseqüentemente, na quantidade de água usada. Isto é, à medida que se diminui a percentagem de hidrófugo nas argamassas, diminui a quantidade de água necessária na sua composição para garantir o intervalo de espalhamento pretendido.

Os Quadros 4.1 e 4.2 apresentam os valores médios do diâmetro de espalhamento, no intervalo 165 – 175 mm, de cada argamassa estudada (Quadro 3.1).

Quadro 4.1 – Consistência, obtida por mesa de espalhamento (mm), das argamassas preparadas com as diferentes composições das séries s/adjuvantes e Hid

Série s/adjuvantes					Série Hid			
% de FCC	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Espalhamento (mm)	169	167	169	169	167	169	174	173

Quadro 4.2 - Consistência, obtida por mesa de espalhamento (mm), das diferentes composições de argamassas preparadas das séries 0.5Hid e 0Hid

Série 0,5Hid					Série 0Hid			
% de FCC	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Espalhamento (mm)	168	168	173	167	172	173	167	167

4.2.2 MASSA VOLÚMICA

A Figura 4.3 e o Quadro 4.3 apresentam os resultados experimentais relativos às massas volúmicas das diferentes argamassas preparadas e ensaiadas no estado fresco. Os valores obtidos na realização do ensaio de massa volúmica apresentam-se no Anexo C.2

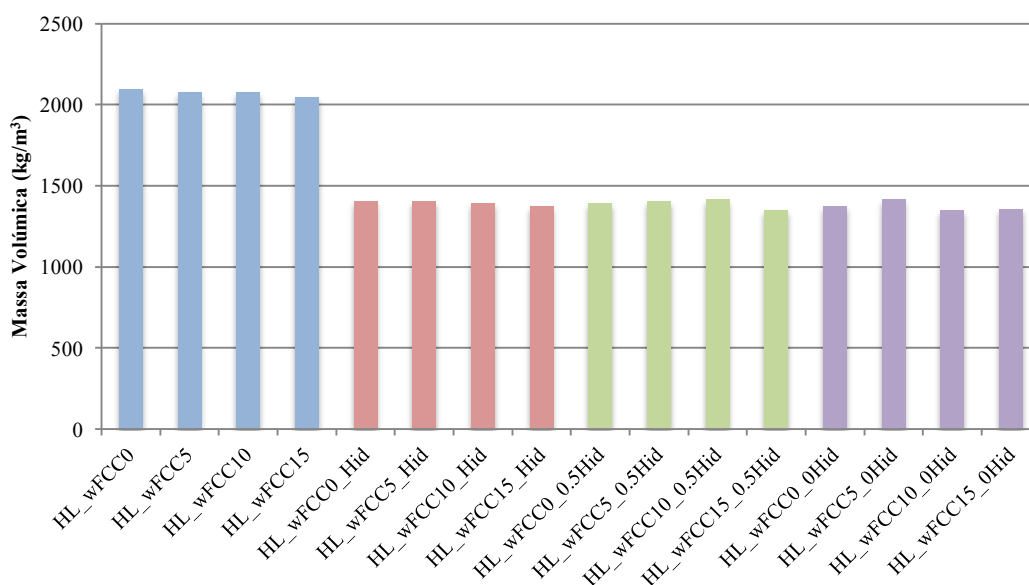


Figura 4.3 - Massa volúmica (kg/m³) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.

Quadro 4.3 - Massa volúmica (kg/m³) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo

Série	Composição	Massa volúmica (kg/m ³)	Série	Composição	Massa volúmica (kg/m ³)
s/adjuvantes	HL_wFCC0	2095	0.5 Hid	HL_wFCC0_0,5Hid	1397
	HL_wFCC5	2079		HL_wFCC5_0,5Hid	1406
	HL_wFCC10	2079		HL_wFCC10_0,5Hid	1417
	HL_wFCC15	2049		HL_wFCC15_0,5Hid	1354
Hid	HL_wFCC0_Hid	1406	0 Hid	HL_wFCC0_0Hid	1377
	HL_wFCC5_Hid	1408		HL_wFCC5_0Hid	1415
	HL_wFCC10_Hid	1396		HL_wFCC10_0Hid	1348
	HL_wFCC15_Hid	1376		HL_wFCC15_0Hid	1358

Através da análise da Figura 4.3 e do Quadro 4.3 observa-se que, em todas as séries de argamassas, a incorporação de FCC não tem praticamente influência na massa

volúmica das mesmas. Isto é, a diferença das massas volúmicas, dentro de cada série de argamassa, não ultrapassa os 5%.

No entanto, pela observação do Quadro 4.3, verifica-se que na série s/adjuvantes há uma tendência de diminuição da massa volúmica com o aumento da incorporação de FCC. Esta relação, de diminuição da massa volúmica com o aumento de incorporação de FCC, foi verificada por outros autores em argamassas de cimento [15, 78].

Através da análise da Quadro 4.3 e da Figura 4.3, verifica-se ainda que existe uma diminuição significativa (cerca de 30%) nos valores de massa volúmica das argamassas da série com adjuvantes, relativamente às argamassas das séries s/adjuvantes. Esta diminuição é atribuída à incorporação de adjuvantes nas argamassas, sobretudo do adjuvante introdutor de ar, que diminui a massa volúmica das argamassas através da incorporação de bolhas de ar, como já foi descrito na subsecção 2.3.1.3.

Analisando as três séries de argamassas com adjuvantes, verifica-se que as argamassas têm massas volúmicas sensivelmente iguais, uma vez que o adjuvante – introdutor de ar – que mais contribui para alterar a porosidade das argamassas e, conseqüentemente a massa volúmica, se mantém constante nas três séries.

A Figura 4.4 apresenta a relação entre as massas volúmicas (Figura 4.3 e Quadro 4.3) e as quantidades de água (Figura 4.1 e 4.2) usadas nas argamassas estudadas.

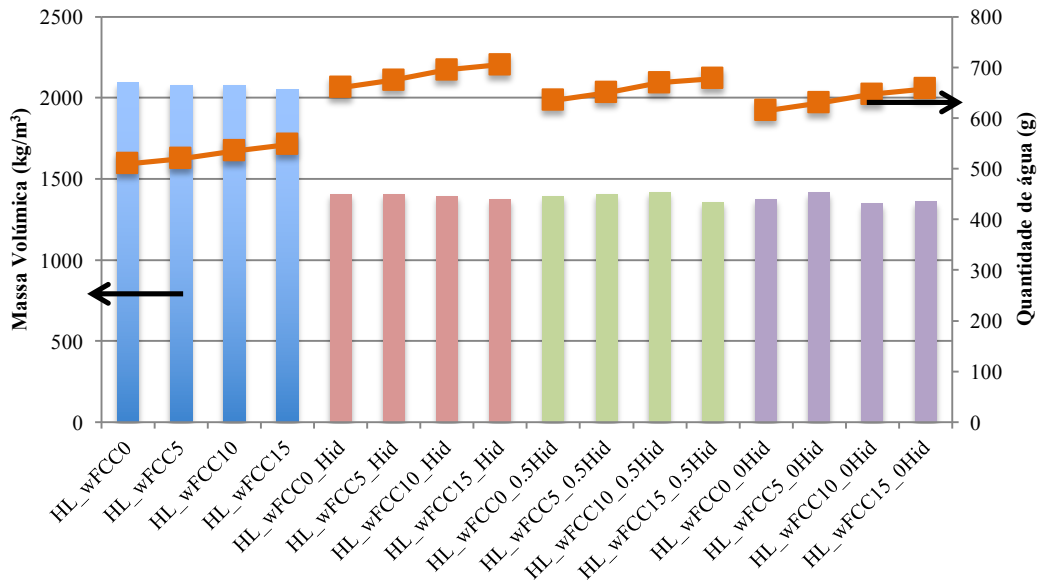


Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica e a quantidade de água usadas nas argamassas estudadas.

Analisando a Figura 4.4, verifica-se que a incorporação de adjuvantes nas argamassas leva ao aumento da quantidade de água e à diminuição da massa volúmica das mesmas. Verifica-se, também, que a diminuição da incorporação do adjuvante hidrófugo traduz-se numa diminuição da quantidade de água, mas não tem influência na massa volúmica das argamassas com adjuvantes.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste subcapítulo procede-se à apresentação e análise crítica dos resultados obtidos nos ensaios realizados com as argamassas no estado endurecido. A descrição das metodologias adotadas nos ensaios realizados no estado endurecido foi descrita no subcapítulo 3.6.

Os valores apresentados correspondem à média dos valores experimentais obtidos em cada ensaio e em cada idade de hidratação. A caracterização das argamassas no estado endurecido foi feita ao fim 28, 56 e 91 dias de hidratação, como já foi explicado anteriormente, no subcapítulo 3.6 (Quadros 3.10 e 3.12).

Nos ensaios de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e resistências mecânicas, é esperado um aumento dos valores experimentais ao longo da idade de hidratação, porque os materiais à base de cal hidráulica tendem a densificar a sua matriz ao longo do tempo, originando uma argamassa mais compacta. Assim sendo, é expectável que, ao longo do tempo, a propagação das ondas ultrassônicas seja facilitada, correspondendo ao aumento da velocidade de propagação das mesmas, bem como se espera que haja um aumento das resistências mecânicas.

Por outro lado, o aumento de incorporação do resíduo de FCC pode conduzir à densificação da matriz, devido à reação pozolânica que ocorre entre o FCC, o hidróxido de cálcio e a água, originando silicatos de cálcio hidratados (Secção 2.4.2 – Eq. 2.8). Contudo, tipicamente, existe um valor máximo de incorporação de uma pozolana em argamassas, quer estas sejam de cal hidráulica ou não. No entanto, para argamassas de cal hidráulica com incorporação de FCC, não foi ainda encontrada a máxima percentagem de incorporação do resíduo de FCC.

4.3.1 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi avaliada em amostras prismáticas (Subsecção 3.6.1.1) ao fim de 28, 56 e 91 dias de hidratação, de acordo com o descrito, anteriormente, na secção 3.6.2. Os resultados deste ensaio que se apresentam correspondem à média dos valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas obtidos em 6 amostras de argamassas. Os valores obtidos na realização do ensaio de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas são apresentado no Anexo D.1. O Anexo E.3 apresenta os valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para cada argamassa, em cada idade de hidratação, bem como a representação gráfica da evolução da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo do tempo.

A Figura 4.5 e o Quadro 4.4 apresentam os resultados experimentais relativos à velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para todas as argamassas estudadas.

Para uma melhor compreensão da Figura 4.5, da influência da incorporação de FCC nas argamassas e da idade de hidratação na velocidade de propagação das ondas

ultrassónicas, os mesmos resultados são apresentados em relação a cada uma das séries de argamassas estudadas, mais adiante, em concreto nas Figuras 4.6 (série s/adjuvantes), 4.7 (série Hid), 4.8 (série 0.5Hid) e 4.9 (série 0Hid).

A Figura 4.5 está organizada, da esquerda para a direita, da seguinte forma: aumentando a incorporação de FCC em cada série de argamassas, desde os 0 aos 15%, sendo que primeiro está representada a série s/adjuvantes e, de seguida, as séries Hid, 0.5Hid e 0Hid. Relativamente às argamassas com a mesma composição, às barras da esquerda, do centro e da direita, correspondem os valores da velocidade média de propagação das ondas ultrassónicas aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente.

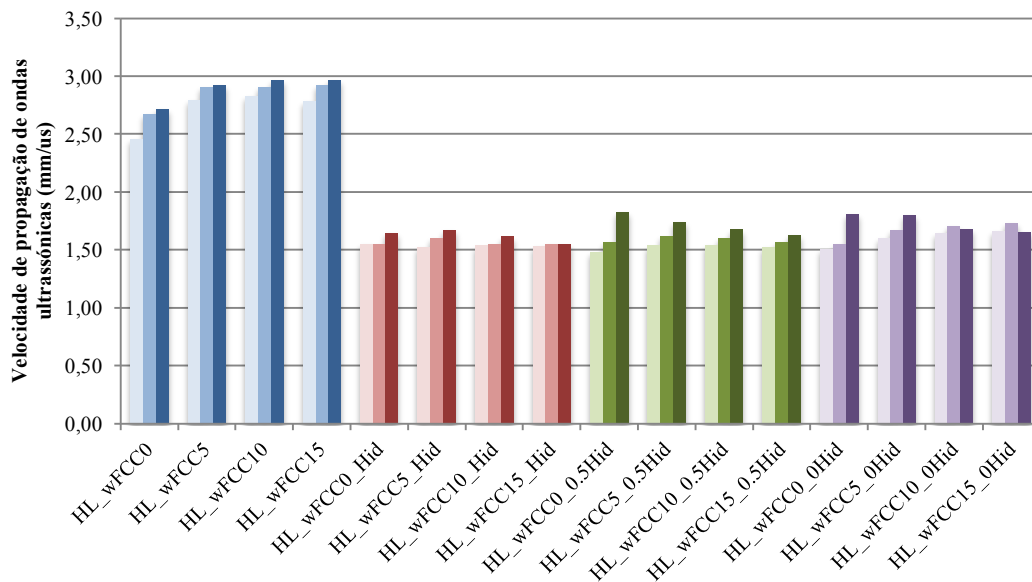


Figura 4.5 - Velocidade média (mm/μs) de propagação de ondas ultrassónicas das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa as barras da esquerda, do centro e da direita representam a velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).

Quadro 4.4 - Velocidade média (mm/ μ s) de propagação das ondas ultrassónicas (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo

Velocidade média de propagação das ondas ultrassónicas (mm/ μ s)							
Série	Composição	28 dias	N	56 dias	N	91 dias	N
s/adjuvantes	HL_wFCC0	2,46 \pm 0,03	6	2,68 \pm 0,02	6	2,71 \pm 0,04	6
	HL_wFCC5	2,80 \pm 0,04	6	2,91 \pm 0,03	6	2,92 \pm 0,04	6
	HL_wFCC10	2,82 \pm 0,02	6	2,91 \pm 0,05	6	2,96 \pm 0,03	6
	HL_wFCC15	2,79 \pm 0,04	6	2,93 \pm 0,03	6	2,97 \pm 0,02	6
Hid	HL_wFCC0_Hid	1,55 \pm 0,04	6	1,55 \pm 0,02	6	1,65 \pm 0,03	6
	HL_wFCC5_Hid	1,53 \pm 0,03	6	1,60 \pm 0,04	6	1,67 \pm 0,01	6
	HL_wFCC10_Hid	1,54 \pm 0,03	6	1,55 \pm 0,03	6	1,61 \pm 0,01	6
	HL_wFCC15_Hid	1,53 \pm 0,03	6	1,55 \pm 0,02	6	1,56 \pm 0,02	6
0.5Hid	HL_wFCC0_5Hid	1,48 \pm 0,03	6	1,57 \pm 0,02	6	1,83 \pm 0,06	8
	HL_wFCC5_5Hid	1,54 \pm 0,01	6	1,62 \pm 0,01	6	1,74 \pm 0,03	9
	HL_wFCC10_5Hid	1,54 \pm 0,02	6	1,61 \pm 0,03	6	1,68 \pm 0,03	9
	HL_wFCC15_5Hid	1,52 \pm 0,01	6	1,57 \pm 0,02	6	1,62 \pm 0,03	8
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	1,51 \pm 0,01	6	1,55 \pm 0,03	6	1,81 \pm 0,10	6
	HL_wFCC5_0Hid	1,61 \pm 0,01	6	1,67 \pm 0,02	6	1,80 \pm 0,03	4
	HL_wFCC10_0Hid	1,65 \pm 0,02	6	1,71 \pm 0,03	6	1,68 \pm 0,04	6
	HL_wFCC15_0Hid	1,67 \pm 0,03	6	1,73 \pm 0,03	6	1,65 \pm 0,02	6

N – número de amostras ensaiadas.

Com base na análise da Figura 4.5 e do Quadro 4.4, verifica-se, de um modo geral, um aumento da velocidade (e, consequentemente, uma diminuição do tempo de propagação das ondas ultrassónicas) ao longo do tempo. No entanto, aos 91 dias de hidratação, as argamassas HL_wFCC10_0Hid e HL_wFCC15_0Hid registam uma ligeira diminuição na velocidade de propagação relativamente aos 56 dias de hidratação. Esta diminuição não seria expectável, pelas razões referidas no início do presente capítulo.

A diminuição da velocidade de propagação ao longo do tempo pode ser atribuída à presença de vazios e/ou fissuras nas argamassas, que constituem descontinuidades à propagação das ondas ultrassónicas. Embora não tenham sido detetadas quaisquer fissuras através da observação visual das amostras de argamassa, podem ter surgido descontinuidades internas. O aparecimento de fissuras internas nas argamassas pode ser explicado atendendo ao facto de que, para além do processo de hidratação da cal hidráulica e de endurecimento da argamassa, à medida que se avança no tempo de

hidratação, a retração da argamassa aumenta, podendo originar a ocorrência de fissuras internas.

Como já foi referido no início do presente subcapítulo, ocorre uma densificação da matriz das argamassas ao longo do tempo, conduzindo ao aumento da velocidades de propagação de ondas ultrassónicas, bem como ao aumento das resistências mecânicas. Por isso, tipicamente, há uma correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e as resistências mecânicas (compressão e flexão) das diferentes argamassas. A correlação obtida entre os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e as resistências mecânicas é apresentada no Anexo E.5 e E.6.

Observando a Figura 4.5, é notória a diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas das séries com adjuvantes relativamente às argamassas da série s/adjuvantes. Esta diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas seria expectável, uma vez que o adjuvante introdutor de ar faz aumentar a porosidade das argamassas, criando assim um obstáculo à propagação das ondas ultrassónicas.

As Figura 4.6 (série s/adjuvantes), 4.7 (série Hid), 4.8 (série 0.5Hid) e 4.9 (série 0Hid) apresentam, novamente, os resultados apresentados na Figura 4.5. Para uma análise mais cuidada, as figuras apresentam os intervalos da média \pm desvio padrão de cada uma das argamassas estudadas.

A Figura 4.6 apresenta os valores da velocidade média de propagação das ondas ultrassónicas ($mm/\mu s$), das diferentes argamassas preparadas da série s/adjuvantes.

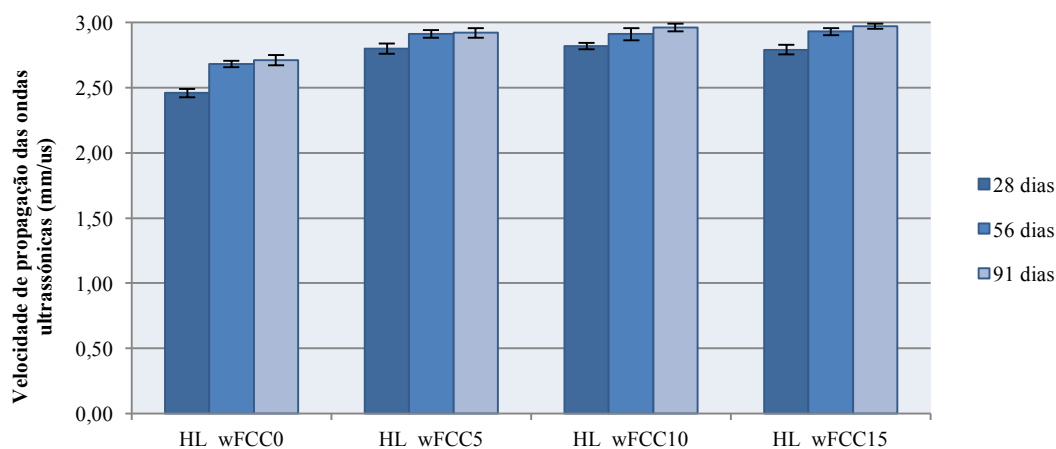


Figura 4.6 - Velocidade média ($mm/\mu s$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas da série s/adjuvantes.

Analisando a Figura 4.6 e o Quadro 4.4 verifica-se que, na série sem adjuvantes, há uma tendência de aumento da velocidade de propagação ao longo do tempo. O aumento da velocidade era expectável, uma vez que os materiais à base de cal hidráulica tendem a densificar a sua matriz ao longo do tempo, como já foi explicado na presente secção. No entanto, as argamassas HL_wFCC0 e HL_wFCC5, dos 56 para os 91 dias de hidratação, parecem manter-se com valores sensivelmente constantes de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas observa-se que há uma tendência de aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas com o aumento de incorporação de FCC. Este aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas pode estar relacionado com a reação pozolânica do FCC, podendo dar origem a materiais mais densos, facilitando a propagação das ondas ultrassónicas.

O aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, com o aumento de incorporação de FCC em argamassas de cal hidráulica, foi verificado num outro trabalho experimental, realizado no mesmo laboratório e com o mesmo FCC, onde se testou a substituição parcial de cal hidráulica até 10%, pelo resíduo de FCC [14].

A Figura 4.7 apresenta os valores da velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas ($mm/\mu s$) das diferentes argamassas preparadas, da série Hid.

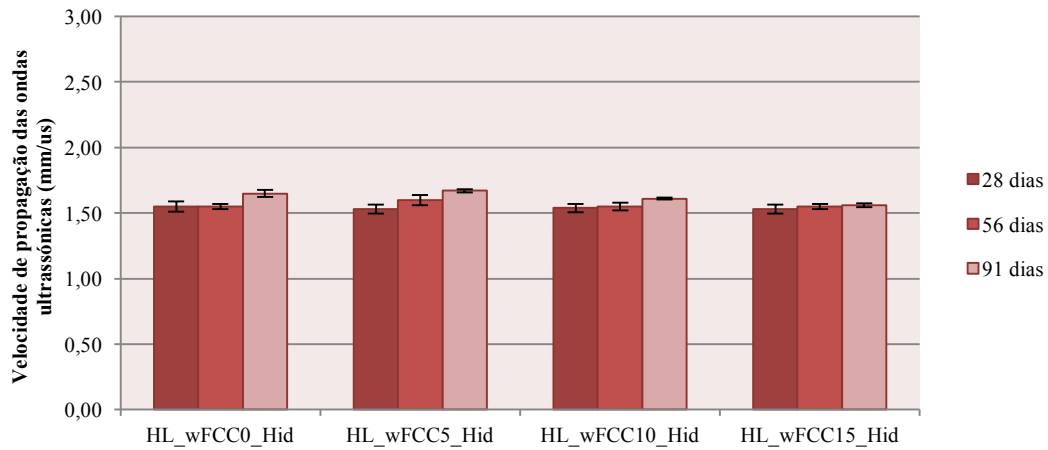


Figura 4.7 - Velocidade média ($mm/\mu s$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassônicas nas argamassas da série Hid.

Relativamente à série Hid, analisando os dados da Figura 4.7 e do Quadro 4.4, verifica-se que, entre os 28 e 56 dias de hidratação, os valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas tendem a manter-se constantes. Aos 91 dias de hidratação verifica-se, tipicamente, um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

No que respeita ao efeito da incorporação de FCC nas argamassas da série Hid, os resultados mostram que o resíduo de FCC não altera de forma significativa os valores da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (sobretudo aos 28 e 56 dias de hidratação), contrariando o esperado. No entanto, aos 91 dias de hidratação, parece existir uma tendência de diminuição dos valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, com o aumento de incorporação de FCC a partir dos 5% de incorporação.

A Figura 4.8 apresenta os valores da velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas ($mm/\mu s$), das diferentes argamassas preparadas, da série 0.5Hid.

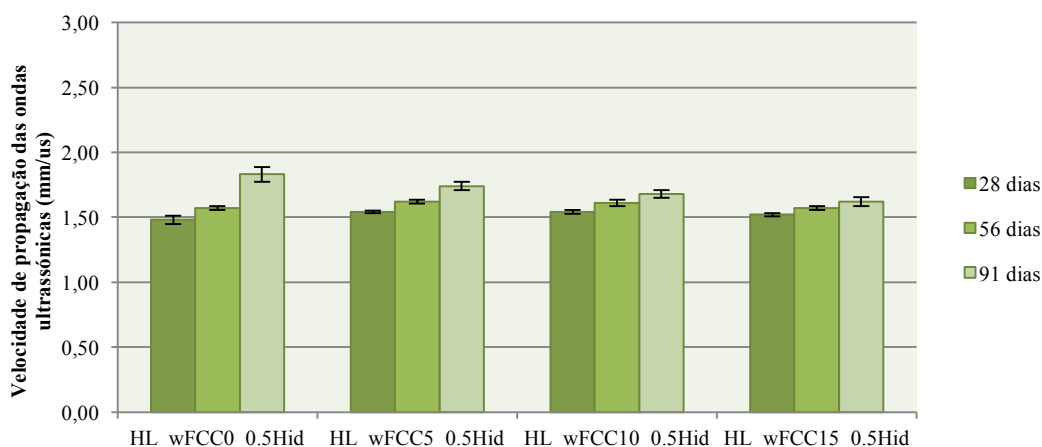


Figura 4.8 - Velocidade média ($mm/\mu s$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassônicas nas argamassas da série 0.5Hid.

Através da análise da Figura 4.8 e do Quadro 4.4 verifica-se que, ao longo do tempo de hidratação, há um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para todas as argamassas, o que seria de esperar, devido à densificação da matriz dos materiais à base de cal hidráulica. Aos 91 dias de hidratação, as argamassas desta série, quando comparadas com as da série Hid, apresentam um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Esta diferença pode ser atribuída à utilização de metade do adjuvante hidrófugo na série 0.5Hid em relação à série Hid.

Relativamente ao efeito de incorporação de FCC nas argamassas, aos 28 e 56 dias de hidratação, não existem variações significativas na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com o aumento de incorporação de FCC. Por outro lado, aos 91 dias de hidratação, ao contrário do que seria expectável, parece haver uma tendência de diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com o aumento de FCC.

Comparando as argamassas desta série com os resultados da argamassa que reproduz a comercial (HL_wFCC0_Hid), verifica-se que as argamassas da série 0.5Hid apresentam valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas superiores aos da argamassa que reproduz a comercial.

A Figura 4.9 apresenta os valores da velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas ($mm/\mu s$), das diferentes argamassas preparadas, da série 0Hid.

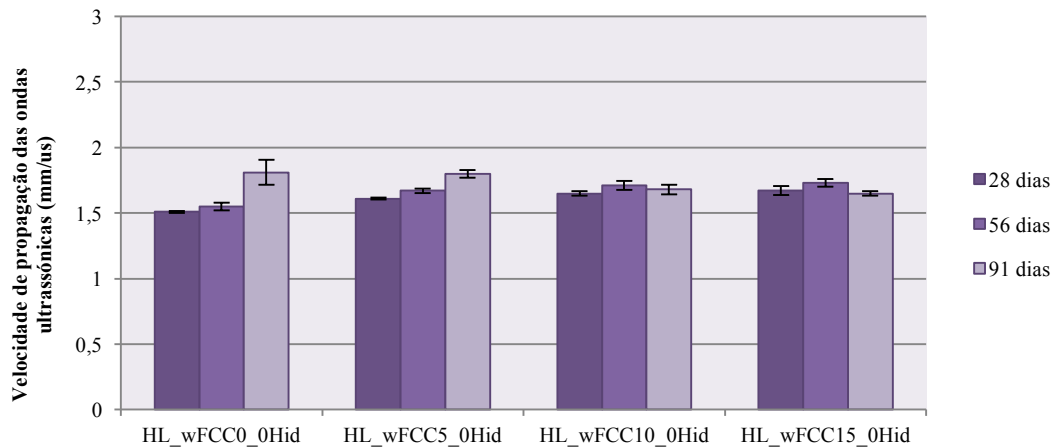


Figura 4.9 - Velocidade média ($mm/\mu s$) (média \pm desvio padrão) de propagação das ondas ultrassônicas nas argamassas da série 0Hid.

Na série 0Hid, contrariamente ao que seria esperado, só nas argamassas HL_wFCC0_0Hid e HL_wFCC5_0Hid há um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo do tempo. Na argamassa HL_wFCC10_0Hid há um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas até aos 56 dias de hidratação, que se mantém constante aos 91 dias de hidratação. Por sua vez, a argamassa HL_wFCC15_0Hid, apresenta até aos 56 dias um aumento de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e, aos 91 dias de hidratação, apresenta uma diminuição dessa velocidade.

No que respeita ao efeito de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas, aos 28 e 56 dias de hidratação, há uma tendência de aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, com o aumento de incorporação do resíduo. No entanto, aos 91 dias, essa tendência é revertida, ou seja, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas diminui com o aumento de incorporação do FCC, contrariando assim, o referido no início do subcapítulo.

Comparando as argamassas desta série com os resultados da argamassa que reproduz a comercial (HL_wFCC0_Hid), verifica-se que as argamassas da série 0Hid

apresentam valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas superiores aos da argamassa que reproduz a comercial.

Quando comparadas com as argamassas da série 0.5Hid, aos 91 dias de hidratação, as argamassas da série 0Hid apresentam valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas semelhantes aos da série 0.5Hid.

Analisando, de forma geral, os resultados das 16 argamassas e comparando-os com os da argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), observa-se que, aos 28 e 56 dias de hidratação, as argamassas das séries Hid e 0.5Hid apresentam valores semelhantes de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e as da série 0Hid valores superiores, em relação à argamassa que reproduz a comercial. Aos 91 dias de hidratação, as argamassas das séries 0.5Hid e 0Hid apresentam valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas superiores aos da argamassa que reproduz a argamassa comercial. Relativamente às argamassas da série s/adjuvantes, estas apresentam valores de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas muito superiores (quase o dobro) aos das restantes argamassas.

Através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é possível estimar o módulo de deformação, com já foi referido na secção 3.6.2. Assim sendo, o Anexo E.7 apresenta os resultados obtidos relativamente ao módulo de deformabilidade dinâmico das argamassas. Através da análise dos resultados verifica-se, tipicamente, um aumento do módulo de deformação com o aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. As argamassas das séries com adjuvantes apresentam módulo de deformação dinâmico dentro do intervalo proposto para argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3). Verifica-se portanto que as argamassas das séries com adjuvantes apresentam uma boa capacidade de resistir a deformações sem fissurarem, de acordo com os valores propostos para edifícios antigos. No entanto, é de realçar que os módulos de deformação apresentados no Quadro 2.3 foram calculados por frequência fundamental de ressonância e os módulos apresentados neste trabalho por frequência ultrassônica.

No que respeita à influência do resíduo de FCC nas argamassas das séries com adjuvantes, não se verifica nenhuma tendência significativa de alteração do módulo

de deformação das argamassas com o aumento de incorporação do resíduo. Nas argamassas s/adjuvantes, verifica-se uma tendência de aumento do módulo de deformação dinâmico com a incorporação do resíduo de FCC.

4.3.2 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A determinação das resistências mecânicas dos materiais constitui um dado importante na caracterização das argamassas no estado endurecido. Através dos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, é possível obter informações relativamente à capacidade que as argamassas têm, no estado endurecido, em suportar esforços mecânicos externos que sobre elas incidem.

Nesta secção, os resultados das diferentes argamassas serão comparados entre si, com a argamassa que reproduz a argamassa comercial e com os valores de resistências mecânicas propostos para as argamassas de reabilitação na secção 2.3.2 (Quadro 2.3).

4.3.2.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO

A Figura 4.10 e o Quadro 4.5 apresentam os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à flexão para as diferentes argamassas. Para cada argamassa e idade de hidratação os valores de resistência mecânica à flexão foram obtidos com base em amostras prismáticas (Quadro 3.10). Para facilitar a análise da informação contida na Figura 4.10, os mesmos resultados serão apresentados nas Figuras 4.11 (série s/adjuvantes), 4.12 (série Hid), 4.13 (série 0.5Hid) e 4.14 (série 0Hid).

Os valores obtidos na realização do ensaio de resistência mecânica à flexão são apresentado no Anexo D.2. O Anexo E.2 apresenta os gráficos que relacionam a resistência à flexão ao longo da idade de hidratação para as diferentes argamassas.

A Figura 4.10 está organizada, da esquerda para a direita, da seguinte forma: aumentando a incorporação de FCC em cada série de argamassas, desde os 0 aos 15% de incorporação, sendo que primeiro está representada a série s/adjuvantes e, de seguida, as séries Hid, 0.5Hid e 0Hid. Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão média de rotura à flexão aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente.

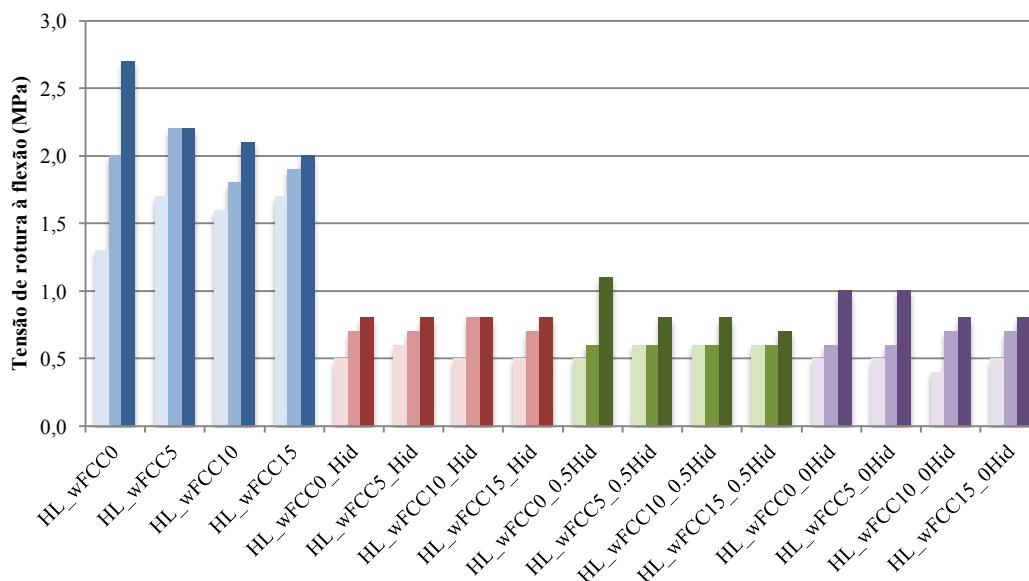


Figura 4.10 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão média de rotura à flexão aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).

Quadro 4.5 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo

Valores médios da tensão de rotura à flexão (MPa)							
Série	Composição	28 dias	N	56 dias	N	91 dias	N
s/adjuvantes	HL_wFCC0	1,3 \pm 0,18	6	2,0 \pm 0,31	6	2,7 \pm 0,32	6
	HL_wFCC5	1,7 \pm 0,05	6	2,2 \pm 0,23	6	2,2 \pm 0,32	6
	HL_wFCC10	1,6 \pm 0,13	6	1,8 \pm 0,10	6	2,1 \pm 0,29	6
	HL_wFCC15	1,7 \pm 0,11	6	1,9 \pm 0,10	6	2,0 \pm 0,25	6
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,5 \pm 0,05	6	0,7 \pm 0,07	6	0,8 \pm 0,06	6
	HL_wFCC5_Hid	0,6 \pm 0,06	6	0,7 \pm 0,11	6	0,8 \pm 0,05	6
	HL_wFCC10_Hid	0,5 \pm 0,05	6	0,8 \pm 0,05	6	0,8 \pm 0,09	6
	HL_wFCC15_Hid	0,5 \pm 0,04	6	0,7 \pm 0,06	6	0,8 \pm 0,07	6
0.5Hid	HL_wFCC0_0.5Hid	0,5 \pm 0,04	6	0,6 \pm 0,02	6	1,1 \pm 0,07	8
	HL_wFCC5_0.5Hid	0,6 \pm 0,07	6	0,6 \pm 0,06	6	0,8 \pm 0,09	9
	HL_wFCC10_0.5Hid	0,6 \pm 0,08	6	0,6 \pm 0,04	6	0,8 \pm 0,09	9
	HL_wFCC15_0.5Hid	0,6 \pm 0,06	6	0,6 \pm 0,07	6	0,7 \pm 0,05	8
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,5 \pm 0,03	6	0,6 \pm 0,04	6	1,0 \pm 0,15	6
	HL_wFCC5_0Hid	0,5 \pm 0,06	6	0,6 \pm 0,09	6	1,0 \pm 0,20	4
	HL_wFCC10_0Hid	0,4 \pm 0,07	6	0,7 \pm 0,09	6	0,8 \pm 0,06	6
	HL_wFCC15_0Hid	0,5 \pm 0,06	6	0,7 \pm 0,12	6	0,8 \pm 0,04	6

N – número de amostras ensaiadas.

Tipicamente, o ensaio de resistência à flexão apresenta alguma dispersão nos valores de tensão de rotura à flexão, ou seja, apresenta valores de desvio padrão elevados. No

entanto, neste trabalho verifica-se que, de forma geral, este ensaio não apresenta dispersões significativas (Quadro 4.5).

Analisando a Figura 4.10 e o Quadro 4.5, observa-se que existe uma diminuição, cerca de 60%, dos valores da tensão de rotura à flexão das argamassas das séries com adjuvantes, em comparação com as argamassas da série s/adjuvantes. Esta diminuição pode ser atribuída à utilização de adjuvantes nas argamassas, sobretudo do adjuvante introdutor de ar, que aumenta a porosidades das argamassas, podendo originar argamassas mecanicamente mais fracas.

A diminuição da resistência mecânica à flexão, quando incorporado nas argamassas de cal hidráulica um introdutor de ar, foi verificada por outros autores [58].

Quando comparadas, genericamente, as séries de argamassas com adjuvantes não apresentam, entre si, uma variação de valores da tensão de rotura à flexão significativa.

Por forma a facilitar a análise da Figura 4.10 e do Quadro 4.5, apresentam-se os mesmos dados nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 das séries s/adjuvantes, Hid, 0.5Hid e 0Hid, respetivamente.

A Figura 4.11 apresenta os valores da tensão média de rotura à flexão (MPa), das diferentes argamassas preparadas da série s/adjuvantes.

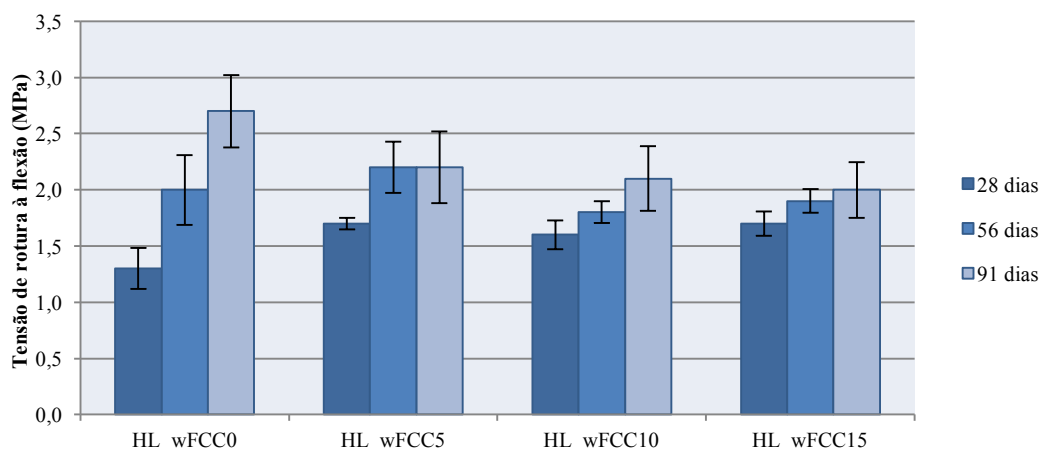


Figura 4.11 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série s/adjuvantes.

Analisando a Figura 4.11 e o Quadro 4.5, verifica-se que há uma tendência de aumento da tensão de rotura à flexão nas argamassas ao longo do tempo, sendo que as argamassas HL_wFCC5 e HL_wFCC15 tendem a estabilizar os seus valores aos 56 dias de hidratação.

Note-se que, o facto das argamassas estabilizarem as resistências mecânica à flexão aos 56 dias de hidratação, pode ser atribuído aos limites de erro de determinação experimental, uma vez que as argamassas apresentam valores de desvio padrão elevados (particularmente a partir dos 56 dias). O estudo mais rigoroso desta propriedade pode exigir um maior número de amostras.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, verifica-se que, aos 28 dias de hidratação, as argamassas que contêm o resíduo atingem valores de tensão de rotura à flexão mais elevados do que a argamassa de referência HL_wFCC0. Aos 56 dias de hidratação, o aumento de incorporação de FCC parece não alterar os valores de tensão de rotura à flexão. No entanto, aos 91 dias de hidratação, há uma tendência de diminuição da tensão de rotura à flexão quando se incorpora 5% de FCC, e que tende a manter-se constante até aos 15% de incorporação.

Os valores da tensão de rotura à flexão, aos 91 dias de hidratação, das argamassas da série s/adjuvantes são mais elevados (mais do dobro) que os propostos nos requisitos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos [2] (0,2 – 0,7 MPa – Quadro 2.3).

A Figura 4.12 apresenta os valores da tensão média de rotura à flexão (MPa), das diferentes argamassas preparadas, da série Hid.

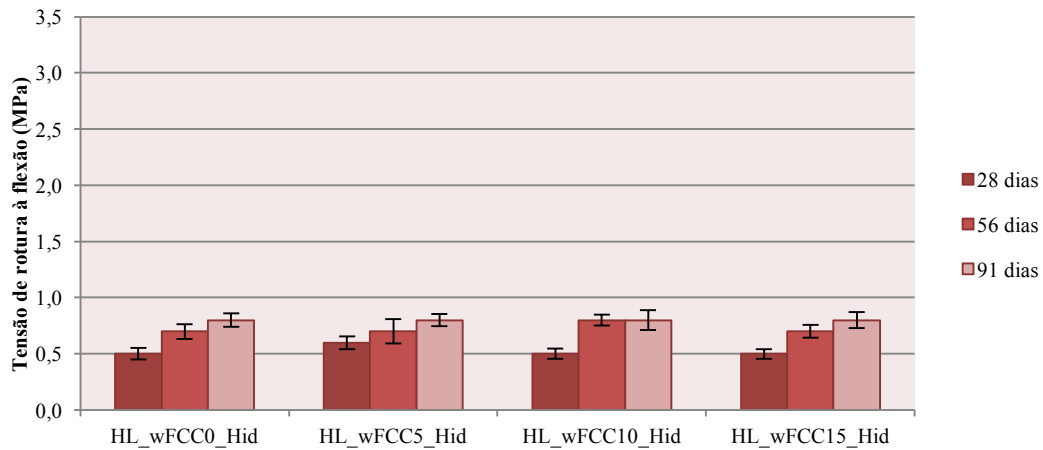


Figura 4.12 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série Hid.

Através da análise da Figura 4.12 e do Quadro 4.5 observa-se que, até aos 56 dias de hidratação, há um aumento da tensão de rotura à flexão e que, a partir daí, tende a estabilizar até aos 91 dias de hidratação.

No que ao efeito de incorporação do resíduo de FCC diz respeito, para qualquer uma das idades de hidratação, não existem alterações significativas nos valores de resistência à flexão com o aumento de incorporação do resíduo.

Comparando os valores da resistência à flexão da argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), as restantes argamassas desta série apresentam valores da tensão de rotura à flexão sensivelmente iguais aos da argamassa que reproduz a comercial, qualquer que seja a idade de hidratação.

Relativamente aos valores da resistência à flexão propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3), os resultados obtidos, aos 91 dias de hidratação, para todas as argamassas desta série, estão dentro do limite superior do intervalo proposto (0,2 - 0,7 MPa).

A Figura 4.13 apresenta os valores da tensão média de rotura à flexão (MPa), das diferentes argamassas preparadas, da série 0.5Hid.

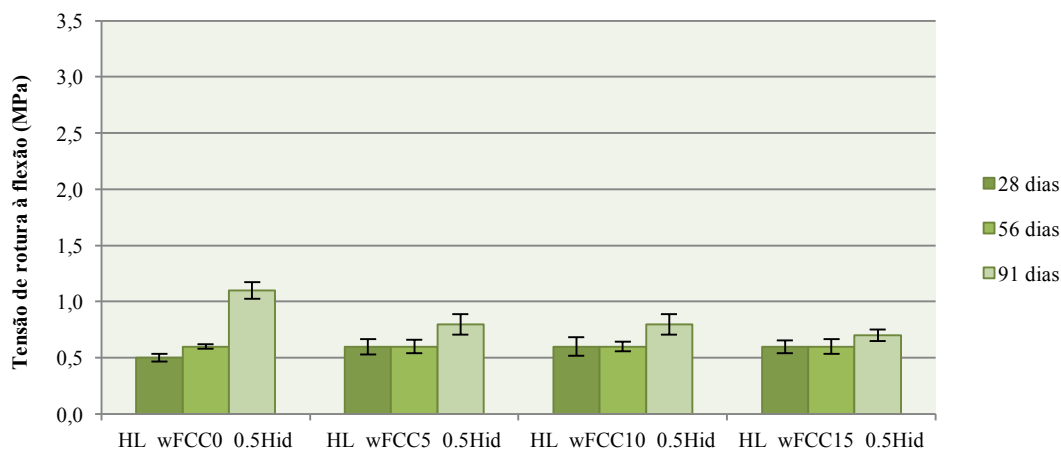


Figura 4.13 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0.5Hid.

A Figura 4.13 e o Quadro 4.5 mostram que os valores da tensão de rotura à flexão, até aos 56 dias de hidratação, se mantêm praticamente inalterados. Por sua vez, aos 91 dias de hidratação, há um aumento da tensão de rotura à flexão das argamassas. Esse aumento é mais acentuado na argamassa HL_wFCC0_0.5Hid, que não apresenta FCC na sua composição.

No que diz respeito ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, aos 28 e 56 dias de hidratação, não há alteração dos valores de rotura à flexão, nem com a incorporação, nem com o aumento do teor de incorporação do resíduo de FCC. Isto é, aos 28 e 56 dias de hidratação, a incorporação de FCC não influencia os valores de resistência mecânica à flexão das argamassas. No entanto, aos 91 dias de hidratação, há uma diminuição do valor de rotura à flexão da argamassa HL_wFCC0_0.5Hid para a argamassa HL_wFCC5_0.5Hid, que se mantém igual até aos 15% de incorporação do resíduo de FCC. Isto é, a presença de FCC na composição da argamassa traduz-se na diminuição da resistência à flexão, mas o teor da incorporação não tem influência na resistência à flexão.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), as argamassas da série 0.5Hid não apresentam uma variação significativa dos valores da tensão de rotura à flexão, exceptuando a argamassa HL_wFCC0_0.5Hid que, aos 91 dias, apresenta um valor da tensão de rotura à flexão superior ao da argamassa que reproduz a argamassa comercial.

Relativamente aos valores propostos referentes à resistência à flexão para as argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3) [2], as argamassas da série 0.5Hid, com incorporação de FCC, apresentam valores idênticos ao limite superior do intervalo proposto.

A Figura 4.14 apresenta os valores da tensão média de rotura à flexão (MPa), das diferentes argamassas preparadas, da série 0Hid.

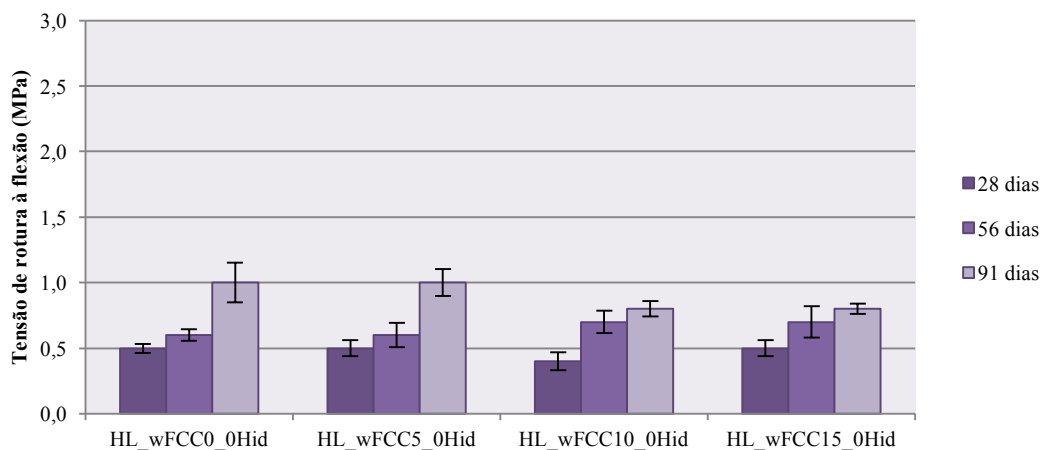


Figura 4.14 – Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0Hid.

Através da análise da Figura 4.14 e do Quadro 4.5 verifica-se que, ao longo do tempo, há uma tendência de aumento da tensão de rotura à flexão das argamassas.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas, não existem variações significativas no valor de rotura à flexão, nem com a incorporação, nem com o aumento do teor de incorporação do resíduo.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial, não existe uma variação significativa dos valores de rotura à flexão, excepto aos 91 dias de hidratação, onde as argamassas HL_wFCC0_0Hid e HL_wFCC5_0Hid apresentam resistência à flexão superior relativamente à argamassa HL_wFCC0_0Hid.

Os valores da tensão de rotura à flexão das argamassas da série 0Hid, à semelhança das argamassas das séries Hid e 0.5Hid, estão dentro do limite superior do intervalo proposto para a flexão de argamassas de reabilitação em edifícios antigos.

Da análise detalhada das várias argamassas de cada série, verifica-se, de forma geral, que as argamassas da série s/adjuvantes apresentam valores de resistência à flexão superiores aos da argamassa que reproduz a argamassa comercial, e que as argamassas das séries com adjuvantes apresentam valores de resistência à flexão semelhantes aos da argamassa que reproduz a comercial. Verifica-se também que, nas séries com adjuvantes, o aumento de incorporação do FCC não tem uma influência significativa nos valores de resistência à flexão.

A influência da incorporação do adjuvante hidrófugo nas argamassas não parece ser significativa. No entanto, parece haver uma ligeira tendência de aumento da resistência mecânica à flexão, aos 91 dias de hidratação, com a diminuição da incorporação do hidrófugo. Este aumento faz-se notar na argamassa HL_wFCC0_.5Hid e nas argamassas HL_wFCC0_0Hid e HL_wFCC5_0Hid.

Com o objetivo de alargar a análise dos resultados obtidos, relacionam-se os resultados obtidos neste ensaio com outros resultados, nomeadamente nos obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (Secção 4.3.1). Assim sendo, no Anexo E.6 estão apresentados os gráficos que relacionam estas duas propriedades. Verifica-se que, para a maioria das argamassas, existe uma boa correlação exponencial com a resistência mecânica à flexão e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.

4.3.2.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

A Figura 4.15 e o Quadro 4.6 apresentam os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão para as diferentes argamassas. Para cada argamassa e idade de hidratação, os valores de resistência mecânica à compressão foram obtidos com base em semi-amostras de ensaio, resultantes das amostras ensaiadas na resistência à flexão. Para facilitar a análise da informação contida na

Figura 4.15, os mesmos resultados serão apresentados nas Figuras 4.16 (série s/adjuvantes), 4.17 (série Hid), 4.18 (série 0.5Hid) e 4.19 (série 0Hid).

Os valores obtidos na realização do ensaio de resistência mecânica à compressão são apresentado no Anexo D.3. O Anexo E.1 apresenta os gráficos que relacionam a resistência à compressão ao longo da idade de hidratação para as diferentes argamassas.

Com o objetivo de facilitar a análise crítica e a discussão dos resultados obtidos, em relação ao efeito da incorporação do resíduo de FCC nas propriedades mecânicas das argamassas preparadas, determinou-se, para cada argamassa, o “índice de atividade” da pozolana. O índice de atividade (IA) da pozolana foi determinado com base na norma (elaborada para argamassas cujo ligante é o cimento) ASTM C311-07 [94], que se adotou para estas argamassas cujo ligante é a cal hidráulica. Segundo a norma, o IA é obtido como sendo a razão entre o valor da resistência à compressão da argamassa com 20% de adição de pozolana, aos 28 dias de idade, e o valor da resistência à compressão da argamassa de referência (sem incorporação de pozolana).

Neste trabalho generalizou-se o procedimento descrito na norma, tendo-se determinado o IA da pozolana como sendo a razão entre a resistência mecânica à compressão da argamassa produzida com substituição parcial da cal hidráulica pelo resíduo de FCC, com uma determinada idade, e a resistência à compressão da argamassa de referência (sem substituição parcial pelo resíduo de FCC) para a mesma idade, sob as mesmas condições. A expressão de cálculo para o cálculo do IA encontra-se na equação 4.1:

$$\text{Índice de atividade (IA)} = \frac{A}{B} * 100\% \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde,

A – valor médio da resistência à compressão da argamassa para uma determinada percentagem de substituição e idade de hidratação;

B – valor médio da resistência à compressão da argamassa de referência (sem incorporação de resíduo) para a mesma idade de hidratação de A.

Entende-se por atividade pozolânica a capacidade que uma determinada pozolana tem em reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água. O IA permite avaliar indiretamente a reação pozolânica, ou seja, quanto maior for a quantidade de hidróxido de cálcio consumida na reação pozolânica, maior será, teoricamente, o IA da pozolana. A substituição parcial de cal hidráulica por um outro material não reativo traduz-se, tipicamente, na diminuição da resistência à compressão das argamassas, proporcionalmente à quantidade de substituição da cal hidráulica – efeito de diluição. Assim sendo, considera-se que um material apresenta atividade pozolânica se a resistência à compressão for superior à percentagem de substituição da cal hidráulica.

Em consequência, na presente subsecção, apresentar-se-ão, também, os resultados relativos ao IA da pozolana nas argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.

Nesta subsecção, será feita também uma comparação dos resultados de resistência mecânica à compressão com os requisitos para argamassas de alvenarias, estabelecidos na NP EN 998-1 [1].

A Figura 4.15 está organizada, da esquerda para a direita, da seguinte forma: aumentando a incorporação de FCC em cada série de argamassas, desde os 0 aos 15% de incorporação, sendo que primeiro está representada a série s/adjuvantes e, de seguida, as séries Hid, 0.5Hid e 0Hid. Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão de rotura à compressão, aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente.

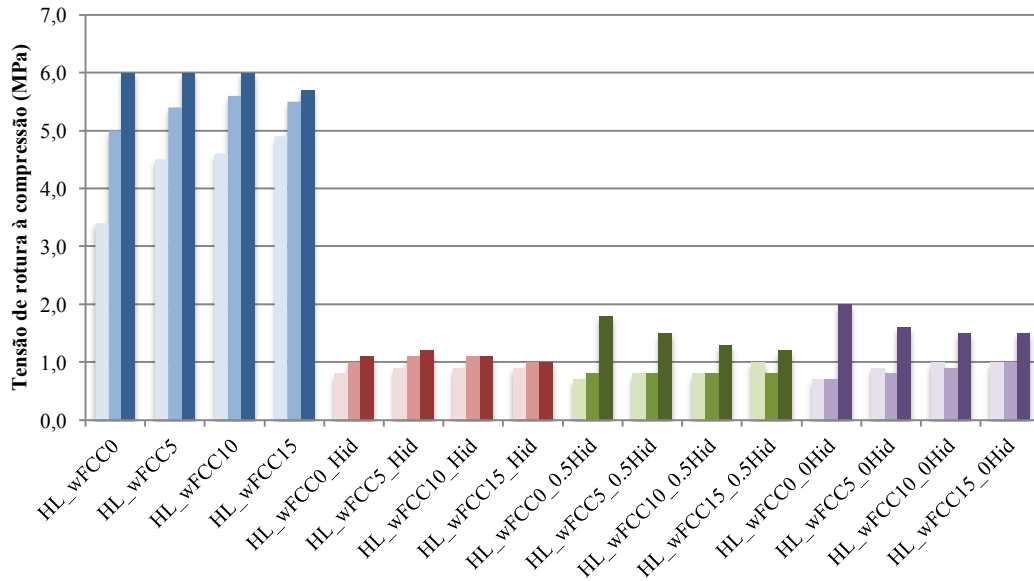


Figura 4.15 – Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média ± desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda, do centro e da direita, representam os valores da tensão média de rotura à compressão aos 28, 56 e 91 dias de hidratação, respetivamente).

Quadro 4.6 – Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média ± desvio padrão) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo

		Valores médios da tensão de rotura à compressão (MPa)					
Série	Composição	28 dias	N	56 dias	N	91 dias	N
s/adjuvantes	HL_wFCC0	3,4 ± 0,21	6	5,0 ± 0,40	6	6,0 ± 0,41	6
	HL_wFCC5	4,5 ± 0,09	6	5,4 ± 0,21	6	6,0 ± 0,26	6
	HL_wFCC10	4,6 ± 0,12	6	5,6 ± 0,18	6	6,0 ± 0,12	6
	HL_wFCC15	4,9 ± 0,12	6	5,5 ± 0,21	6	5,7 ± 0,21	6
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,8 ± 0,09	6	1,0 ± 0,06	6	1,1 ± 0,09	6
	HL_wFCC5_Hid	0,9 ± 0,06	6	1,1 ± 0,13	6	1,2 ± 0,05	6
	HL_wFCC10_Hid	0,9 ± 0,07	6	1,1 ± 0,06	6	1,1 ± 0,08	6
	HL_wFCC15_Hid	0,9 ± 0,09	6	1,0 ± 0,05	6	1,0 ± 0,10	6
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,7 ± 0,06	6	0,8 ± 0,05	6	1,8 ± 0,11	8
	HL_wFCC5_.5Hid	0,8 ± 0,05	6	0,8 ± 0,06	6	1,5 ± 0,18	9
	HL_wFCC10_.5Hid	0,8 ± 0,07	6	0,8 ± 0,10	6	1,3 ± 0,12	9
	HL_wFCC15_.5Hid	1,0 ± 0,02	6	0,8 ± 0,06	6	1,2 ± 0,18	8
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,7 ± 0,04	6	0,7 ± 0,11	6	2,0 ± 0,22	6
	HL_wFCC5_0Hid	0,9 ± 0,08	6	0,8 ± 0,12	6	1,6 ± 0,23	4
	HL_wFCC10_0Hid	1,0 ± 0,05	6	0,9 ± 0,13	6	1,5 ± 0,08	6
	HL_wFCC15_0Hid	1,0 ± 0,11	6	1,0 ± 0,10	6	1,5 ± 0,07	6

N – número de amostras ensaiadas.

Através da análise da Figura 4.15 e do Quadro 4.6, verifica-se que as argamassas da série s/adjuvantes apresentam valores de resistência à compressão superiores, cerca de 5 vezes superiores, em relação às argamassas das séries com adjuvantes. Esta diferença pode ser atribuída à incorporação de adjuvantes nas argamassas, que podem originar argamassas mecanicamente mais fracas, como já foi explicado na resistência mecânica à flexão (Subsecção 4.3.2.1).

A diminuição da resistência mecânica à compressão em argamassa de cal hidráulica, quando incorporadas com adjuvantes, foi verificada num outro trabalho realizado no mesmo laboratório que compara também argamassas comerciais (com adjuvantes) com argamassas de cal hidráulica com incorporação de FCC [14].

Por forma a facilitar a análise da Figura 4.15 e do Quadro 4.6, apresentam-se os mesmos dados nas Figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 das séries s/adjuvantes, Hid, 0.5Hid e 0Hid, respetivamente.

A Figura 4.16 apresenta os valores da tensão média de rotura à compressão (MPa), das diferentes argamassas preparadas da série s/adjuvantes.

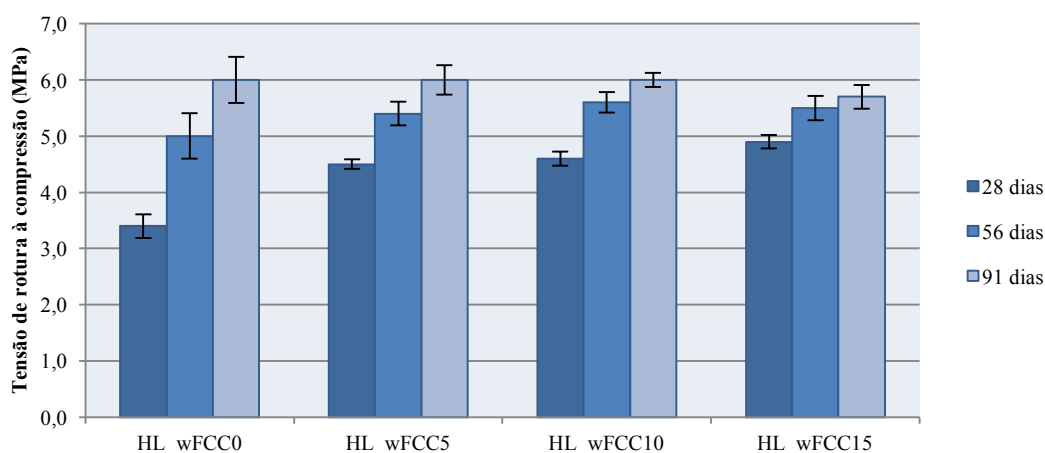


Figura 4.16 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série s/adjuvantes.

Analisando a Figura 4.16 e o Quadro 4.6 verifica-se que, ao longo do tempo de hidratação, há uma tendência de aumento dos valores de rotura à compressão. Este aumento está de acordo com o esperado, uma vez que os materiais à base de cal

hidráulica tendem a densificar a sua matriz, originando argamassas mecanicamente mais resistentes, como já foi explicado no presente capítulo (subcapítulo 4.3).

No que ao efeito de incorporação do resíduo de FCC diz respeito, verifica-se que, aos 28 dias de hidratação, há uma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento de incorporação de FCC. Isto confirma o esperado, ou seja, que a incorporação de FCC pode originar argamassas mais fortes mecanicamente (subcapítulo 4.3). Aos 56 dias de hidratação, parece haver um aumento da resistência mecânica à compressão quando se incorpora FCC e, esse valor, tende a manter-se constante até aos 15% de incorporação. No entanto, aos 91 dias de hidratação, não há alterações significativas nos valores de rotura à compressão com o aumento de incorporação de FCC, excepto quando se incorpora 15% de FCC, onde parece ocorrer uma diminuição da resistência à compressão.

O aumento da resistência mecânica à compressão com o aumento de incorporação de FCC, foi verificado num estudo por outro autor em argamassas de cimento com incorporação de FCC até 15% [15]. Nesse estudo verificou-se que, ao aumento de incorporação do resíduo de FCC até aos 10%, estava associado um aumento da resistência mecânica à compressão, e que quando se incorpora 15% de FCC em argamassas de cimento parece ocorrer uma diminuição da resistência à compressão.

As constatações apresentadas no penúltimo parágrafo estão presentes no Quadro 4.7, no qual se apresentam os valores dos IA pozolânica das diferentes argamassas da série s/adjuvantes.

Quadro 4.7 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série s/adjuvantes

Série	Composição	Índice de atividade pozolânica (IA)		
		28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0 - referência	100,0	100,0	100,0
	HL_wFCC5	132,4	108,0	100,0
	HL_wFCC10	135,3	112,0	100,0
	HL_wFCC15	144,1	110,0	95,0

Analisando o Quadro 4.7 verifica-se que, em todas as argamassas da série s/adjuvantes, o efeito de diluição foi superado e, conseqüentemente, o resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica. Verifica-se também, aos 28 dias de hidratação, uma tendência de aumento do IA com o aumento de incorporação do FCC.

A Figura 4.17 apresenta os valores da tensão média de rotura à compressão (MPa), das diferentes argamassas preparadas, da série Hid.

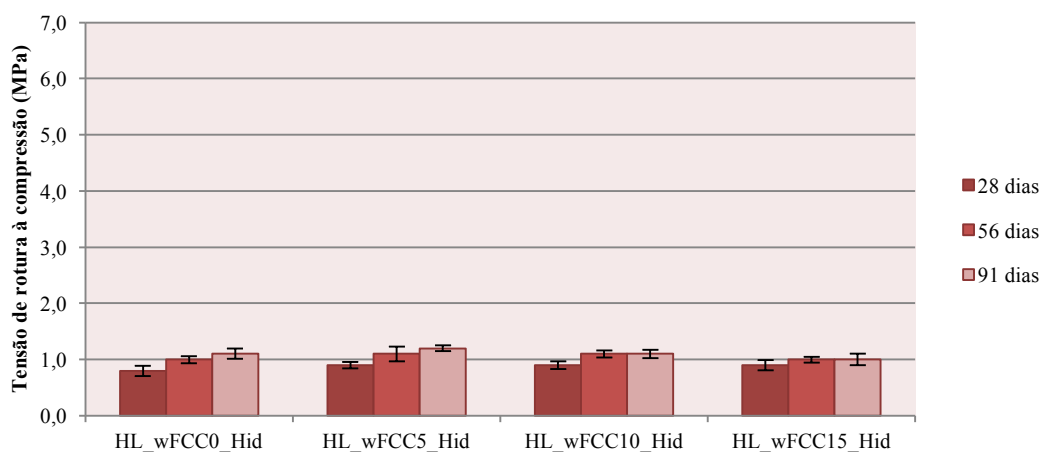


Figura 4.17 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série Hid.

As argamassas da série Hid apresentam uma tendência de aumento da tensão de rotura à compressão até aos 56 dias de hidratação. Após os 56 dias de hidratação e, até aos 91 dias hidratação, os valores da tensão de rotura à compressão tendem a manter-se constantes.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas, este não tem uma influência significativa na resistência mecânica à compressão das argamassas.

Quando comparadas com a argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), as argamassas da série Hid apresentam valores de resistência mecânica semelhantes aos da argamassa HL_wFCC0_Hid, para todas as idades de hidratação.

Comparando as argamassas da presente série, com os valores de resistência à compressão propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3) verifica-se que, aos 91 dias de hidratação, todas as argamassas apresentam valores da tensão de rotura à compressão situados, sensivelmente, a meio do intervalo proposto (0,4 – 2,5 MPa).

O Quadro 4.8 apresenta os valores dos IA pozolânica das diferentes argamassas da série Hid.

Quadro 4.8 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série Hid

Série	Composição	Índice de atividade pozolânica (IA)		
		28 dias	56 dias	91 dias
Hid	HL_wFCC0_Hid - referência	100,0	100,0	100,0
	HL_wFCC5_Hid	112,5	110,0	109,1
	HL_wFCC10_Hid	112,5	110,0	100,0
	HL_wFCC15_Hid	112,5	100,0	90,9

O Quadro 4.8 mostra que em todas as argamassas da série Hid, o efeito de diluição foi superado e, conseqüentemente, o resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica em todas as argamassas. Note-se também que, aos 28 dias de hidratação, não há variação do IA com o aumento de incorporação do FCC (entre 5 e 15% de incorporação). Por outro lado, aos 56 e 91 dias de hidratação, há uma diminuição do IA quando se incorpora 15% de FCC.

A Figura 4.18 apresenta os valores da tensão média de rotura à compressão (MPa), das diferentes argamassas preparadas da série 0.5Hid.

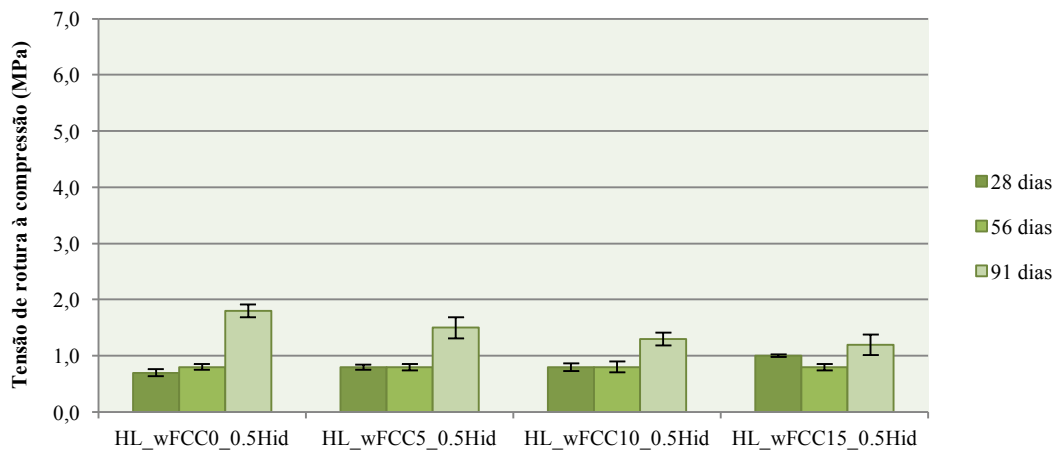


Figura 4.18 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0.5Hid.

A Figura 4.18 e o Quadro 4.6 mostram que as argamassas da série 0.5Hid, até aos 56 dias de hidratação, mantêm as suas resistências mecânicas à compressão constantes, com exceção da argamassa HL_wFCC15_0.5Hid que, aos 56 dias de hidratação, diminui a sua resistência mecânica à compressão. Aos 91 dias hidratação, há um aumento dos valores de rotura à compressão das argamassas, em relação aos 56 dias de hidratação.

Em relação ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, este parece não afetar a resistência à compressão das argamassas, aos 28 e 56 dias de hidratação. No entanto, aos 91 dias, há uma tendência de diminuição dos valores de tensão de rotura à compressão, com o aumento de incorporação do resíduo.

Comparativamente à argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), as argamassas desta série apresentam, aos 91 dias de hidratação, valores de resistência à compressão ligeiramente superiores à argamassa comercial, sobretudo a argamassa HL_wFCC0_0.5Hid, sem FCC.

Relativamente aos valores de resistência à compressão propostos para as argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3), todas as argamassas da série 0.5Hid apresentam valores de tensão de rotura à compressão dentro do intervalo proposto.

O Quadro 4.9 apresenta os valores dos IA pozolânica das diferentes argamassas da série 0.5Hid.

Quadro 4.9 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série 0.5Hid

Série	Composição	Índice de atividade pozolânica (IA)		
		28 dias	56 dias	91 dias
0.5Hid	HL_wFCC0_0,5Hid - referência	100,0	100,0	100,0
	HL_wFCC5_0,5Hid	114,3	100,0	83,3
	HL_wFCC10_0,5Hid	114,3	100,0	72,2
	HL_wFCC15_0,5Hid	142,9	100,0	66,7

Através da análise do Quadro 4.9 verifica-se que, aos 28 e 56 de hidratação, o efeito de diluição é superado, assim o resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica. No entanto, aos 91 dias de hidratação, o resíduo de FCC não apresenta atividade pozolânica, pois verifica-se uma diminuição do IA com o aumento de incorporação de FCC (abaixo do efeito de diluição). Esta diminuição pode corroborar o facto de que à medida que se aumenta a incorporação do resíduo de FCC, há uma diminuição da resistência mecânica das argamassas aos 91 dias de hidratação, como referido aquando da análise da Figura 4.18.

A Figura 4.19 apresenta os valores da tensão média de rotura à compressão (MPa), das diferentes argamassas preparadas da série 0Hid.

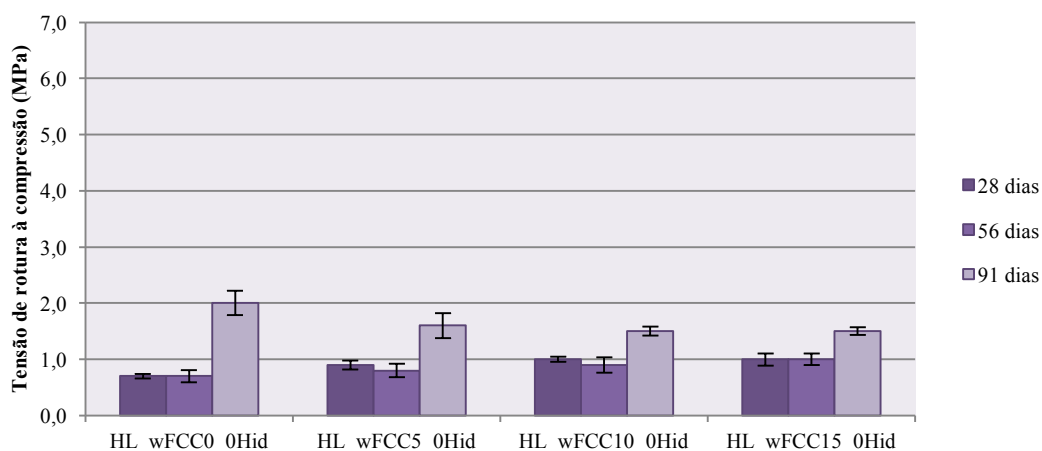


Figura 4.19 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média \pm desvio padrão) das argamassas da série 0Hid.

Analisando a Figura 4.19 e o Quadro 4.6 verifica-se que, até aos 56 dias de hidratação, não há uma evolução significativa da resistência à compressão. Aos 91 dias de hidratação, há um aumento da resistência mecânica à compressão para todas as argamassas.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, tanto aos 28 como aos 56 dias de hidratação, verifica-se uma ligeira tendência de aumento da tensão de rotura à compressão, à medida que se aumenta a incorporação do resíduo. No entanto, aos 91 dias de hidratação, a incorporação do resíduo conduz à diminuição da resistência mecânica à compressão, mas o teor de incorporação do resíduo na gama estudada não tem um efeito significativo.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial, todas as argamassas desta série apresentam, aos 91 dias de hidratação, valores de tensão de rotura à compressão superiores.

As argamassas da série 0Hid apresentam valores de resistência à compressão dentro do intervalo proposto para as argamassas de reabilitação de edifícios antigos (Quadro 2.3).

O Quadro 4.10 apresenta os valores dos IA pozolânica das diferentes argamassas da série 0Hid.

Quadro 4.10 - Índice de atividade (IA) pozolânica das argamassas preparadas com as diferentes composições, da série 0Hid

Série	Composição	Índice de atividade pozolânica (IA)		
		28 dias	56 dias	91 dias
0Hid	HL_wFCC0_0Hid - referência	100,0	100,0	100,0
	HL_wFCC5_0Hid	128,6	114,3	80,0
	HL_wFCC10_0Hid	142,9	128,6	75,0
	HL_wFCC15_0Hid	142,9	142,9	75,0

O Quadro 4.10 mostra que, aos 28 e 56 de hidratação, à medida que se aumenta a incorporação do resíduo de FCC, há uma tendência de aumento do IA pozolânica, e que em todas as argamassas foi superado o efeito de diluição. Isto pode comprovar o

acima referido, que quando há um aumento da incorporação do FCC a resistência mecânica à compressão das argamassas também aumenta (Figura 4.19).

Por outro lado, aos 91 dias de hidratação, há uma diminuição do IA pozolânica com a incorporação de 5% do resíduo de FCC, que tende a manter-se sensivelmente constante até aos 15% de incorporação. Esta constatação vem evidenciar o referido anteriormente que, aos 91 dias de hidratação, há uma diminuição da resistência mecânica das argamassas quando se incorpora 5% de FCC, e que essa resistência tende a manter-se constante até aos 15% de incorporação.

Através de uma análise global dos resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão verifica-se que as argamassas da série s/adjuvantes apresentam valores de resistência à compressão superiores (cerca de 5 vezes mais) em relação as argamassas das séries com adjuvantes. Quando comparadas com os valores de resistência mecânica à compressão propostos para argamassas de reabilitação em edifícios antigos (0,4 – 2,5 MPa), as argamassas da série s/adjuvantes apresentam valores de tensão de rotura à compressão superiores aos propostos. No entanto, em comparação com os valores de resistência mecânica à compressão aos 28 dias de hidratação ($\geq 0,4$ MPa), definidos na norma NP EN 998-1 [1], as argamassas da série s/adjuvantes satisfazem os mesmos.

Nas argamassas das séries com adjuvantes verifica-se que a diminuição da incorporação do adjuvante hidrófugo nas argamassas revela uma tendência de aumento da resistência mecânica à compressão das argamassas aos 91 dias de hidratação.

Verifica-se, também, que na série Hid o aumento de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas não tem praticamente influência na resistência mecânica à compressão das mesmas, qualquer que seja a idade de hidratação. No entanto, nas séries 0.5Hid e 0Hid, aos 91 dias de hidratação, há uma tendência de diminuição dos valores de tensão de rotura à compressão das argamassas, quando se incorpora o resíduo de FCC.

Relativamente aos valores propostos para as argamassas de reabilitação de edifícios antigos, todas as argamassas das séries com adjuvantes, apresentam valores de resistência mecânica à compressão dentro do intervalo proposto (Quadro 2.3).

As argamassas das séries 0.5Hid e 0Hid, aos 91 dias de hidratação, em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial, apresentam valores de tensão de rotura à compressão superiores.

Em comparação com os requisitos da NP EN 998-1 [1], as argamassas das séries com adjuvantes cumprem o estabelecido nos requisitos.

À semelhança da resistência mecânica à flexão (Subsecção 4.3.2.1), relacionam-se os resultados obtidos neste ensaio com outros resultados, nomeadamente nos obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (Secção 4.3.1). Assim sendo, no Anexo E.5 estão apresentados os gráficos que relacionam estas duas propriedades. Verifica-se que, para a maioria das argamassas, existe uma boa correlação exponencial com a resistência mecânica à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.

Através dos resultados obtidos na determinação da resistência mecânica à flexão e à compressão é possível estimar o coeficiente de ductilidade das argamassas, pela relação R_f/R_c . Através do coeficiente de ductilidade podemos aferir sobre a capacidade que as argamassas têm em deformar-se, quando sujeitas a ações mecânicas. Considera-se que uma argamassa é tanto mais dúctil, quanto maior for o seu coeficiente de ductilidade. Assim sendo, o Quadro 4.11 apresenta o coeficiente de ductilidade (R_f/R_c) das argamassas, para as diferentes idades de hidratação.

Quadro 4.11 – Coeficiente de ductilidade (R_f/R_c) das argamassas estudadas, para as diferentes idades de hidratação

Série	Argamassa	R_f/R_c		
		28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0	0,4	0,4	0,5
	HL_wFCC5	0,4	0,4	0,4
	HL_wFCC10	0,3	0,3	0,4
	HL_wFCC15	0,3	0,3	0,4
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,6	0,7	0,7
	HL_wFCC5_Hid	0,7	0,6	0,7
	HL_wFCC10_Hid	0,6	0,7	0,7
	HL_wFCC15_Hid	0,6	0,7	0,8
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,7	0,8	0,6
	HL_wFCC5_.5Hid	0,8	0,8	0,5
	HL_wFCC10_.5Hid	0,8	0,8	0,6
	HL_wFCC15_.5Hid	0,6	0,8	0,6
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,7	0,9	0,5
	HL_wFCC5_0Hid	0,6	0,8	0,6
	HL_wFCC10_0Hid	0,4	0,8	0,5
	HL_wFCC15_0Hid	0,5	0,7	0,5

Através da análise do Quadro 4.11 constata-se que as argamassas das séries com adjuvantes apresentam maior coeficiente de ductilidade, em relação às argamassas da série s/adjuvantes. Esta diferença pode ser atribuída à utilização de adjuvantes nas argamassas, tornando-as mais dúcteis. Verifica-se, também, que o aumento da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas não tem influência na ductilidade das mesmas.

O Quadro 4.12 apresenta as correlações lineares entre a resistência mecânica à flexão e a resistência à compressão, ao longo do tempo de hidratação. A representação gráfica destas correlações lineares é apresentada no Anexo E.4.

Quadro 4.12 - Relação entre as resistências mecânicas (MPa) - flexão e compressão - ao longo do tempo de hidratação

Série	Argamassa	R^2	Série	Argamassa	R^2
s/adjuvantes	HL_wFCC0	0,98	0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,99
	HL_wFCC5	0,84		HL_wFCC5_.5Hid	1,00
	HL_wFCC10	0,88		HL_wFCC10_.5Hid	1,00
	HL_wFCC15	0,99		HL_wFCC15_.5Hid	0,75
Hid	HL_wFCC0_Hid	1,00	0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,96
	HL_wFCC5_Hid	0,96		HL_wFCC5_0Hid	0,91
	HL_wFCC10_Hid	1,00		HL_wFCC10_0Hid	0,33
	HL_wFCC15_Hid	0,89		HL_wFCC15_0Hid	0,57

R^2 – fator de correlação linear.

Tipicamente, as argamassas de cal hidráulica não apresentam uma boa relação entre as resistências mecânicas à flexão e à compressão, uma vez que existe um erro elevado associado ao ensaio de resistência à flexão. No entanto, através da análise do Quadro 4.12 e das representações gráficas apresentadas no Anexo E.4 verifica-se o contrário, ou seja, é evidente a correlação entre ambas as propriedades de resistência avaliadas, ao longo do período dos ensaios. As argamassas da série 0Hid apresentam uma maior dispersão nas correlações lineares entre os dois ensaios, sobretudo nas argamassas com 10 e 15% de incorporação de FCC.

4.3.3 AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Nesta secção pretende-se avaliar o efeito da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas de cal hidráulica, comparando os resultados com os da argamassa que reproduz a argamassa comercial.

A carbonatação nos materiais à base de cal hidráulica é resultante da reação química dos constituintes da cal com o CO₂ atmosférico, que provoca a redução do pH das argamassas.

A cal hidráulica contém cal livre na sua constituição que reage com o CO₂ atmosférico ao longo do tempo, pelo que a este processo se designa de carbonatação [22, 95]. Desta forma, é espectável que as argamassas de cal hidráulica, preparadas com as diferentes composições em estudo, apresentem carbonatação ao longo da idade de hidratação.

Para cada argamassa e idade de hidratação, a avaliação da profundidade de carbonatação foi realizada em semi-amostras, resultantes das amostras do ensaio à flexão (Secção 3.6.3 e 3.6.4).

Uma vez que não foi possível fazer a medição dos valores de profundidade de carbonatação, com recurso ao paquímetro (Secção 3.6.4), por limitação do horário de funcionamento do Laboratório da Ciarga, apresentar-se-ão figuras ilustrativas dos resultados do ensaio no Anexo D.4. O limite temporal para a realização deste TFM

impediu a realização de novas misturas de argamassas, por forma a avaliar corretamente a profundidade de carbonatação.

Através da análise das figuras presentes no Anexo D.4, verifica-se que, aos 28 e 56 dias de hidratação, as argamassas das séries estudadas não apresentam sinais de carbonatação. No entanto, aos 91 dias de hidratação, todas as argamassas preparadas apresentam clara evidência de carbonatação. Esta constatação confirma o esperado, que, ao longo do tempo, as argamassas de cal hidráulica tendem a reagir com o CO₂ atmosférico, aumentando assim a profundidade de carbonatação [22, 95].

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas, não se visualiza a olho nu quaisquer alterações na profundidade de carbonatação. No entanto, esta afirmação carece de confirmação por parte das medições que deveriam ter sido realizadas (Secção 3.6.4). Contrariamente ao observado no presente estudo, o aumento da profundidade de carbonatação com o aumento de incorporação do resíduo de FCC, foi confirmado por outros autores em estudos de argamassas de cimento [79, 96, 97].

4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Como já foi referido anteriormente, na secção 2.3.2, o comportamento das argamassas em relação à água é a principal razão para garantir a durabilidade das mesmas, uma vez que a água é o elemento que mais danos pode causar ao correto “funcionamento” das argamassas.

Assim sendo, os resultados experimentais obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade contribuem para a caracterização dos materiais à base de cal hidráulica, sobretudo no que diz respeito à sua durabilidade. Uma argamassa que apresente menor coeficiente de capilaridade estará, à partida, mais capaz de se proteger contra mecanismos de degradação, como por exemplo, ciclos gelo/degelo e infiltrações de água.

Este ensaio permite, também, fazer uma avaliação indireta da densidade do material, uma vez que quanto mais denso for o material, teoricamente, menor será o seu

coeficiente de absorção capilar. Por conseguinte, ao longo do tempo de hidratação, é esperado que as argamassas apresentem coeficientes de capilaridade menores.

Como já foi mencionado anteriormente, na secção 2.4.2, o resultado da reação pozolânica dá origem a materiais com a matriz mais densa. Assim sendo, relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, é esperado que até uma determinada percentagem de incorporação haja uma densificação da matriz, e que esta se traduza na diminuição do coeficiente de capilaridade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade (Secção 3.6.5) foi realizado sobre semi-amostras para cada idade de hidratação (28 e 91 dias) e para cada argamassa.

Os coeficientes de capilaridade médios – C ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) – são calculados a partir dos declives das retas de ajuste da absorção de água por capilaridade, conforme o descrito na secção 3.6.5. O Anexo D.5 apresenta os resultados obtidos no ensaio de capilaridade, bem como as figuras com as retas de ajuste da absorção de água por capilaridade.

A Figura 4.20 apresenta os valores dos coeficientes de capilaridades médios, calculados para os 28 e 91 dias de hidratação, das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.

A Figura 4.20 está organizada, da esquerda para a direita, da seguinte forma: aumentando a incorporação de FCC em cada série de argamassas, desde os 0 aos 15% de incorporação, sendo que primeiro está representada a série s/adjuvantes e, de seguida, as séries Hid, 0.5Hid e 0Hid. Em cada argamassa, as barras da esquerda representam os valores dos coeficientes de capilaridade aos 28 dias de hidratação e as barras da direita apresentam os valores dos coeficientes de capilaridade aos 91 dias de hidratação.

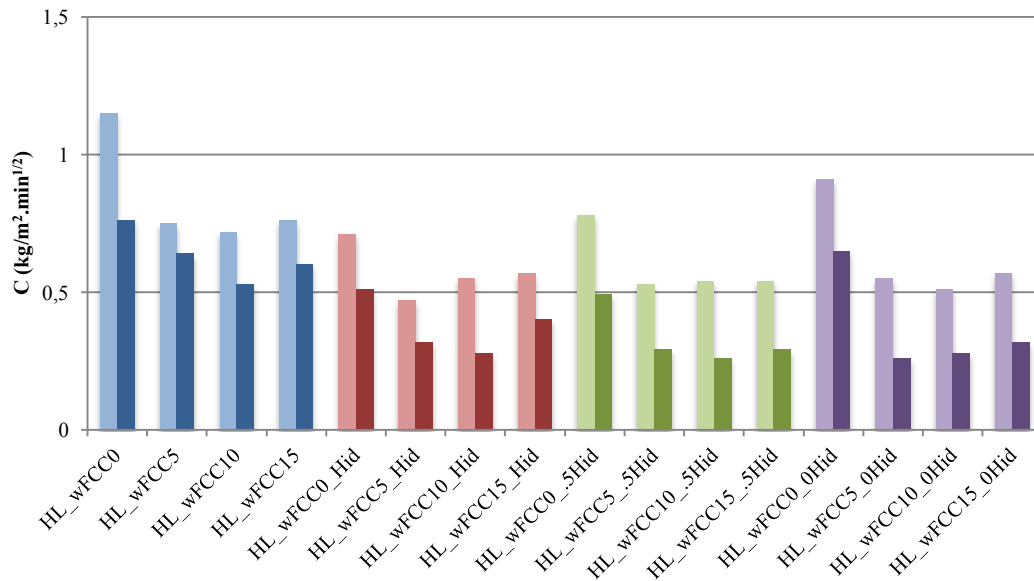


Figura 4.20 - Coeficientes de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo. (Em cada argamassa, as barras da esquerda representam os valores de coeficientes de capilaridade aos 28 dias de hidratação e as da direita os valores de coeficientes de capilaridade aos 91 dias de hidratação).

O Quadro 4.13 apresenta os valores dos coeficientes de capilaridade das argamassas para as diferentes idades de hidratação, calculados pelas retas de ajuste (C_{ajuste}), assim como, os valores dos coeficientes de capilaridade das argamassas calculados pela equação 3.8 (Secção 3.6.5) (C_{eq}).

Através da análise do Quadro 4.13 verifica-se que, tipicamente, os coeficientes de capilaridade das argamassas s/adjuvantes obtidos pela equação 3.8 (Secção 3.6.5) são ligeiramente mais elevados relativamente aos obtidos pelas retas de ajuste. Relativamente às argamassas das séries com adjuvantes, não se verifica nenhuma variação significativa dos coeficientes de capilaridade, calculados pela reta de ajuste e pela equação.

Os coeficientes de capilaridade apresentados no Quadro 2.4 (Secção 2.3.2) e na norma NP EN 998-1:2000 [1] foram calculados de acordo com a equação 3.8. No entanto, e uma vez que não se verificam diferenças significativas nos coeficientes de capilaridade calculados pela equação 3.8 e pela reta ajuste, analisar-se-ão os resultados com base nos coeficientes de capilaridade das argamassas calculados a partir das retas de ajuste (Anexo D.5).

Quadro 4.13 - Coeficientes de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo

Coeficientes de capilaridade médios ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)					
		28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
Série	Composição	C_{ajuste}	C_{ajuste}	$C_{\text{eq.}}$	$C_{\text{eq.}}$
s/adjuvantes	HL_wFCC0	1,15	0,76	1,25	0,84
	HL_wFCC5	0,75	0,64	0,87	0,69
	HL_wFCC10	0,72	0,53	0,76	0,55
	HL_wFCC15	0,76	0,60	0,78	0,64
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,71	0,51	0,72	0,53
	HL_wFCC5_Hid	0,47	0,32	0,48	0,31
	HL_wFCC10_Hid	0,55	0,28	0,54	0,28
	HL_wFCC15_Hid	0,57	0,40	0,54	0,4
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,78	0,49	0,78	0,49
	HL_wFCC5_.5Hid	0,53	0,29	0,55	0,29
	HL_wFCC10_.5Hid	0,54	0,26	0,54	0,25
	HL_wFCC15_.5Hid	0,54	0,29	0,54	0,29
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,91	0,65	0,87	0,63
	HL_wFCC5_0Hid	0,55	0,26	0,53	0,24
	HL_wFCC10_0Hid	0,51	0,28	0,49	0,27
	HL_wFCC15_0Hid	0,57	0,32	0,52	0,32

Analisando a Figura 4.20 e o Quadro 4.13 verifica-se que, para todas as argamassas os coeficientes de capilaridade diminuem ao longo do tempo. Isto seria expectável, uma vez que os materiais à base de cal hidráulica tendem a densificar a sua matriz ao longo do tempo, reduzindo a dimensão dos seus poros e, conseqüentemente, dificultando a passagem de água no seu interior. Esta constatação foi verificada no trabalho prévio realizado no mesmo laboratório do ISEL, por outro autor, no estudo de argamassas de cal hidráulica com incorporação de FCC [14].

Verifica-se, também, que as argamassas que contêm adjuvantes na sua composição apresentam coeficientes de capilaridade inferiores, em comparação com as argamassas da série s/adjuvantes. Esta diferença é atribuída ao uso de adjuvantes na composição das argamassas, como os adjuvantes hidrófugo e introdutor de ar, que interrompem a capilaridade das argamassas e impedem a circulação de água no seu interior (subsecção 2.3.1.3).

Constata-se, também, pela análise da Figura 4.20 e do Quadro 4.13, que as argamassas que contêm o resíduo FCC na sua composição apresentam valores de coeficientes de capilaridade inferiores aos das argamassas sem incorporação do

resíduo, ou seja, o FCC dificulta a absorção de água nas argamassas. Isto seria expectável devido à reação pozolânica do FCC que torna os materiais mais densos e, conseqüentemente, menos porosos (como já foi explicado no início da secção 4.3.4). Estes resultados são concordantes com os obtidos por outros autores: no trabalho prévio realizado no mesmo laboratório sobre argamassas de cal hidráulica com incorporação de FCC até 10% do ligante [14] e em argamassas de betão com incorporação até 20% do mesmo resíduo [79, 80].

Em argamassas de cal hidráulica com incorporação de outra pozolana, nomeadamente o metacaulino, verificou-se a mesma tendência. As argamassas que contêm metacaulino na sua composição tendem a absorver água por capilaridade mais lentamente que as argamassas sem a pozolana [83, 98].

Analisando o Quadro 4.13 verifica-se que, tipicamente, há uma tendência de diminuição dos coeficientes de capilaridade até aos 10% de incorporação do resíduo de FCC. Por outro lado, quando se incorpora 15% de FCC nas argamassas, verifica-se um ligeiro aumento dos coeficientes de capilaridade, porém, esse aumento nunca atinge os valores de coeficientes de capilaridade das argamassas sem incorporação de FCC. Excepções a este comportamento verificam-se, aos 91 dias de hidratação, nas argamassas da série 0Hid, que tendem a aumentar os seus coeficientes de capilaridade a partir dos 10% de incorporação do resíduo de FCC.

Em comparação com os valores de coeficientes de capilaridade propostos para as argamassas de reabilitação de edificios antigos (Quadro 2.4 $\rightarrow 8 < C < 12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ $\Leftrightarrow 1,03 < C < 1,55 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) verifica-se que, todas argamassas apresentam, aos 28 e 91 dias de hidratação, valores de coeficientes de capilaridade inferiores ao intervalo proposto. A argamassa HL_wFCC0 é a única que, aos 28 dias de hidratação, apresenta valores no intervalo proposto pelos requisitos. Assim, verifica-se que todas as argamassas apresentam uma melhoria dos coeficientes de capilaridade, face ao intervalo proposto para argamassas de reabilitação de edificios antigos.

Em relação aos requisitos estabelecidos na NP EN 998-1 [1] ($C \leq 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), todas as argamassas das séries com adjuvantes e com incorporação de FCC satisfazem, aos 91 dias de hidratação, o definido na norma.

Comparando, aos 91 dias de hidratação, os resultados dos coeficientes de capilaridade da argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), com os resultados das argamassas das séries com adjuvantes, verifica-se que apenas a argamassa HL_wFCC0_0Hid apresenta um coeficiente de capilaridade superior ao da argamassa que reproduz a comercial. As restantes argamassas com FCC e adjuvantes na sua constituição apresentam uma melhoria na resistência à água, em relação à argamassa que reproduz a argamassa comercial.

À semelhança das análises dos resultados anteriores, a apresentação e discussão dos resultados apresentados na Figura 4.20 e no Quadro 4.13 é feita para cada uma das séries de argamassas.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam, respetivamente, aos 28 e 91 dias de hidratação, as curvas de absorção de água por capilaridade, das argamassas da série s/adjuvantes, ao longo do tempo de ensaio.

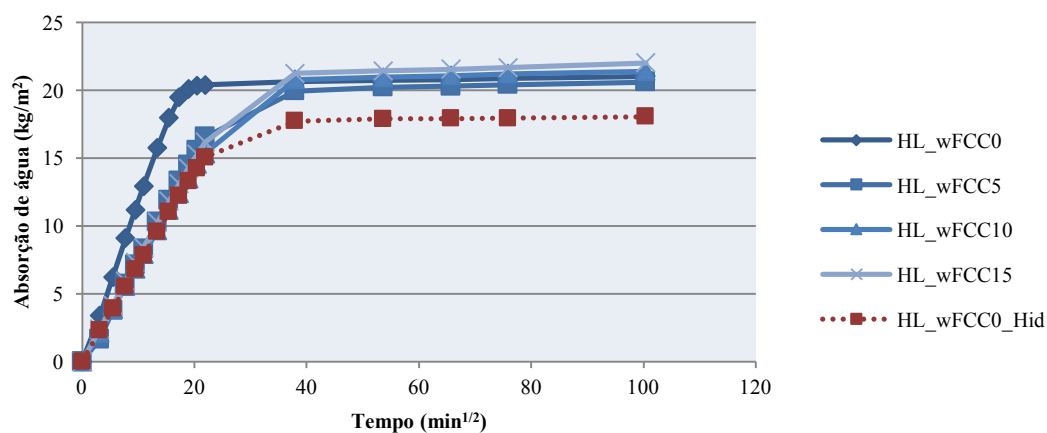


Figura 4.21 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série s/adjuvantes, aos 28 dias de hidratação.

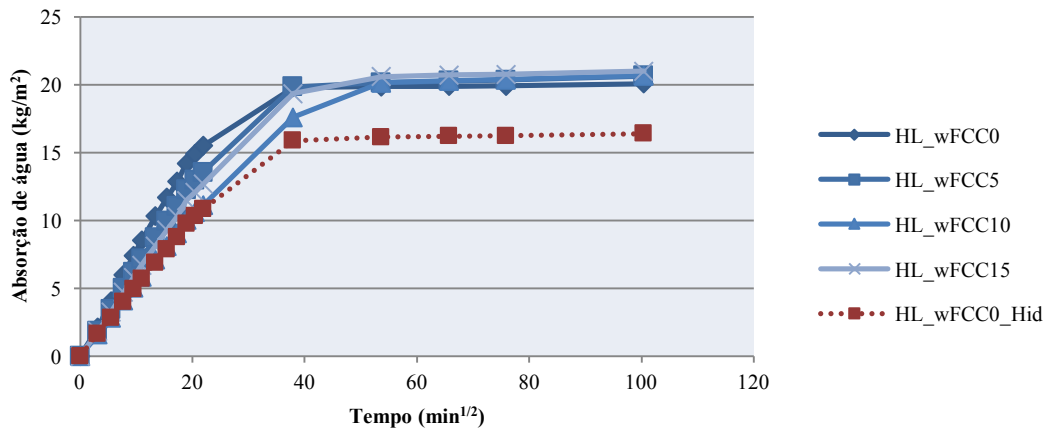


Figura 4.22 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série s/adjuvantes, aos 91 dias de hidratação.

Pela observação das Figuras 4.21 e 4.22 verifica-se que a argamassa sem incorporação de FCC – HL_wFCC0 – absorve água mais rapidamente comparativamente às argamassas com incorporação de FCC, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação.

Aos 28 e 91 dias de hidratação, não existem diferenças significativas nas quantidades finais de água absorvidas nas diferentes argamassas da série s/adjuvantes.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam, respetivamente, aos 28 e 91 dias de hidratação, as curvas de absorção de água por capilaridade, das argamassas da série Hid, ao longo do tempo de ensaio.

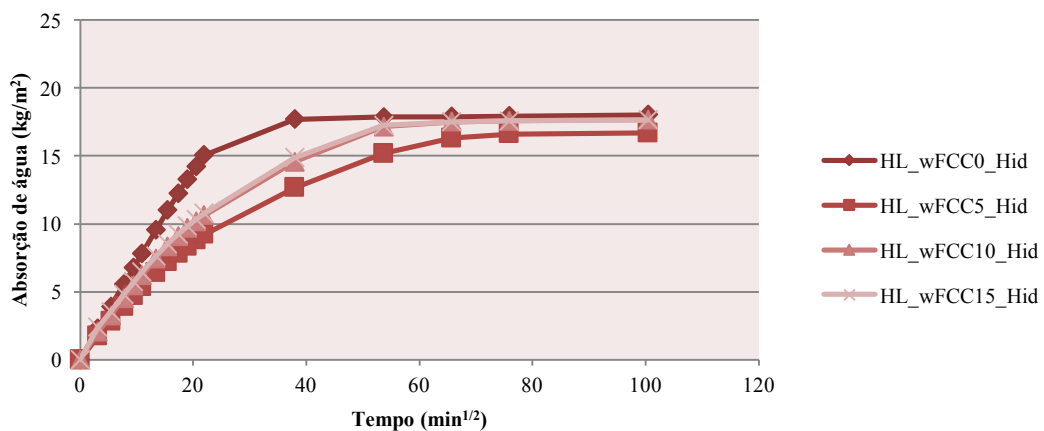


Figura 4.23 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série Hid, aos 28 dias de hidratação.

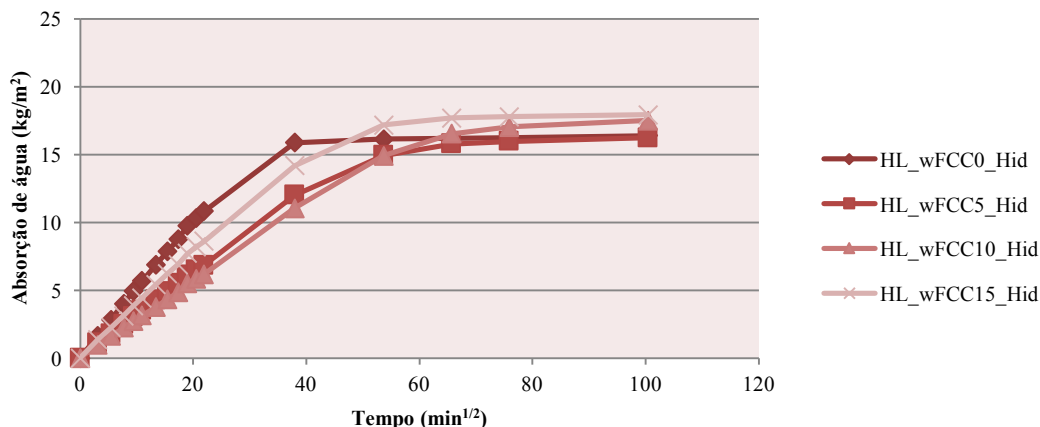


Figura 4.24 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série Hid, aos 91 dias de hidratação.

Pela análise da Figura 4.23 e 4.24 observa-se que, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação, a argamassa sem FCC na sua composição absorve água mais rapidamente, comparativamente às restantes argamassas da série Hid. Verifica-se também que, aos 28 dias de hidratação, a argamassa com 5% de FCC, revela menor quantidade final de água absorvida por capilaridade relativamente às restantes argamassas. As restantes argamassas da série Hid apresentam, aos 28 dias de hidratação, a mesma quantidade final de absorção de água por capilaridade.

Aos 91 dias de hidratação, as argamassas com maior percentagem de incorporação de FCC (10 e 15%) absorvem uma maior quantidade final de água relativamente à argamassa sem FCC e com 5% de FCC.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), aos 91 dias de hidratação, só a argamassa HL_wFCC5_Hid apresenta uma absorção final de água por capilaridade, sensivelmente igual, à que reproduz a comercial. As restantes argamassas, com 5 e 10% de incorporação de FCC, apresentam, aos 91 dias de hidratação, maior quantidade final de água absorvida, relativamente à argamassa HL_wFCC0_Hid.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam, respetivamente, aos 28 e 91 dias de hidratação, as curvas de absorção de água por capilaridade, das argamassas da série 0.5Hid, ao longo do tempo de ensaio.

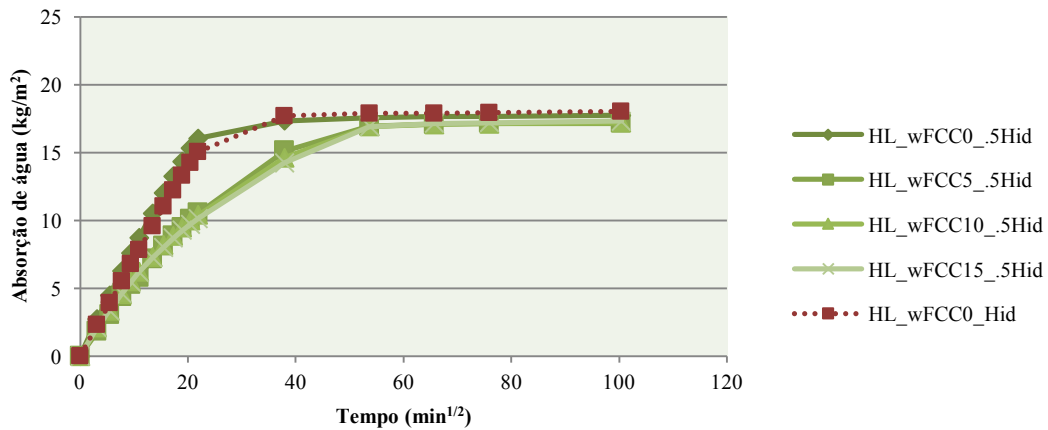


Figura 4.25 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0.5Hid, aos 28 dias de hidratação.

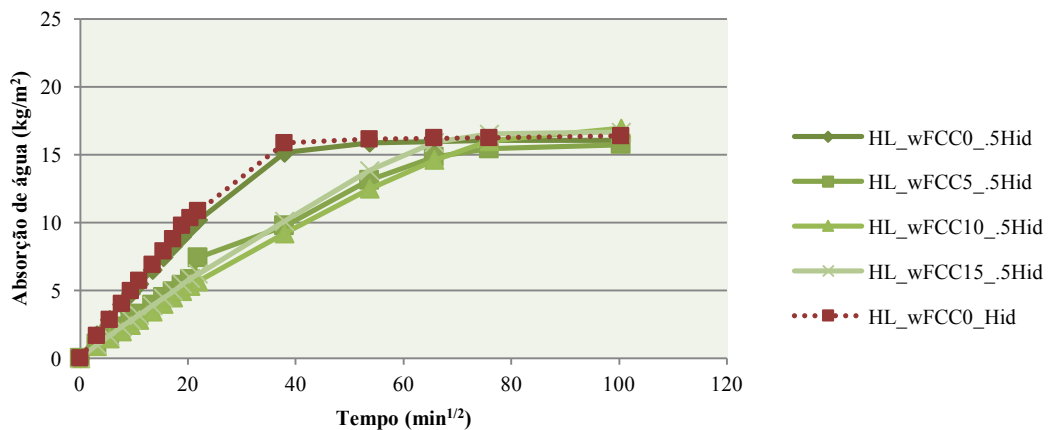


Figura 4.26 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0.5Hid, aos 91 dias de hidratação.

Pela análise das Figuras 4.25 e 4.26 verifica-se, novamente, que a argamassa sem incorporação de FCC (HL_wFCC0_5Hid), absorve água mais rapidamente, relativamente às restantes argamassas com incorporação de FCC, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação. As argamassas com incorporação de FCC tendem a absorver água mais rapidamente aos 28 dias do que aos 91 dias de hidratação.

Aos 91 dias de hidratação, todas as argamassas tendem a absorver uma menor quantidade final de água em relação aos 28 dias de hidratação.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial (HL_wFCC0_Hid), todas as argamassas desta série apresentam, aos 91 dias de hidratação, absorções finais de água sensivelmente iguais às da argamassa que reproduz a comercial (Figura 4.26). No entanto, as argamassas da série 0.5Hid com incorporação de FCC atrasam a absorção de água relativamente à argamassa que reproduz a argamassa comercial, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam, respetivamente, aos 28 e 91 dias de hidratação, as curvas de absorção de água por capilaridade, das argamassas da série 0Hid, ao longo do tempo de ensaio.

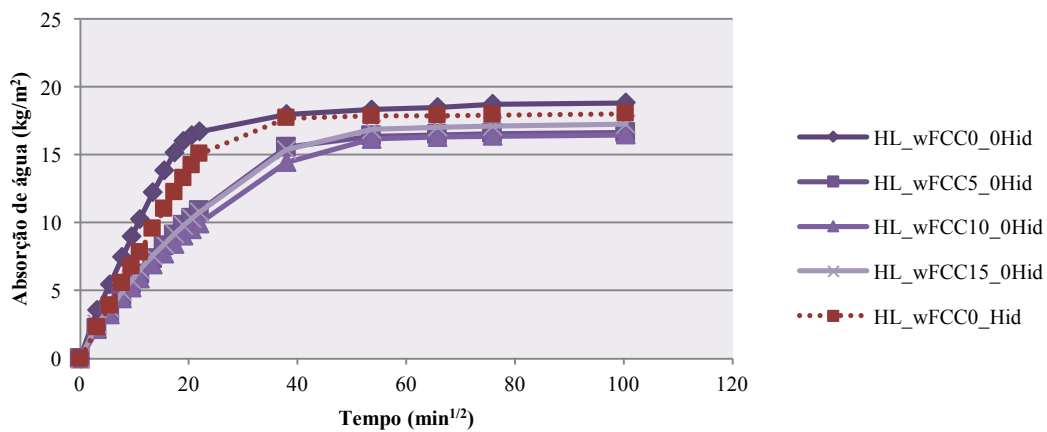


Figura 4.27 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0Hid, aos 28 dias de hidratação.

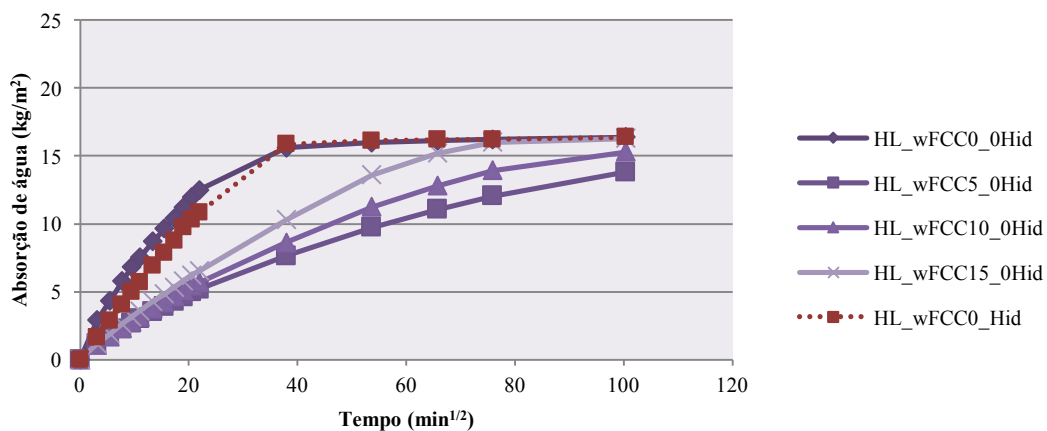


Figura 4.28 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas da série 0Hid, aos 91 dias de hidratação.

Pela análise das Figura 4.27 e 4.28, aos 28 e 91 dias de hidratação, verifica-se a tendência observada nas restantes séries: a argamassa sem incorporação de FCC absorve água mais rapidamente do que as restantes argamassas com incorporação de FCC.

Aos 28 dias de hidratação (Figura 4.27), as argamassas com incorporação de FCC absorvem uma menor quantidade final de água em comparação com a argamassa sem FCC na sua composição. Relativamente aos 91 dias de hidratação (Figura 4.28), não é possível retirar a mesma conclusão, uma vez que as argamassas com 5 e 10% de FCC não estabilizaram as suas absorções. No entanto, verifica-se que há uma tendência para estabilizarem os seus valores de absorção de água a partir do 7º dia ($100 \text{ min}^{1/2}$) de ensaio.

Em comparação com a argamassa que reproduz a argamassa comercial, aos 91 dias de hidratação (Figura 4.28), as argamassas com incorporação de 5 e 10% de FCC, parecem apresentar uma diminuição da quantidade final de água absorvida. As argamassas com 0 e 15% de incorporação do resíduo de FCC apresentam, sensivelmente, as mesmas quantidades finais de água absorvidas que a argamassa que reproduz a comercial.

À semelhança do que se verificou na série 0.5Hid, as argamassas da série 0Hid com incorporação de FCC atrasam a absorção de água por capilaridade, relativamente à argamassa que reproduz a argamassa comercial.

Fazendo uma apreciação global, verifica-se que o hidrófugo tem de facto influência na absorção de água por capilaridade, como seria esperado. Isto verifica-se nas argamassas com adjuvantes e sem incorporação de FCC, uma vez que à medida que se diminui a quantidade de hidrófugo utilizada, a quantidade final de água absorvida pelas argamassas aumenta, assim como a velocidade de absorção de água nas argamassas, o que se traduz no aumento do coeficiente de absorção capilar (Quadro 4.13).

Nas argamassas das diferentes séries com adjuvantes, aos 91 dias de hidratação, quando se incorpora 5% de FCC e à medida que se diminui a quantidade de hidrófugo

usada, verifica-se uma diminuição do coeficiente de capilaridade das argamassas. Com a incorporação de 10% de FCC e à medida que se diminui a quantidade de hidrófugo, constata-se que não existem diferenças significativas nos coeficientes de capilaridade. Por sua vez, com a incorporação de 15% de FCC e à medida que se diminui a quantidade de utilização do hidrófugo, verifica-se que há uma diminuição significativa do coeficiente de capilaridade da argamassa HL_wFCC15_Hid, relativamente à argamassa HL_wFCC15_.5Hid. Na argamassa HL_wFCC15_0Hid há um aumento do coeficiente de capilaridade relativamente à argamassa HL_wFCC15_.5Hid (Quadro 4.13).

Constata-se, também, que à medida que se diminui a percentagem de utilização do adjuvante hidrófugo e se aumenta a incorporação de FCC nas argamassas, obtêm-se argamassas com menores coeficientes de absorção de água por capilaridade e menores quantidades finais de água absorvidas, quando comparadas com a argamassa que reproduz a comercial. Isto é, na série 0Hid, consegue-se incorporar 15% de FCC e obter a mesma quantidade final de absorção de água que se obtém na argamassa que reproduz a argamassa comercial e com coeficiente de absorção capilar inferior. Esta constatação vem confirmar o esperado, que o resíduo de FCC tem capacidade de atuar como hidrófugo.

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam a relação entre os valores de tensão de rotura à compressão (Subsecção 4.3.2.2) e os coeficientes de capilaridade, aos 28 e 91 dias de hidratação, respetivamente. Tipicamente, a uma argamassa com maior resistência mecânica à compressão está associada uma argamassa com uma matriz mais densa e, quanto mais densa for a matriz da argamassa, mais fechada será a sua estrutura porosa e, teoricamente, menor será o seu coeficiente de absorção capilar.

Noutros trabalhos realizados com incorporação do resíduo de FCC, verificou-se que, em argamassas de cimento [78] e em eco-betão [80], associado a um menor valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade está associado um maior valor de resistência mecânica à compressão.

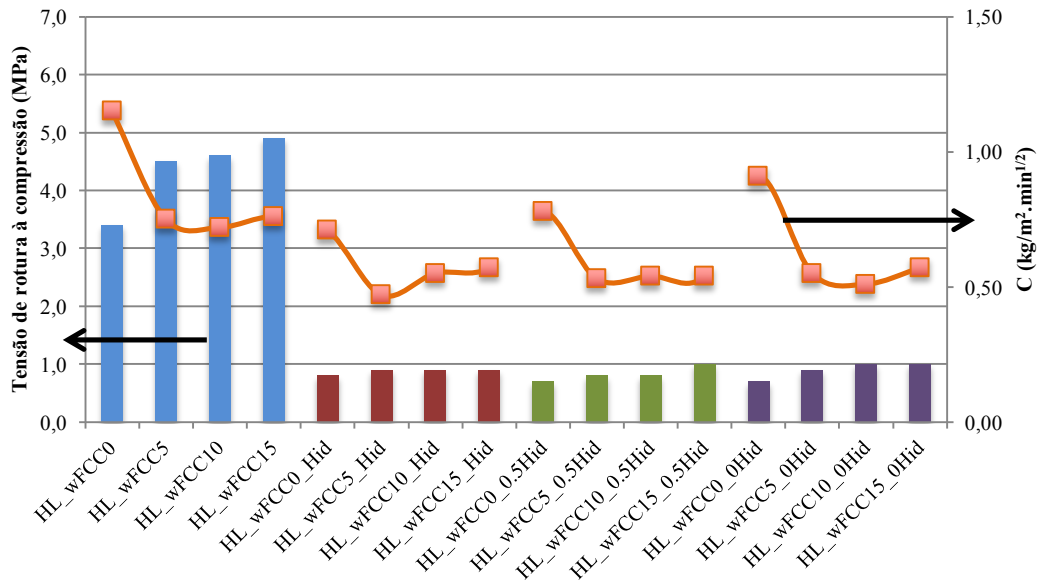


Figura 4.29 – Relação entre a tensão de rotura à compressão (MPa) e o coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), aos 28 dias de hidratação, das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.

Analisando a Figura 4.29 constata-se que, aos 28 dias de hidratação, tipicamente associado a um aumento da resistência mecânica à compressão, está associado uma diminuição do valor do coeficiente de capilaridade. Esta constatação confirma o explicado no início da presente secção, que a uma densificação da matriz está associado um menor fluxo capilar da água no interior da argamassa.

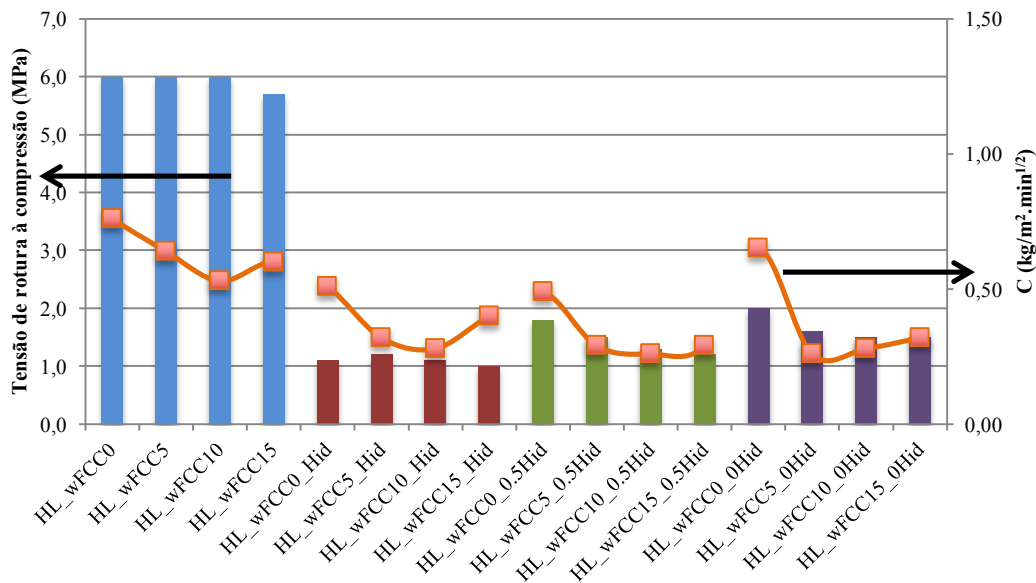


Figura 4.30 - Relação entre a tensão de rotura à compressão (MPa) e o coeficiente de capilaridade (kg/m².min^{1/2}), aos 91 dias de hidratação, das argamassas preparadas com as diferentes composições em estudo.

Pela análise da Figura 4.30 não se verifica a tendência de diminuição do coeficiente de capilaridade com o aumento da resistência mecânica da argamassa. Aos 91 dias de hidratação, verifica-se que com o aumento de incorporação de FCC nas argamassas está associado, tipicamente, uma diminuição da resistência mecânica à compressão, sobretudo nas argamassas das séries 0.5Hid e 0Hid, e uma diminuição dos coeficientes de capilaridade. Isto pode dever-se ao facto de os adjuvantes e o resíduo de FCC contribuírem para fechar os poros das argamassas, reduzindo desta forma a sua absorção capilar, mas não contribuírem mecanicamente para a resistência à compressão das mesmas.

Analisando as Figura 4.29 e 4.30 verifica-se que, ao longo do tempo de hidratação, para todas as argamassas há um aumento das resistências mecânicas à compressão, associado a uma diminuição do respetivo valor do coeficiente de capilaridade.

4.3.5 SECAGEM

O ensaio de secagem tem como objetivo avaliar o tempo de secagem das argamassas, ou seja, o tempo necessário para as argamassas libertarem a água absorvida por

capilaridade. À semelhança do ensaio de absorção de água por capilaridade, o ensaio de secagem foi realizado aos 28 e 91 dias de hidratação.

Como já foi referido anteriormente, na secção 3.6.6, as amostras usadas neste ensaio são as mesmas usadas no ensaio de absorção de água por capilaridade (Secção 3.6.5).

Para todas as argamassas estudadas, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação, foi feito um acompanhamento diário (até ao 7º dia) da secagem das argamassas. No entanto, esse acompanhamento não é suficiente para se obterem resultados rigorosos da secagem ao longo do tempo, por isso, foi necessário prolongar o tempo de ensaio até as argamassas obterem massa sensivelmente constante.

As Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34 apresentam, respetivamente, o teor em água, aos 28 dias de hidratação, das argamassas com as diferentes composições em estudo das séries s/adjuvantes, Hid, 0.5Hid e 0Hid. Os valores obtidos na realização do ensaio de secagem são apresentados no Anexo D.6.

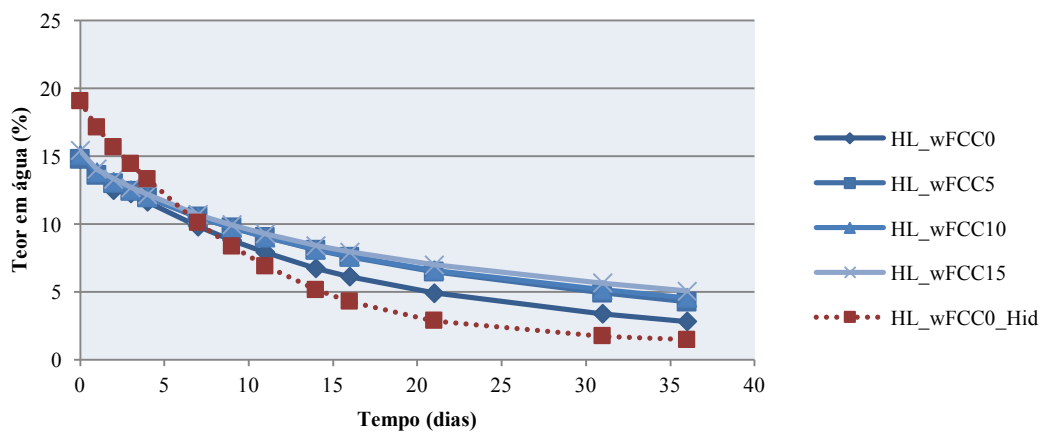


Figura 4.31. - Teor em água das argamassas da série s/adjuvantes, aos 28 dias de hidratação.

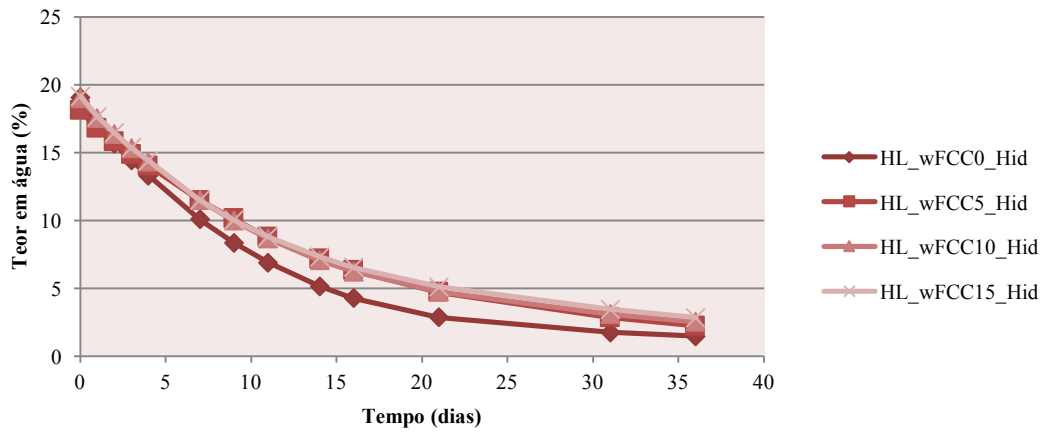


Figura 4.32 - Teor em água das argamassas da série Hid, aos 28 dias de hidratação.

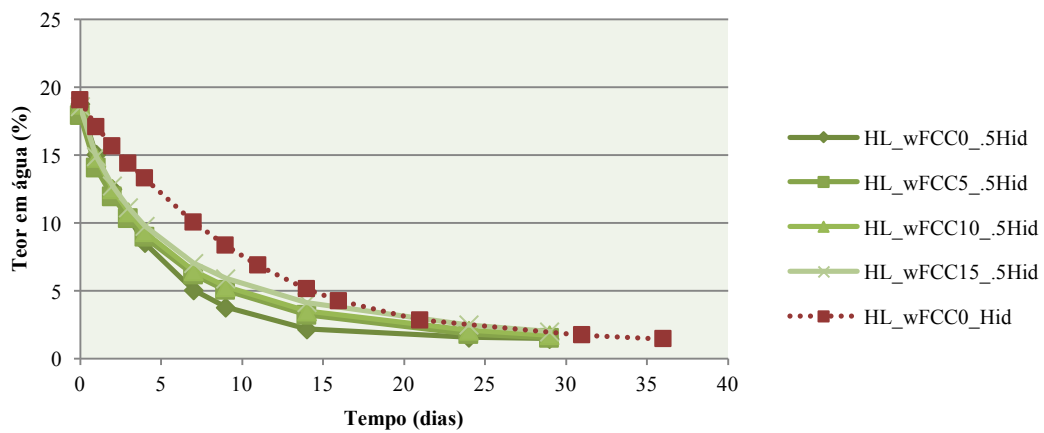


Figura 4.33 - Teor em água das argamassas da série 0.5Hid, aos 28 dias de hidratação.

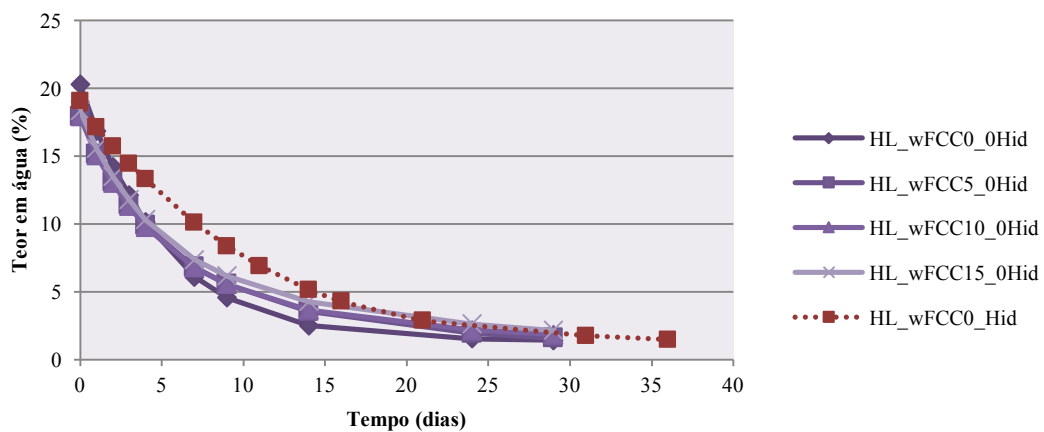


Figura 4.34 - Teor em água das argamassas da série 0Hid, aos 28 dias de hidratação.

Através da análise das Figuras 4.31-4.34 verifica-se que, em todas as séries, as argamassas sem incorporação de FCC tendem a perder água mais rapidamente do que

as argamassas que contêm FCC na sua composição. Esta constatação é mais evidente nas séries s/adjuvantes e Hid. Estes factos podem ser comprovados pelos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade (Secção 4.3.4), nos quais as argamassas com resíduo de FCC apresentam menores coeficientes de absorção capilar e, conseqüentemente, demoram mais tempo a absorver água. Isto pode ser atribuído à reação pozolânica do FCC, que origina argamassas mais densas, diminuindo a porosidade das mesmas e, conseqüentemente, dificultando a circulação da água nas argamassas. Assim, este resíduo pode atrasar o tempo de secagem das argamassas, comparativamente às argamassas sem FCC.

O atraso na secagem das argamassas com incorporação de uma pozolana foi verificado, também, noutro estudo em argamassas de cal hidráulica com metacaulino [83]. Neste estudo constatou-se que quanto maior a percentagem de metacaulino usada nas argamassas, maior é o tempo de secagem das argamassas.

O teor de incorporação de FCC não influencia significativamente o tempo de secagem das argamassas aos 28 dias de hidratação. Todas as argamassas com incorporação de FCC tendem a ter o mesmo comportamento de secagem ao longo do ensaio.

As Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38 apresentam, respetivamente, o teor em água, aos 91 dias de hidratação, das argamassas com as diferentes composições em estudo das séries s/adjuvantes, Hid, 0.5Hid e 0Hid.

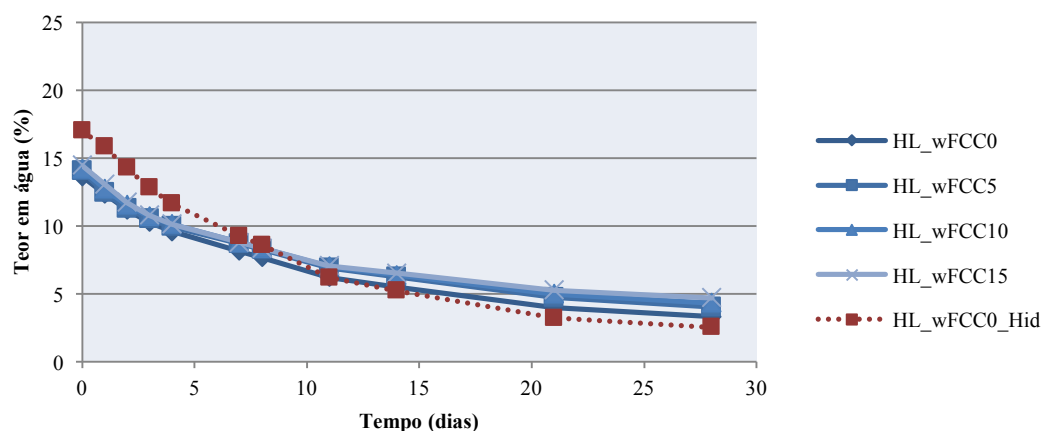


Figura 4.35 - Teor em água das argamassas da série s/adjuvantes, aos 91 dias de hidratação.

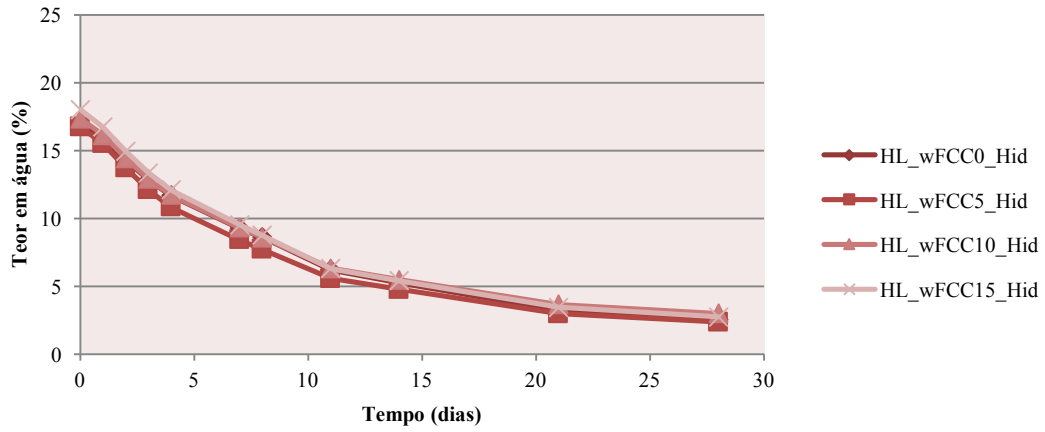


Figura 4.36 - Teor em água das argamassas da série Hid, aos 91 dias de hidratação.

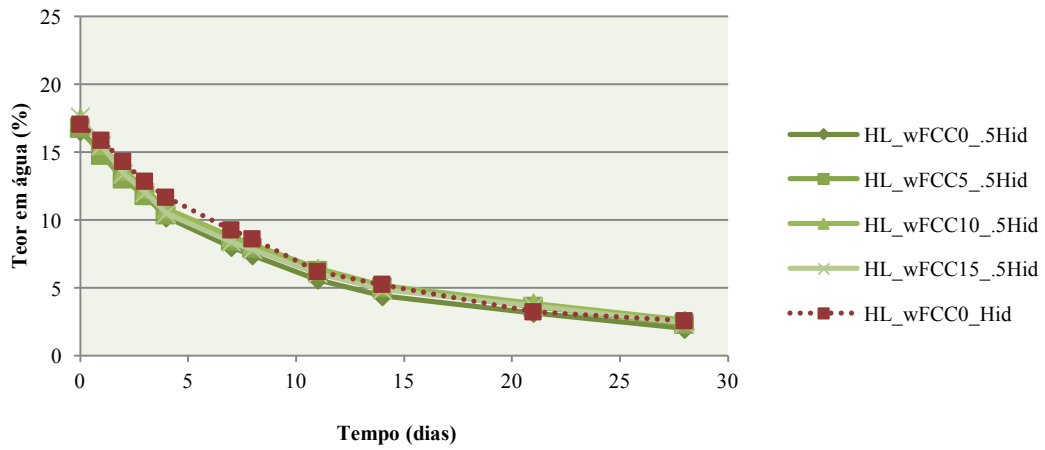


Figura 4.37 - Teor em água das argamassas da série 0.5Hid, aos 91 dias de hidratação.

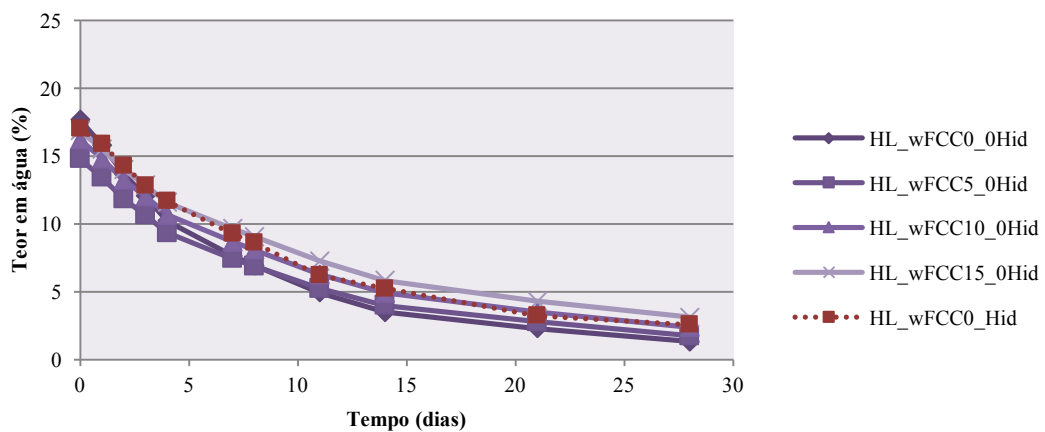


Figura 4.38 - Teor em água das argamassas da série 0Hid, aos 91 dias de hidratação.

Através da análise das Figuras 4.35-4.38 e, ao contrário do observado aos 28 dias de hidratação, verifica-se que não existem diferenças significativas nas curvas de secagem das argamassas das séries com adjuvantes.

Relativamente ao efeito de incorporação do resíduo de FCC, constata-se que o teor de incorporação de FCC não tem uma influência significativa no comportamento de secagem nas argamassas das diferentes séries. A exceção a este comportamento verifica-se nas argamassas da série 0Hid, nas quais partir dos 10% de incorporação do resíduo de FCC se verifica um ligeiro atraso na secagem, em relação às outras argamassas da mesma série.

As argamassas da série Hid e 0.5Hid têm um comportamento de secagem semelhante ao da argamassa que reproduz a argamassa comercial. Por sua vez, as argamassas HL_wFCC0_0Hid e HL_wFCC5_0Hid, da série 0Hid, tendem a secar mais rapidamente que a argamassa comercial. A argamassa HL_wFCC10_0Hid, da série 0Hid, tem o mesmo comportamento de secagem que a argamassa que reproduz a comercial e a argamassa HL_wFCC15_0Hid tende a demorar mais tempo a secar que a argamassa que reproduz a comercial.

Relativamente à influência da incorporação do adjuvante hidrófugo nas argamassas, verifica-se que o hidrófugo não tem uma influência significativa no tempo de secagem das argamassas, à semelhança do resíduo de FCC.

4.3.6 PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA

O ensaio de permeabilidade à água líquida (Secção 3.6.7) consiste em avaliar a capacidade que a argamassa tem em deixar-se atravessar pela água, quando em contacto com água sob pressão. Este ensaio foi realizado, ao fim de 28 e 91 dias de hidratação, em 4 amostras cilíndricas preparadas para cada argamassa em estudo.

Os resultados deste ensaio apresentam uma significativa dispersão nos valores obtidos que pode estar associada ao erro do próprio ensaio. Esta dispersão, pode também estar relacionada com a dificuldade na fixação do tubo Karsten às amostras cilíndricas, que

muitas vezes se traduziu na perda de água por baixo do mesmo e, conseqüentemente, na impossibilidade da realização do ensaio.

Neste sentido, optou-se por não apresentar os resultados do ensaio de permeabilidade à água líquida, devido à incerteza e dispersão dos valores obtidos. No entanto, os valores obtidos na realização deste ensaio encontram-se expostos no Anexo D.7.

No Anexo D.7 não se apresentam os resultados das argamassas da série 0Hid, tanto aos 28 como aos 91 dias de hidratação, uma vez que não foi possível realizar medições. Isto deve-se ao facto de as argamassas desta série absorverem os 4 cm³ de água (volume máximo do tubo de Karsten) antes do primeiro minuto de ensaio. Este facto pode ser atribuído à não utilização do adjuvante hidrófugo nesta série de argamassas, facilitando desta forma a infiltração da água pelo interior da argamassa.

4.3.7 ADERÊNCIA À TRAÇÃO (*PULL-OFF*)

O ensaio de *Pull-off* foi realizado, aos 28 e 91 dias de hidratação, em amostras de argamassas preparadas em tijolo furado (Secção 3.6.8). Este ensaio tem como objetivo estudar a influência da incorporação de FCC na resistência à tração das argamassas.

À semelhança do que aconteceu no ensaio de permeabilidade à água líquida (Secção 4.3.6) este ensaio apresenta resultados com uma dispersão muito grande. Para além da dispersão obtida, nem sempre foi possível ensaiar as 10 peças metálicas inicialmente previstas (Secção 3.6.8), uma vez que algumas descolavam do suporte antes do ensaio, ficando desta forma com uma dimensão de amostras pouco representativa.

Apesar de não se fazer uma análise crítica dos resultados obtidos, os mesmos apresentam-se no Anexo D.8. Durante a realização dos ensaios, verificou-se que ocorreu, predominantemente, rotura adesiva entre a argamassa e o suporte.

5. IMPACTO AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DE FCC EM ARGAMASSAS

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ainda ninguém pensou sobre aquilo que toda a gente vê.”

Arthur Schopenhauer

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo pretende-se avaliar as diferenças nas emissões de CO₂ resultantes da produção de uma tonelada de argamassa comercial de cal hidráulica, sem e com incorporação (de 5 a 15%, com incrementos de 5%) de FCC. A argamassa comercial, que serve de referência para este estudo, é fabricada e comercializada pela empresa CIARGA. Esta argamassa foi reproduzida neste trabalho com a designação HL_wFCC0_Hid (Capítulo 3 – Quadro 3.1).

Primeiramente, é necessário avaliar se a quantidade de FCC gerada, anualmente, em Portugal, é suficiente para incorporar até 15% em argamassas comerciais de cal hidráulica HL5 para reabilitação de edifícios. Em Portugal, são geradas, anualmente, 780 tons de resíduo de FCC (Secção 2.4.1). Na empresa CIARGA são comercializadas, anualmente, 375 tons de HL5⁸ [99] (em argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios). Verifica-se portanto, que a quantidade de FCC produzida anualmente, em Portugal, é suficiente para satisfazer as necessidades atuais de incorporação do resíduo de FCC (até 15%) em argamassas comerciais para reabilitação de edifícios, que utilizem a cal hidráulica HL5 como ligante.

Neste capítulo apenas são avaliadas as diferenças de emissões de CO₂ resultantes da incorporação de FCC nas argamassas, uma vez que as restantes emissões de CO₂, associadas ao fabrico de argamassas, se mantêm constantes. Assim, todos os outros processos inerentes ao fabrico de argamassas de cal hidráulica (como o processamento de agregados) não são considerados nesta análise.

Nesta avaliação ambiental são tidos em consideração os vários processos inerentes à produção da argamassa de cal hidráulica (com e sem FCC) na empresa CIARGA, e as emissões de CO₂ produzidas durante a produção de cal hidráulica na empresa SECIL. A Figura 5.1 representa uma esquematização dos processos inerentes à produção de argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, na empresa CIARGA, na qual se põem em evidência as emissões de gases (“1” – Figura 5.1) e os consumos de

⁸ A HL5 é a cal hidráulica em estudo neste trabalho, uma vez que é usada na argamassa comercial produzida pela CIARGA.

energia (“E” – Figura 5.1). Além disso, a Figura 5.1 apresenta, também, a representação esquemática com as modificações inerentes à produção de argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios com incorporação do resíduo de FCC (produzido na refinaria de Sines).

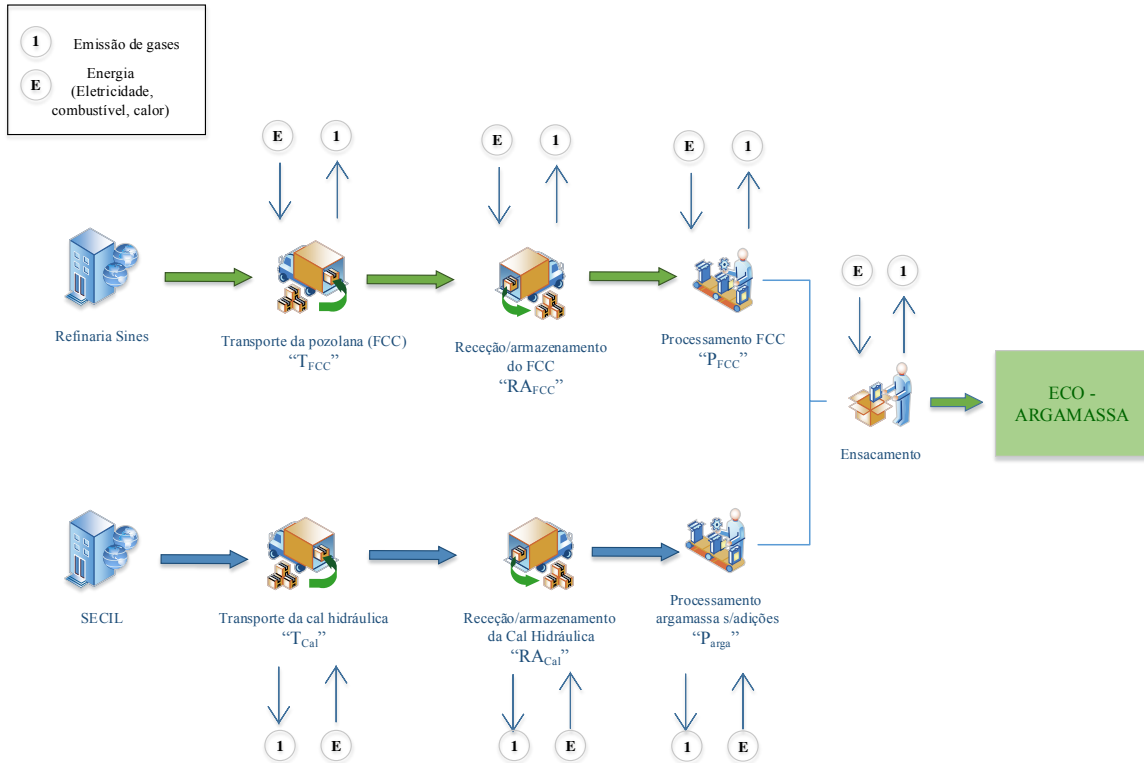


Figura 5.1 - Representação esquemática dos processos envolvidos na produção de argamassas de cal hidráulica, com resíduo de FCC, para reabilitação de edifícios.

A Figura 5.1 apresenta esquematizados os processos de “RA_{FCC}”, “RA_{Cal}” e “Ensacamento”. No entanto, estes processos são desprezados no cálculo das emissões de CO₂, uma vez que os seus impactos ambientais não são significativos. A Figura 5.1 faz referência, também, ao consumo energético associado a cada atividade (“E” - Figura 5.1). No entanto, e uma vez que não foi possível obter informação completa relativamente aos gastos energéticos associados aos processos apresentados na Figura 5.1, o consumo energético não será contabilizado neste capítulo.

O Quadro 5.1 apresenta os valores das emissões de CO₂ resultantes dos processos associados à produção de uma tonelada de argamassa de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, com incorporação de FCC entre 0 e 15% (em massa do

ligante), com incrementos de 5%. No subcapítulo 5.2 apresentam-se os cálculos das emissões de CO₂ (apresentadas no Quadro 5.1).

Quadro 5.1 - Análise do impacto ambiental na produção de uma tonelada de argamassa de cal hidráulica para reabilitação de edifícios, com incorporação de FCC entre 0 e 15% (em massa do ligante), com incrementos de 5%

COMPOSIÇÃO DO LIGANTE DA ARGAMASSA	Emissões CO ₂ (kg) no Processo de "T _{FCC} " e de "T _{Cal} " - Figura 5.1				Emissões CO ₂ (kg) por ton de cal hidráulica produzida (kg) ("SECIL" - Figura 5.1)	Emissões CO ₂ (kg) por ton de argamassa produzida sem adições ("P _{arga} " - Figura 5.1)	Emissões de CO ₂ (kg) por ton de argamassa produzida ("ECO - ARGAMASSA PRONTA" - Figura 5.1)	IDA - Índice de Desempenho Ambiental
	FCC		Cal					
	T _{FCC}	T _{FCC}	T _{Cal}	T _{Cal}				
%CAL	Total (p/a produção de 1500 ton)	Por ton de argamassa	Total (p/a produção de 1500 ton)	Por ton de argamassa				
100%	58,65	0,000	93,15	0,932	0,000	143,94	1,00	
95%		0,039		0,869	0,257	137,61	0,96	
90%		0,078		0,807	0,513	131,29	0,91	
85%		0,117		0,807	0,770	125,03	0,87	

5.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO₂

O presente subcapítulo apresenta os cálculos das emissões de CO₂, apresentadas no Quadro 5.1, resultantes dos processos inerentes à produção de uma tonelada de argamassa comercial de cal hidráulica, na empresa CIARGA, esquematizados na Figura 5.1.

As emissões de CO₂ serão avaliadas com o objetivo de determinar o impacto ambiental resultante da incorporação de diferentes teores de FCC (entre 0 e 15% de incorporação) numa tonelada de argamassa de cal hidráulica, comercializada pela CIARGA. Neste subcapítulo, a gama de incorporação de FCC avaliada (entre os 0 e 15%) corresponde à gama de incorporação de FCC usada nas argamassas preparadas na campanha experimental (Capítulo 3), e cujas propriedades foram avaliadas, anteriormente, no capítulo 4.

5.2.1 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE DE MATERIAL

Nesta secção apresentam-se as emissões de CO₂ resultantes do transporte do resíduo de FCC (“T_{FCC}” – Figura 5.1; coluna “T_{FCC}” – Quadro 5.1) e da cal hidráulica (“T_{Cal}” – Figura 5.1; coluna “T_{Cal}” – Quadro 5.1) até à CIARGA.

Primeiramente, é preciso determinar as quantidades de material necessário para produzir 1500 toneladas e 1 tonelada de argamassa por ano. De seguida, determina-se o número de viagens anuais necessárias ao transporte dos materiais. Assim, é possível determinar o impacto ambiental do transporte de cal hidráulica e de FCC para produzir uma tonelada de argamassa de cal hidráulica com incorporação de FCC na gama em estudo.

5.2.1.1 QUANTIDADE DE MATERIAL NECESSÁRIO PARA PRODUZIR UMA TONELADA DE ARGAMASSA DE CAL HIDRÁULICA

No ano de 2015, estão previstas serem produzidas 1500 toneladas de argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios [99]. A argamassa comercial é produzida

com 25% de ligante (cal hidráulica - que é substituída parcialmente pelo resíduo de FCC até 15%, com incrementos de 5%) e 75% de agregados. Como já foi referido no subcapítulo 5.1, a incorporação de agregados é desprezada nos cálculos das emissões de CO₂.

Assim sendo, o Quadro 5.2 apresenta as quantidades de ligante (FCC e de cal hidráulica) necessárias para produzir 1500 toneladas e 1 tonelada de argamassa, considerando a produção de argamassa de reabilitação com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC, e a argamassa de referência sem FCC, cujos cálculos se apresentam de seguida (Eq. 5.1 – 5.3).

$$\text{Quantidade de ligante (kg)} = 0,25 * (\% \text{ de FCC} + \% \text{ de Cal hidráulica}) * \text{Quantidade de argamassa produzida (kg)} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$\text{Quantidade de FCC (kg)} = 0,25 * \% \text{ de FCC} * \text{Quantidade de argamassa produzida (kg)} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$\text{Quantidade de cal hidráulica (kg)} = 0,25 * \% \text{ de Cal hidráulica} * \text{Quantidade de argamassa produzida (kg)} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Quadro 5.2 - Quantidades de FCC e Cal hidráulica para produzir 1500 toneladas e 1 tonelada de argamassa de reabilitação com incorporação, entre 0 e 15%, de FCC

Ligante		Quantidade de ligante para produzir 1500 tons de argamassa (kg)		Quantidade de ligante para produzir 1 ton de argamassa (kg)	
% FCC	% CAL	FCC	CAL	FCC	CAL
0	100	0	375 000	0	250,0
5	95	18 750	356 250	12,5	237,5
10	90	37 500	337 500	25,0	225,0
15	85	56 250	318 750	37,5	212,50

5.2.1.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE TRANSPORTE

Primeiramente, antes de se proceder aos cálculos das emissões de CO₂, resultantes do transporte de material para produzir uma tonelada de argamassa de cal hidráulica, com e sem FCC, descrevem-se as premissas usadas nos cálculos. Definiu-se que, tanto o resíduo de FCC, como a cal hidráulica, são transportados até à CIARGA através de um camião cisterna. Uma vez que não foram encontrados os valores

relativos às emissões de CO₂ por quilómetro percorrido, referentes ao camião cisterna, adotou-se a gasolina⁹ como combustível e um valor máximo tabelado de 345 gCO₂/km percorrido [100].

A refinaria de Sines (local onde é produzido o resíduo de FCC) fica à distância de 170 km da CIARGA e a Secil Martingança (local onde é produzida a cal hidráulica) fica à distância de 270 km da CIARGA (Quadro 5.3). De seguida, é preciso determinar o número de viagens (Quadro 5.3) para transportar as quantidades necessárias de FCC e de cal hidráulica, para produzir na CIARGA anualmente, argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios (neste caso 1500 toneladas de argamassa). Assim, e uma vez que cada camião cisterna consegue transportar 26 toneladas de produto [99], quer seja resíduo de FCC, quer seja cal hidráulica, determinam-se as emissões de CO₂ resultantes do transporte de FCC e de cal hidráulica para produzir uma tonelada de argamassa com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC e a argamassa de referência sem FCC.

Assim sendo, o Quadro 5.3 apresenta os valores necessários para calcular as emissões de CO₂ (Quadro 5.1 - coluna “T_{FCC}” e “T_{Cal}”) resultantes do transporte do resíduo de FCC e da cal hidráulica até à CIARGA (Figura 5.1 – “T_{FCC}” e “T_{Cal}”), para produzir uma tonelada de argamassa.

⁹ O transporte rodoviário na União Europeia (UE) é esmagadoramente efetuado por veículos a diesel. No entanto, e uma vez que não foram encontradas referências dos fabricantes sobre os consumos de combustível em camiões a diesel, decidiu-se adotar o maior valor tabelado encontrado. Neste caso a gasolina.

Quadro 5.3 - Emissões de CO₂ resultantes do transporte do resíduo de FCC e da cal hidráulica para produzir 1 tonelada de argamassa na CIARGA

Emissões de CO ₂ (g/km percorrido)	Transporte do FCC (Sines -> CIARGA)		Transporte da Cal Hidráulica Secil -> CIARGA)		Ligante		Nº viagens anuais no transporte de FCC e CAL para produzir 1500 tons de argamassa		Emissões CO ₂ (kg) no transporte de FCC e CAL para produzir 1 ton de argamassa	
	Distância (km)	Emissões CO ₂ (kg)	Distância (km)	Emissões CO ₂ (kg)	% FCC	% CAL	FCC	CAL	FCC	CAL
345	170	58,65	270	93,15	<u>0</u>	<u>100</u>	0	15	<u>0</u>	<u>0,932</u>
					<u>5</u>	<u>95</u>	1	14	<u>0,039</u>	<u>0,869</u>
					<u>10</u>	<u>90</u>	2	13	<u>0,078</u>	<u>0,807</u>
					<u>15</u>	<u>85</u>	3	13	<u>0,117</u>	<u>0,807</u>

De seguida, apresentam-se os cálculos relativos ao número de viagens anuais para transportar o FCC e a cal hidráulica (Eq.5.4), e os cálculos das emissões de CO₂ resultantes do transporte de FCC e de cal hidráulica para produzir uma tonelada de argamassa (Eq. 5.5).

$$\underline{N^{\circ} \text{ viagens anuais}} = \frac{\text{Quantidades de FCC/Cal hidráulica (kg) para produzir 1500 tons de argamassa}}{26\ 000 \text{ kg}} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$\underline{\text{Emissões de CO}_2 \text{ no transporte de FCC/Cal hidráulica para produzir uma ton de argamassa (kg)}} = \frac{X * Y * Z}{K} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

onde,

X – emissões de CO₂ no transporte de FCC/Cal hidráulica por viagem (Quadro 5.3);

Y – nº de viagens anuais necessárias para transportar o FCC/Cal hidráulica necessário para produzir 1500 toneladas de argamassa (Quadro 5.3);

Z – quantidade de FCC/Cal hidráulica necessária para produzir uma tonelada de argamassa (Quadro 5.2);

K – quantidade de FCC/Cal hidráulica necessária para produzir 1500 toneladas de argamassa (Quadro 5.2).

5.2.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES ADICIONAIS ASSOCIADAS À INCORPORAÇÃO DE ADIÇÕES

No processo de fabrico de argamassas de reabilitação de edifícios, na CIARGA, a incorporação de adições (“P_{FCC}” – Figura 5.1) exige a utilização adicional de um compressor primário e um compressor secundário no sistema de produção. A utilização destes dois compressores ao processo de fabrico de argamassas resulta em emissões adicionais de CO₂, já definidas no Quadro 5.1 (coluna “P_{FCC}”).

Assim sendo, e tendo em conta que por cada tonelada de adição são emitidas 15,4 kg de CO₂ na utilização do compressor primário [99] e 20,534 kg de CO₂ na utilização do compressor secundário [99], expõem-se, de seguida, os cálculos das emissões adicionais para produzir uma tonelada de argamassa com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC e a argamassa de referência sem FCC (Eq. 5.6).

$$\frac{\text{Emissões } CO_2 \text{ acrescidas (kg)}}{\text{por compressor}_{(\text{primário/segundário})}} = \frac{W * Y}{1000 \text{ kg}} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

onde,

W – emissões acrescidas de CO₂ por tonelada de adição no compressor primário/segundário;

Y – quantidades de FCC (adição) para produzir uma tonelada de argamassa (Quadro 5.2).

5.2.3 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO₂ POR TONELADA DE ARGAMASSA COMERCIAL PRODUZIDA

Na empresa CIARGA, o processo de produção de uma tonelada de argamassa comercial, independentemente do ligante, conduz à emissão de 32,01 kg de CO₂ [99]. Assim sendo, independentemente da quantidade de FCC incorporada nas argamassas, à produção de uma tonelada de argamassa, comercializada pela CIARGA, está associada 32,01 kg de emissões de CO₂.

De seguida, apresentam-se os cálculos das emissões de CO₂ (“P_{arga}” – Figura 5.1; Quadro 5.1 – coluna “P_{arga}”) para produzir uma tonelada de argamassa com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC e a argamassa de referência sem FCC (Eq. 5.7).

$$\underline{\text{Emissões de CO}_2 \text{ por tonelada de (kg) argamassa produzida}} = 0,25 * 32,01 = 8,003 \text{ kg de CO}_2 \quad (\text{Eq. 5.7})$$

5.2.4 EMISSÕES FINAIS DE CO₂ NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA, COM E SEM INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DE FCC, COMERCIALIZADAS PELA CIARGA

Após definidos os vários processos necessários à produção de uma tonelada de argamassa de cal hidráulica, com e sem incorporação do resíduo de FCC, e respetivas emissões de CO₂, é possível determinar as emissões globais na produção de uma tonelada de argamassa.

De seguida, apresentam-se os cálculos das emissões de CO₂ (apresentadas no Quadro 5.1 – coluna “ECO – ARGAMASSA PRONTA”) para produzir uma tonelada de argamassa com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC e a argamassa de referência sem FCC (Figura 5.1 – “ECO – ARGAMASSA PRONTA”) (Eq. 5.8).

$$\underline{\text{Emissões de CO}_2 \text{ por tonelada de argamassa produzida (kg)}} = T_1 + T_2 + C_1 + C_2 + P + 0,25 * H * \% \text{ cal} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

onde,

T_1 – emissões de CO₂ no transporte do resíduo de FCC (kg) (Quadro 5.1 – coluna “T_{FCC}”; Figura 5.1 – “T_{FCC}”);

T_2 – emissões de CO₂ no transporte da cal hidráulica (kg) (Quadro 5.1 – coluna “T_{Cal}”; Figura 5.1 – “T_{Cal}”);

C_1 – emissões de CO₂ do compressor primário (kg) (Quadro 5.1 – coluna “P_{FCC}”; Figura 5.1 – “P_{FCC}”);

C_2 – emissões de CO₂ do compressor secundário (kg) (Quadro 5.1 – coluna “P_{FCC}”; Figura 5.1 – “P_{FCC}”);

P – emissões de CO₂ na produção de uma tonelada de argamassa sem adições (kg) (Quadro 5.1 – coluna “P_{arga}”; Figura 5.1 – “P_{arga}”);

H – emissões de CO₂ na produção de uma tonelada de cal hidráulica (kg) (Quadro 5.1-coluna “SECIL”; Figura 5.1 – “SECIL”); = 540 kgCO₂/ton de cal [11];

5.2.5 ÍNDICE DE DESEMPENHO AMBIENTAL (IDA)

Considerou-se o “índice de desempenho ambiental” (IDA) uma medida de quantificação da ecoeficiência da incorporação do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica. O IDA é determinado como sendo o quociente entre as emissões de CO₂ da argamassa com incorporação de FCC e as emissões de CO₂ da argamassa sem incorporação de FCC. Quanto menor foi o IDA, melhor será a ecoeficiência da argamassa.

Os valores do IDA calculados para produzir uma tonelada de argamassa com 5, 10 e 15% de incorporação de FCC e a argamassa de referência sem FCC, encontram-se apresentados, anteriormente, no Quadro 5.1 (coluna “IDA”). Os cálculos do IDA são apresentado de seguida (Eq. 5.9).

$$IDA = \frac{\text{emissões CO}_2 \text{ da argamassa com } x\% \text{ de FCC}}{\text{emissões CO}_2 \text{ da argamassa sem FCC}} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Analisando os valores do IDA, apresentados no Quadro 5.1, verifica-se que a diminuição das emissões de CO₂ na produção de uma tonelada de argamassa com resíduo de FCC é, sensivelmente, proporcional ao aumento de incorporação do resíduo de FCC nas argamassas.

Através destas análises verifica-se que um dos objetivos da presente dissertação é alcançado com sucesso: redução das emissões de CO₂ inerentes aos processos de fabrico de argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

“Não acabar é não fazer.”

Provérbio Português

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo são expostas as conclusões deste trabalho, que tem como principal objetivo avaliar o efeito da incorporação do resíduo de FCC nas características das argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios. Neste capítulo são, também, apresentadas propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros neste domínio.

A realização deste TFM englobou uma campanha experimental (Capítulo 3), que consistiu na preparação de argamassas com diferentes composições e cujas características foram ensaiadas no estado fresco e no estado endurecido, para diferentes idades de hidratação (Capítulo 4).

Assim sendo, apresentam-se neste capítulo as principais conclusões obtidas nos ensaios realizados no estado fresco (Subcapítulo 6.2) e no estado endurecido (Subcapítulo 6.3), e as conclusões da análise crítica, realizadas no capítulo 4.

6.2 ESTADO FRESCO

Através da realização dos ensaios no estado fresco (Subcapítulo 4.2), destacam-se as seguintes conclusões:

- **CONSISTÊNCIA (Secção 4.2.1)**
 - No que respeita à consistência das argamassas (Secção 4.2.1), é notória a perda de fluidez das mesmas com o aumento de incorporação do resíduo de FCC, em qualquer uma das séries (Quadro 3.1). Isto é comprovado pelo aumento da quantidade de água necessária adicionar para que se obtenha o mesmo intervalo de espalhamento (Figura 4.1 e 4.2).
 - Relativamente à influência do teor de hidrófugo na consistência das argamassas, verifica-se que a utilização do hidrófugo leva à sua perda de fluidez. Esta conclusão pode ser verificada pela diminuição do teor de incorporação do adjuvante hidrófugo, ao longo das séries com adjuvantes, o

que leva a uma diminuição das quantidades de água para se obter o mesmo intervalo espalhamento (Figura 4.1 e 4.2).

- **MASSA VOLÚMICA (Secção 4.2.2)**

- No que respeita à influência da incorporação do resíduo de FCC na massa volúmica das argamassas (Secção 4.2.2), verifica-se que na série s/adjuvantes há uma ligeira tendência de diminuição da massa volúmica com o aumento de FCC. No entanto, nas argamassas das séries com adjuvantes, não se verifica nenhuma tendência de alteração da massa volúmica com o aumento de incorporação do resíduo de FCC (Figura 4.3 e Quadro 4.3).

6.3 ESTADO ENDURECIDO

Através da análise dos resultados obtidos na realização dos ensaios no estado endurecido (Subcapítulo 4.3) salientam-se as seguintes conclusões:

- **VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS (Secção 4.3.1)**

- Relativamente à influência da incorporação do resíduo de FCC nas argamassas, verifica-se que nas argamassas da série s/adjuvantes há uma tendência de aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas com o aumento de incorporação do resíduo de FCC, qualquer que seja a idade de hidratação (Quadro 4.4).
- Nas argamassas das séries com adjuvantes verifica-se, aos 91 dias de hidratação, uma tendência de diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas com o aumento de incorporação do resíduo de FCC (Quadro 4.4).
- A utilização do adjuvante hidrófugo leva à formação de argamassas com menores velocidades de propagação de ondas ultrassónicas (Quadro 4.4.), ou seja, constata-se que há um aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas com a diminuição da incorporação do hidrófugo.

- **RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO (Subsecção 4.3.2.1)**

- Relativamente à incorporação do resíduo de FCC, verifica-se que o FCC não tem praticamente influência nos valores de tensão de rotura à flexão nas argamassas das séries com adjuvantes (Quadro 4.5). Na série s/adjuvantes, aos 28 e 56 dias de hidratação, a incorporação de FCC potencia argamassas com resistência à flexão idêntica ou superior, relativamente à argamassa sem FCC. No entanto, aos 91 dias de hidratação, há uma diminuição da resistência à flexão quando se incorpora 5% e 10% nas argamassas das série 0.5Hid e 0Hid, respetivamente.

- **RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO (Subsecção 4.3.2.2)**

- No que respeita à influência do resíduo de FCC nas argamassas, constata-se que na série s/adjuvantes o aumento da incorporação de FCC, aos 28 dias de hidratação, leva a uma tendência de aumento da resistência mecânica à compressão (Quadro 4.6). Por outro lado, aos 91 dias de hidratação, a incorporação de FCC não tem praticamente efeito nas resistências à compressão nas argamassas da série s/adjuvantes.
- Nas séries 0.5Hid e 0Hid, o aumento da incorporação do resíduo de FCC, aos 91 dias de hidratação, leva à diminuição dos valores de resistência mecânica (Quadro 4.6).
- O resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica em todas as argamassas e em todas as idades de hidratação, excetuando, aos 91 dias de hidratação, nas argamassas da série 0.5Hid e 0Hid (Quadro 4.7 – Quadro 4.10).

- **AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (Secção 4.3.3)**

- No que respeita à influência do FCC nas argamassas, qualitativamente não foi perceptível a influência da incorporação do resíduo de FCC na profundidade de carbonatação das mesmas (Anexo D.4).

• **ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (Secção 4.3.4)**

- No que respeita ao efeito de incorporação de FCC nas argamassa, observa-se (Quadro 4.13), claramente, que a incorporação de FCC (até 15%) nas argamassas conduz a menores coeficientes de capilaridade, em comparação com as argamassas sem FCC.
- Relativamente à influência do adjuvante hidrófugo na absorção de água por capilaridade das argamassas, verifica-se que à medida que se diminui o teor de incorporação do hidrófugo as argamassas sem FCC tendem a absorver água mais rapidamente.

• **SECAGEM (Secção 4.3.5)**

- Relativamente à secagem das argamassas, o resíduo de FCC quando incorporado nas argamassas, aos 91 dias de hidratação, não tem uma influência significativa no seu tempo de secagem.
- No que respeita à incorporação do hidrófugo nas argamassas, constata-se que este adjuvante não tem uma influência significativa no seu tempo de secagem.

Considera-se que os objetivos definidos, para o desenvolvimento deste trabalho, foram alcançados, tendo-se:

- ❖ Contribuído para o desenvolvimento de novos materiais à base de cal hidráulica, substituindo parcialmente a cal pelo resíduo de FCC.
- ❖ Comparado as características das argamassas estudadas com os requisitos das normas europeias e com os valores propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos.
- ❖ Alargado o conhecimento do catalisador exausto do “*cracking*” catalítico em leite fluidizado (FCC), confirmando o seu potencial de substituir a cal hidráulica.
- ❖ Avaliado a influência do teor do resíduo de FCC nas argamassas estudadas.
- ❖ Acompanhado a evolução das características das argamassas ao longo do tempo de hidratação.

- ❖ Confirmado a “eco-eficiência” do resíduo de FCC em argamassas de cal hidráulica para reabilitação de edifícios.

Com a realização deste trabalho concluiu-se que as argamassas que contêm adjuvantes e incorporação do resíduo de FCC até 15% apresentam uma melhoria das suas características face à argamassa que reproduz a argamassa comercial e, para além disso, cumprem os requisitos estabelecidos nas normas europeias e os valores propostos para argamassas de reabilitação de edifícios antigos.

6.4 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Após o término desta dissertação ficam, ainda, algumas questões que podem ser esclarecidas através da realização de trabalhos futuros. Neste sentido, apresentam-se de seguida propostas de trabalho a serem desenvolvidas futuramente. As propostas de trabalho são apresentadas de acordo com os trabalhos a desenvolver sequencialmente (por fases) a seguir ao presente trabalho.

I. Numa primeira fase:

- Determinar o valor máximo de incorporação de FCC em argamassas de cal hidráulica, tendo como base de comparação a argamassa comercial. Isto é, até se obter uma percentagem de incorporação de FCC nas argamassas que origine argamassas com características “inferiores” às da argamassa comercial.
- Repetir os ensaios de permeabilidade à água líquida e de resistência à tração (*Pull-off*) em condições que permitam a boa realização dos mesmos, adotando, por exemplo, um suporte em tijolo para o ensaio de *Pull-off*, mas com aplicação de camadas de salpico e emboço, antes da aplicação da camada de reboco (função das argamassas estudadas).
- Repetir o ensaio de avaliação da profundidade de carbonatação, medindo quantitativamente a profundidade de carbonatação das argamassas.
- Realizar outros ensaios na campanha experimental, como por exemplo os ensaios de permeabilidade ao vapor de água, porosidade aberta, resistência aos sais e retração.

II. Numa segunda fase:

- Desenvolver uma nova campanha experimental, sujeitando as argamassas às condições ambientais exteriores, e simulando, em concreto, as condições de aplicação da argamassa de revestimento comercial.

III. Por último, numa terceira fase:

- Realizar uma avaliação do ciclo de vida (ACV, em inglês: “*LCA – Life Cycle Assessment*”) e uma avaliação do custo do ciclo de vida (CCV, em inglês: “*LCC – Life Cycle Cost*”) das argamassas de cal hidráulica com incorporação do resíduo de FCC.
- Investigar outras fontes de fornecimento do resíduo de FCC (para além de Portugal) e respetivas análises de impacto ambiental e custo.
- Determinar o real interesse do mercado, tanto nacional como internacional, na utilização deste tipo de produto.

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN 998-1. Abril 2010, Especificações de argamassas para alvenarias - Argamassas para rebocos interiores e exteriores. Caparica: IPQ, 1-24 p.
- [2] VEIGA, Maria Do Rosário - As argamassas na conservação. In Actas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes. Aveiro, 26 de Novembro de 2003. Conferência Convidada. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa, 2003.
- [3] RUBENSTEIN, Madeleine - Emissions from the Cement Industry [Em linha], atual. 2012. [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em:
<<http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>>.
- [4] WORRELL, Ernst; PRICE, Lynn; MARTIN, Nathan; HENDRIKS, Chris; MEIDA, Leticia - Carbon dioxide emissions from the global cement industry. 1^a. ed. [S.l.]: Annual Review of Energy and the Environment, vol.26, 2001. p. 303-329.
- [5] DAMINELI, Bruno L.; KEMEID, Fernanda M.; AGUIAR, Patricia S.; JOHN, Vanderley M. - Measuring the eco-efficiency of cement use. 8^a. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Composites, vol.32, 2010. p. 555-562.
- [6] CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y. JULLIEN, A.; VENTURA, A. - LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. 12^a. ed. [S.l.]: Resources, Conservation and Recycling, vol. 54, 2010. p. 1231–1240.
- [7] HABERT, G.; ROUSSEL, N. - Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. 6^a. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Composites, vol.31, 2009. p. 397–402.

- [8] COSTA, Carla Maria - Ligantes Hidráulicos. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. 1ª. ed. [S.l.]: IST PRESS, 2012. p. 3–54.
- [9] SECIL ARGAMASSAS - Secil Natural Hydraulic Lime (NHL) [Em linha] [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em:
<<http://www.stonewarestudios.com/PDF/Secil/Secil%20Natural%20Hydraulic%20Lime.pdf>>
- [10] ASTIER, Pure &. Natural Hydraulic Limes ST. - Preserving our built heritage: St. Astier NHL mortars [Em linha] [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em:
<<http://www.stastier.co.uk/articles/preserving-heritage.htm>>.
- [11] SECIL Martingança - Aglomerantes e Novos Materiais para Construção Lda, informação de Setembro de 2015.
- [12] CUNHA, Armando Lucas Cherem Da - Caracterização e Estudo de Aplicação de Rejeito Catalítico de Unidade FCC como Material Pozolânico. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. Pós-graduação.
- [13] GLASSER, Fred P.; GARCÉS, Pedro; BREW, Daniel R. M.; ZORNOZA, Emilio; PAYÁ, Jordi - Pozzolanic activity of a spent fluid catalytic cracking catalyst residue. 3ª. ed. [S.l.]: Advances in Cement Research, vol. 23, 2011. p. 105-111.
- [14] CARDOSO, Maria João e Vieira Caiado Ferreira - Incorporação de resíduo da indústria petrolífera em argamassas de cal hidráulica para a reabilitação de edifícios. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2014. Tese de mestrado.
- [15] CONCEIÇÃO, Maria Inês De Almeida Laginha - Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2011. Tese de mestrado.
- [16] WORLDOMETERS - World Population Clock: 7 Billion People (2015) [Em linha] [Consult. 12 abr. 2015]. Disponível em: <<http://www.worldometers.info/world-population/#growthrate>>.

[17] NATIONAL GEOGRAPHIC, Dennis Dimick - As World's Population Booms, Will Its Resources Be Enough for Us? [Em linha], atual. 2014. [Consult. 12 Abr. 2015]. Disponível em:

<<http://news.nationalgeographic.com/news/2014/09/140920-population-11billion-demographics-anthropocene/>>.

[18] HINRICHSEN, Don; ROBEY, Bryant - Population and the Environment: The Global Challenge [Em linha], atual. 2000. [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em:

<http://www.actionbioscience.org/environment/hinrichsen_robey.html>.

[19] NATIONAL GEOGRAPHIC - Causes og Global Warming [Em linha] [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em:

<<http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/gw-causes/>>.

[20] UNFCCC - Kyoto Protocol Reference Manual On Accounting Of Emissions And Assigned Amount [Em linha], atual. 2008. [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf>.

[21] VILHENA, António - Reabilitação habitacional e o setor da construção civil. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro 2013.

[22] SECIL ARGAMASSAS - Cal Hidráulica Natural: Principais Diferenças [Em linha] [Consult. 3 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.secilargamassas.pt/pt/cal-hidraulica-natural/cal-hidraulica-natural-principais-diferencas>>.

[23] CIMPOR - Produção cimento [Em linha] [Consult. 15 Mai. 2015]. Disponível em: <http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento>.

[24] SECIL - Processo de fabrico de cimento [Em linha] [Consult. 15 Mai. 2015]. Disponível em:

<<http://www.secil.pt/pdf/Processo%20de%20Fabrico%20de%20Cimento.pdf>>

[25] SEQUEIRA, Ana Cristina; FRADE, Dina; GONÇALVES, Paulo - Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2007.

[26] COUTINHO, Joana. - Apoio às aulas/Materiais de Construção 2 [Em linha], Atual. 2006. Porto: BN, 2006. [Consult. 10 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>>.

[27] BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; CAPILLA, Antonio Valero; USÓN, Alfonso Aranda - Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. 5ª. ed. [S.l.]: Building and Environment, vol. 46, 2011. p. 1133-1140.

[28] TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said - Eco-eficiência dos Materiais de Construção, 2010. Revista APCMC 147, ISSN 8443-4191, Associação Portuguesa dos Comerciantes de Materiais de Construção. p. 46-53.

[29] FERREIRA, Carlos José Fernandes - Os gases de efeito estufa e a problemática da responsabilidade social e ambiental das empresas portuguesas: o caso das cimenteiras. Lisboa: Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Lisboa. 2010. Tese de mestrado.

[30] JOHN, Ashurst - The Technology and Use of Hydraulic Lime [Em linha] [Consult. 5 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.buildingconservation.com/articles/hydraulic/hydraulic.htm>>.

[31] VÁLEK, J.; HALEM, E. van; VIANI, A.; PÉREZ-ESTÉBANEZ, M.; SEVCÍK, R.; SASEK, P. - Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes. [S.l.]: Construction and Building Materials, vol.66, 2014. p. 771-780.

[32] ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Marta - Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas. Lisboa, 2015. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC.

[33] LNEG - As Boas Práticas Ambientais na Indústria Extractiva: Um Guia de Referência (2000) [Em linha]. [Consult. 10 Mai. 2015]. Disponível em: <http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/praticas_ambientais/texto>.

[34] M. JOHN, Vanderley; R. GARCIA PUNHAGUI, Katia; ALBA CINCOTTO, Maria - Produção de cal. São Paulo: Universidade de São Paulo - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto. 2014. Projeto sobre o setor da cal.

[35] World Resources Institute; World Business Sustainable Development - GREENHOUSE GAS PROTOCOL (GHG): Calculating CO2 Emissions from the Production of Lime 2 (Version 2.0) [Em linha]. 2007. [Consult. 15 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Calculating%20CO2%20Emissions%20from%20the%20Production%20of%20Lime.pdf>>

[36] HANLE, Lisa; MALDONADO, Pedro; ONUMA, Eiichi; TICHY, Milos; OSS, Hendrick G. van - Mineral industry emissions. [S.l.]: Industrial Processes and Product Use, vol.3, 2006.

[37] CIMPOR, CIMENTOS DE PORTUGAL, SGPS, S.A. Relatório de Sustentabilidade. Lisboa: [s.n.], 2011. p. 1-128.

[38] SECIL ARGAMASSAS - Relatório Ambiental e Social. Lisboa: [s.n.], 2012. p. 1-4.

[39] MARGALHA, Maria Goreti - Argamassas. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património. Universidade de Évora, 2011.

[40] VEIGA, MARIA DO ROSÁRIO - Argamassas Compatíveis para Intervenção em Edifícios Antigos. Apresentação na Oficina: Técnicas Tradicionais de Revestimento. Beja, 2007.

[41] SILVA, António Santos (LNEC) - Importância da caracterização de argamassas antigas para decisões de conservação e reabilitação de edifícios. Seminário "Reboco de Edifícios Antigos". Ponta Delgada, 2013.

[42] WEBER - Materiais [Em linha] [Consult. 22 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.weber.com.pt/colagem-e-betumacao-de-ceramica/import/apoio-ao-projecto/conceitos-e-definicoes-gerais/materiais.html>>.

[43] TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said - Algumas considerações sobre as argamassas de reabilitação. [S.l.]: Materiais de Construção, 2009. p. 35.39.

[44] VEIGA, Maria Do Rosário - Argamassas de alvenarias históricas. Funções e características. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria. Minho: Universidade do Minho, 2012.

[45] HENRIQUES, Fernando M. A.; FARIA, Paulina - O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património. Revista Engenharia Civil - Universidade do Minho 31, p. 29-37.

[46] EMO - Mortar [Em linha]. [Consult. 16 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.euromortar.com/product-range/mortar/>>.

[47] VEIGA, Maria Do Rosário - Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, 2003.

[48] SIKA PORTUGAL, SA - Formação em Betão e adjuvantes [Em linha]. Lisboa: BN, 2012. [Consult. 26 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/~crisina/EBAP/ExecucaoEstruturas/FormacaoBetaoAdjuvantesIST10,01,07.pdf>>.

- [49] BRAGA, M.; BRITO, J. De; VEIGA, M. .. Rosário - Incorporação de agregados finos de betão em argamassas. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. Mecânica Experimental, vol. 21, 2012. p. 37-50.
- [50] NP EN 13139. Junho 2005, Agregados para argamassas. Caparica: IPQ, 1-45 p.
- [51] SIKA PORTUGAL, SA - Adjuvantes [Em linha] [Consult. 26 Mai. 2015]. Disponível em: <<http://prt.sika.com/pt/group/faq/adjuv.html>>.
- [52] SA, Sika Portugal - Adjuvantes e aditivos para argamassas [Em linha] [Consult. 1 Out. 2015]. Disponível em: <http://prt.sika.com/pt/solutions_products/02/02a009/02a009sa03.html>.
- [53] PAULO, Raquel Sofia V. M. Nascimento - Caracterização de Argamassas Industriais. Aveiro: Universidade de Aveiro. 2006. Tese de mestrado.
- [54] ANTUNES, Rubiane P. Nascimento; JOHN, Vanderley; PILEGGI, Rafael Giuliano - Propriedades Reológicas De Argamassas Avaliadas Por Squeeze-Flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Camboriú, 2005.
- [55] RAUPP-PEREIRA, F.; SILVA, L.; SEGADÃES, A.M.; LABRINCHA, J.A. - Utilização de Lama de Filtração de Água como Adjuvante de Trabalhabilidade em Argamassa de Reboco. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2005.
- [56] CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. - Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Camboriú, 2005.

- [57] SILVA, Rosiany P.; BARROS, Mercia M.S.B.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. - Avaliação Do Comportamento Da Argamassa No Estado Fresco Através Dos Métodos De Mesa De Consistência, Dropping Ball E Squeeze Flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Camboriú, 2005.
- [58] BOTAS, Sandro; RATO, Vasco - Influência da introdução de ar no comportamento de argamassas aos ciclos gelo/degelo. Atas do 3º Congresso Português de Argamassas de Construção. Lisboa, 2010.
- [59] PAIVA, H.; SILVA, L.M.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. - Efeito de Adjuvantes Sobre a Reologia de uma Argamassa. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2005.
- [60] SEABRA, M. P.; PAIVA, H.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. - Efeito dos Adjuvantes no Comportamento Reológico de Argamassas de Cal Aérea. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC. Lisboa, 2005.
- [61] COSTA, Laureano Leite - O uso de argamassas tradicionais e pré-doseadas para impermeabilização em revestimentos exteriores. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 2008. Tese de mestrado.
- [62] APEB - Guia para a utilização da norma NP EN 206-1 [Em linha]. 4ª ed. [S.l.]: Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. [Consult. 27 Mai. 2015]. Disponível em: <http://www.ap eb.pt/fp/GUIA_APEB.pdf>
- [63] VEIGA, M. Do Rosário - Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. Seminário "Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos". Lisboa, LNEC, Fevereiro 2005.
- [64] COUTO, Armanda Bastos; COUTO, João Pedro - Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios Antigos. APFAC, 2007.

- [65] BALEN, K. Valen; PAPAYIANNI, I.; HEES, R. Van; BINDA, L.; WALDUM A. - Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. 8^a ed. [S.l.]: Materials and Structures, vol. 38, 2005. p. 781-785.
- [66] SANTOS, A. Rita; VEIGA, M. Do Rosário - Argamassas compatíveis para edifícios antigos. In Jornadas Cidades e Desenvolvimento. Lisboa, LNEC, 2012.
- [67] VEIGA, M. Rosário; AGUIAR, José; SILVA, António Santos; CARVALHO, Fernanda- Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. International Seminar Historical Constructions 2001. Guimarães: Universidade do Minho, Novembro de 2001.
- [68] GALP ENERGIA - Origem e composição do petróleo [Em linha], atual. 2014. [Consult. 4 Jun. 2015]. Disponível em:
<<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Origem-e-composicao-do-petroleo.aspx>>.
- [69] GALP ENERGIA - Fundamentos de refinação [Em linha], atual. 2015. [Consult. 4 Jun. 2015]. Disponível em:
<<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/Paginas/Didatico-Refinacao.aspx>>.
- [70] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, Eia - Fluid catalytic cracking is an important step in producing gasoline [Em linha], atual. 2012. [Consult. 4 Jun. 2015]. Disponível em:
<<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=9150>>.
- [71] GALLY, Caline Rodrigues - Desenvolvimento de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental contendo resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo. Bahia: Universidade Federal da Bahia. 2010. Tese de mestrado.

[72] GROUP, The Linde - Oxygen Enrichment of the FCC NOx Recovery Process [Em linha] [Consult. 4 Jun. 2015]. Disponível em: <http://www.linde-gas.com/en/processes/petrochemical_processing/fluid_catalytic_cracking/index.html>

[73] GARCIA, L. P.; CRUZ, R. T. Da; BRAGANÇA, S. R. - Uso do resíduo de catalisador de processo de craqueamento catalítico fluído de hidrocarbonetos em refratários silicoaluminosos. [S.l.]: Cerâmica, vol.55, 2009. p. 303-105.

[74] MOREIRA, Fabrícia De Souza - Alternativas tecnológicas para a maximização da produção de olefinas leves a partir de petróleos pesados. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola de Química. 2006. Projeto final de curso.

[75] COSTA, Ruth Isabel Tomaz Morais Da - Utilização de catalisadores de cracking catalítico na despolimerização do poli (metacrilato de metilo). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia. 2009. Tese de mestrado.

[76] COSTA, Carla; GEADA, Rita - Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera nas Propriedades Mecânicas de Argamassas. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, 2012.

[77] Petróleos de Portugal - Petrogal, S.A., informação de Outubro 2015.

[78] AFONSO, Daniela Alexandra Peixe - Efeito da Moagem do Catalisador Exausto de Cracking Catalítico nas Propriedades de Argamassas de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2012. Tese de mestrado.

[79] BRITO, Nuno João Pereira De - 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. Tese de mestrado.

- [80] ANTUNES, Marilyne Junqueira - ECO-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2013. Tese de mestrado.
- [81] GIBBONS, Pat - Pozolanas para Argamassas de Cal [Em linha]. [Consult. 11 Jun 2015]. Disponível em: <<https://5cidade.files.wordpress.com/2008/05/pozolanas-para-argamassas-de-cal.pdf>>.
- [82] FARIA, Paulina; SILVA, Vitor; FLORES-COLEN, Inês - Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial. In 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, 2012.
- [83] CARNEIRO, João Pedro Marques Das Neves - Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2012. Tese de mestrado.
- [84] NP EN 459-1. Maio de 2011, Cal de construção - Definições, especificações e critérios de conformidade. Caparica: IPQ, 1-50 p.
- [85] EN 1015-3. Fevereiro 1999, Methods of test mortar for masonry - Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-9 p.
- [86] EN 1015-6. Outubro 1998, Methods of test mortar for masonry - Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-9 p.
- [87] EN 1015-2. Outubro 1998, Methods of test mortar for masonry - Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-8 p
- [88] NP EN 1015-19. Janeiro 2000. Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria - Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas. Caparica: IPQ, 1-9 p.

[89] ABNT NBR 15630. Setembro 2008, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

[90] EN 1015-11. Agosto 1999, Methods of test mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-11 p.

[91] EN 1015-18. Dezembro 2002, Methods of test mortar for masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-8 p.

[92] EN 1015-12. Fevereiro 2000, Methods of test mortar for masonry - Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1-10 p.

[93] LOPES, Ana Catarina Antunes - Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio pull-off na medição da resistência de aderência à tracção em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. 2012. Tese de mestrado.

[94] ASTM C311-07. 2007, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland - Cement Concrete. EUA: American Society for Testing and Materials International, 1-10 p.

[95] DUARTE, Carlos - Ameaças e Oportunidades para as Argamassas Europeias. O caso Português [Em linha]. [Consult. 23 Out. 2015]. Disponível em: <http://www.apfac.pt/docs/X_SBTA_Carlos_Duarte.pdf>.

[96] ZORNOZA, E.; GARCÉS, P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. - Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). 2ª ed. [S.l.]: Cement and Concrete Composites, vol. 31, 2009. p. 134-138.

[97] COSTA, Carla; RIBEIRO, M. Sofia; BRITO, Nuno - Effect of Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation on Durability of Mortars. *Materials Sciences and Applications*, vol. 5, 2014. p. 905–914.

[98] GRILO, João Pedro Baião - Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 de fabrico nacional. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. 2013. Tese de mestrado.

[99] CIARGA - Argamassas Secas S.A., informação de Outubro 2015.

[100] Emissões de CO₂ - [Em linha]. [Consult. 25 Out. 2015]. Disponível em: <http://www.sunearthtools.com/pt/tools/CO2-emissions-calculator.php#txtCO2_7>.

[101] PAIVA, H.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. - Caracterização Reológica de Argamassas [Em linha]. [Consult. 17 Set. 2015]. Disponível em: <<http://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2006.pdf>>.

ANEXOS

ANEXO A – CALENDARIZAÇÕES DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A.1 – CALENDARIZAÇÕES DAS AMASSADURAS;

A.2 – CALENDARIZAÇÕES DOS ENSAIOS.

A.1 – CALENDARIZAÇÕES DAS AMASSADURAS

Abril 2015							
Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo	
			1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29
30	31						

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	HL_wFCC0_0Hid HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid HL_wFCC15_0Hid	HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid	HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid			
HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid	HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid			

AMASSADURAS – ENSAIOS CIARGA 91/28 DIAS		AMASSADURAS – ENSAIOS CIARGA 56 DIAS	
---	--	--------------------------------------	--

NOTA: nos dias 15 e 16 só se realizaram as amassaduras para os ensaios de Pull-off e de permeabilidade à água líquida (28 e 91 dias). Nos dias 20 e 21 realizaram-se as amassaduras para todos os ensaios. No dia 22 só se prepararam as amostras prismáticas.

Maio 2015

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
4	5	6	7	8	9	10
	HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15		HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid		
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid	HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	HL_wFCC0_OHid HL_wFCC5_OHid HL_wFCC10_OHid HL_wFCC15_OHid				
25	26	27	28	29	30	31
HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_OHid HL_wFCC5_OHid HL_wFCC10_OHid HL_wFCC15_OHid						

AMASSADURAS – ENSAIOS CIARGA 28 DIAS

AMASSADURAS – ENSAIOS ISEL 28 DIAS

Junho 2015

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
1 HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid	2	3	4	5	6	7
8 HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_0Hid HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid HL_wFCC15_0Hid	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

A.2 – CALENDARIZAÇÕES DOS ENSAIOS

Maio 2015						
Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
		Ensaio de permeabilidade à água líquida (28 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	Ensaio de permeabilidade à água líquida (28 dias): HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid			
18	19	20	21	22	23	24
Ensaio de permeabilidade à água líquida (28 dias): HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	Ensaio de permeabilidade à água líquida (28 dias): HL_wFCC0_OHid HL_wFCC5_OHid HL_wFCC10_OHid HL_wFCC15_OHid					
25	26	27	28	29	30	31

Junho 2015

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
1	2	3	4	5	6	7
Ensaio de capilaridade (28 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (28 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (28 dias): HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (28 dias): HL_wFCC0_0Hid HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid HL_wFCC15_0Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (28 dias): HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid		
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
Ensaio de capilaridade (28 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid ; HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (56 dias): HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (56 dias): HL_wFCC0_0.5Hid ; HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid ; HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_0Hid ; HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid ; HL_wFCC15_0Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (56 dias): HL_wFCC0_0.5Hid ; HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid ; HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_0Hid ; HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid ; HL_wFCC15_0Hid			
22	23	24	25	26	27	28
Ensaio de capilaridade (28 dias): HL_wFCC0_0.5Hid ; HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid ; HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_0Hid ; HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid ; HL_wFCC15_0Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (56 dias): HL_wFCC0 ; HL_wFCC5 HL_wFCC10 ; HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid ; HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid ; HL_wFCC15_Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína e Pull-off (56 dias): HL_wFCC0_0.5Hid ; HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid ; HL_wFCC15_0.5Hid HL_wFCC0_0Hid ; HL_wFCC5_0Hid HL_wFCC10_0Hid ; HL_wFCC15_0Hid				
29	30					
Ensaio de secagem (28 dias) das composições do dia 15 de junho.						
Ensaio de secagem (28 dias) das composições do dia 22 de junho.						

Julho 2015

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína, Pull-off e permeabilidade à água líquida (01 dias): HL_wFCC0_0.5Hid HL_wFCC5_0.5Hid HL_wFCC10_0.5Hid HL_wFCC15_0.5Hid	Ensaio de ultrassons, resistências mecânicas, fenolftaleína, Pull-off e permeabilidade à água líquida (01 dias): HL_wFCC0_OHid HL_wFCC5_OHid HL_wFCC10_OHid HL_wFCC15_OHid	Ensaio de Pull-off e permeabilidade à água líquida (01 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15	Ensaio de Pull-off e permeabilidade à água líquida (01 dias): HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid			

Agosto 2015

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						
Ensaio de capilaridade (91 dias): HL_wFCC0 HL_wFCC5 HL_wFCC10 HL_wFCC15 HL_wFCC0_Hid HL_wFCC5_Hid HL_wFCC10_Hid HL_wFCC15_Hid						

ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS

B.1 – HL5;

B.2 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS.

Cal Hidráulica HL 5



NP EN 459-1 0866

► Constituintes

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



► Características

► Químicas

Sulfatos (SO_3) $\leq 3,0\%$
Cal disponível $\geq 4\%$

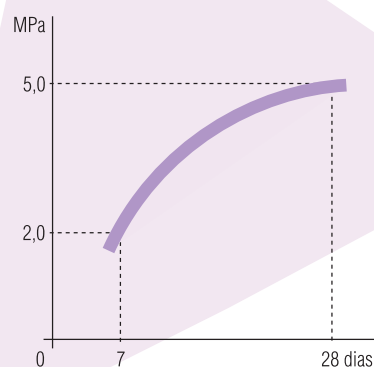
► Físicas

Início de presa (min) > 60
Expansibilidade (mm) ≤ 20
Resíduo a 0,090 mm $\leq 15\%$
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 retracção inicial
- Fraca tendência para a fissuração e fendilhamento
- Boa impermeabilidade e durabilidade

► 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



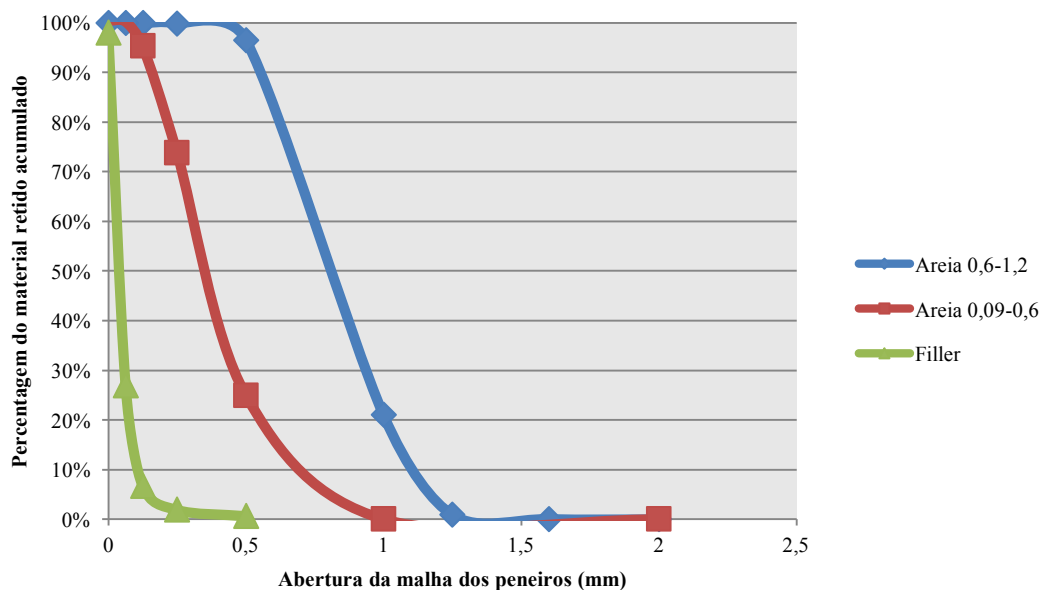
SERVIÇO COMERCIAL
Av. Severiano Falcão, 8 - Edifício CIMPOR - 2689-524 PRIOR VELHO
Tel.: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 60

SERVIÇO TÉCNICO-COMERCIAL
Av. Severiano Falcão, 8 - Edifício CIMPOR - 2689-524 PRIOR VELHO
Tel.: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 54

SERVIÇO DE CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO
S. Pedro Fins - Maia - Apartado 1023 - 4449-909 ERMESINDE
Tel.: 22 968 80 00 - Fax: 22 967 18 38

www.cimpor-portugal.pt
Dcomercial@cimpor.com

B.2 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS



As curvas granulométricas dos agregados, usados na campanha experimental, foram obtidas através da realização de ensaios de análise granulométrica, definidos na norma NP EN 933-1.

O gráfico representa a quantidade de agregado que fica retido nos diferentes peneiros. Verifica-se que, de entre os três agregados, o “*filler*” é o que apresenta uma dimensão do tamanho de partícula mais pequena.

**ANEXO C – FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS - ESTADO
FRESCO**

C.1 – CONSISTÊNCIA OBTIDA POR MESA DE ESPALHAMENTO;

C.2 – MASSA VOLÚMICA.

C.1 – CONSISTÊNCIA OBTIDA POR MESA DE ESPALHAMENTO

ENSAIO - CONSISTÊNCIA OBTIDA POR MESA DE ESPALHAMENTO					
Série	Argamassa	Quantidade de água (g)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio de espalhamento (mm)
s/adjuvantes	HL_wFCC0	510	168	170	<u>169</u>
	HL_wFCC5	520	166	168	<u>167</u>
	HL_wFCC10	535	170	167	<u>169</u>
	HL_wFCC15	548	168	170	<u>169</u>
Hid	HL_wFCC0_Hid	660	168	165	<u>167</u>
	HL_wFCC5_Hid	675	166	172	<u>169</u>
	HL_wFCC10_Hid	695	175	172	<u>174</u>
	HL_wFCC15_Hid	705	170	175	<u>173</u>
0.5Hid	HL_wFCC0_0.5Hid	635	171	165	<u>168</u>
	HL_wFCC5_0.5Hid	650	169	167	<u>168</u>
	HL_wFCC10_0.5Hid	670	173	172	<u>173</u>
	HL_wFCC15_0.5Hid	678	166	167	<u>167</u>
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	615	170	173	<u>172</u>
	HL_wFCC5_0Hid	630	175	170	<u>173</u>
	HL_wFCC10_0Hid	647	166	168	<u>167</u>
	HL_wFCC15_0Hid	658	166	167	<u>167</u>

C.2 – MASSA VOLÚMICA

ENSAIO - MASSA VOLÚMICA					
Série	Argamassa	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V _v (m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)
s/adjuantes	HL_wFCC0	1,1367	2,7077	0,00075	2095
	HL_wFCC5	1,1366	2,6960	0,00075	2079
	HL_wFCC10	1,1356	2,6946	0,00075	2079
	HL_wFCC15	1,1370	2,6734	0,00075	2049
Hid	HL_wFCC0_Hid	1,1348	2,189	0,00075	1406
	HL_wFCC5_Hid	1,1369	2,1929	0,00075	1408
	HL_wFCC10_Hid	1,1363	2,1830	0,00075	1396
	HL_wFCC15_Hid	1,1371	2,1688	0,00075	1376
0.5Hid	HL_wFCC0_0.5Hid	1,1350	2,1831	0,00075	1397
	HL_wFCC5_0.5Hid	1,1367	2,1915	0,00075	1406
	HL_wFCC10_0.5Hid	1,1349	2,1973	0,00075	1417
	HL_wFCC15_0.5Hid	1,1365	2,1521	0,00075	1354
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	1,1346	2,1672	0,00075	1377
	HL_wFCC5_0Hid	1,1350	2,1960	0,00075	1415
	HL_wFCC10_0Hid	1,1368	2,1475	0,00075	1348
	HL_wFCC15_0Hid	1,1369	2,1551	0,00075	1358

**ANEXO D – FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS - ESTADO
ENDURECIDO**

D.1 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS (ULTRASSONS);

D.2 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO;

D.3 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO;

D.4 – AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO;

D.5 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE;

D.6 – SECAGEM;

D.7 – PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA;

D.8 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (*PULL-OFF*).

D.1 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS (ULTRASSONS)

SÉRIE S/ADJUVANTES

ENSAIO - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)
			63,7	63,5	59,1	59,1	60,2	59,8
		2	65,3	65,0	60,5	60,3	59,6	59,7
		3	65,3	65,3	60,6	60,3	59,1	59,2
		4	65,4	65,5	59,4	59,4	57,9	57,9
		5	66,0	66,2	59,9	59,5	57,9	57,7
		6	64,6	64,2	59,6	59,4	59,2	59,1
		1	56,8	56,5	55,9	55,5	55,6	55,2
		2	56,9	56,6	55,5	55,5	54,5	54,2
		3	56,2	56,6	55,2	55,0	55,2	55,1
		4	57,6	57,2	54,4	54,1	55,5	55,4
		5	58,7	58,4	54,5	54,4	54,8	54,7
		6	57,6	57,7	55,1	54,7	53,8	53,6
		1	57,2	57,1	55,9	55,9	54,9	54,4
		2	56,2	56,5	54,6	54,2	53,7	53,2
		3	57,0	56,8	56,5	56,1	54,6	54,2
		4	56,6	56,1	55,5	55,0	54,4	54,3
		5	56,1	55,9	54,5	54,1	54,0	53,8
		6	57,2	57,1	54,4	54,1	53,4	53,2
		1	57,1	57,1	54,6	54,1	54,5	54,3
		2	56,4	56,2	55,4	55,1	53,8	53,6
		3	57,8	57,3	54,7	54,5	54,0	53,9
		4	58,1	57,9	54,6	54,6	54,0	53,8
		5	58,6	58,6	54,0	54,0	53,5	53,3
		6	57,2	57,0	55,3	55,2	54,1	54,1

S/ADJUVANTES

SÉRIE HID

ENSAIO - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)
HL_wFCC0_Hid		1	105,6	105,6	103,5	103,2	99,0	98,7
		2	104,9	105,3	105,5	105,2	99,2	99,2
		3	106,2	105,7	102,6	102,4	98,1	97,8
		4	101,4	101,4	104,6	104,5	95,6	95,2
		5	99,2	99,4	102,7	102,5	96,2	96,1
		6	101,6	101,4	102,0	101,6	95,4	95,4
HL_wFCC5_Hid		1	102,8	103,3	97,5	97,5	96,7	96,2
		2	107,1	107,4	97,5	97,5	96,3	96,6
		3	107,0	107,2	97,8	97,7	96,1	96,2
		4	106,2	106,2	102,8	102,1	95,1	94,9
		5	104,2	103,7	101,6	101,7	95,9	95,4
		6	101,6	101,6	102,7	102,7	95,1	94,9
HL_wFCC10_Hid		1	106,5	106,2	101,6	101,6	98,7	98,6
		2	102,2	102,1	102,1	101,9	98,9	98,7
		3	102,7	102,6	100,5	100,3	99,6	99,1
		4	101,1	100,8	102,5	102,7	99,0	99,2
		5	105,4	105,5	105,1	105,0	99,6	99,2
		6	105,7	105,6	105,6	106,0	99,7	99,7
HL_wFCC15_Hid		1	101,5	101,1	102,7	103,1	103,3	103,2
		2	104,6	104,5	102,7	102,6	102,9	102,7
		3	106,6	106,6	105,6	104,7	102,0	102,4
		4	106,8	106,7	101,6	101,5	102,5	102,7
		5	106,1	106,2	102,7	102,5	100,9	101,3
		6	101,7	101,7	104,8	105,0	104,7	104,5

HID

SÉRIE 0.5HID

ENSAIO - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS										
Série	Argamassa	Amostra	28 dias			56 dias			91 dias	
			Tempo (µs)	Velocidade de propagação média (mm/µs)	Tempo (µs)	Tempo (µs)	Velocidade de propagação média (mm/µs)	Tempo (µs)	Velocidade de propagação média (mm/µs)	
HL_wFCC0_0,5Hid		1	106,1	105,8	102,6	102,5	82,5	82,2	<u>1,83</u>	
		2	105,8	106,0	103,1	102,7	85,2	85,2		
		3	109,6	109,5	103,5	103,2	89,1	89,2		
		4	109,3	109,2	102,7	102,3	89,6	89,2		
		5	105,3	105,0	100,8	101,0	87,3	87,3		
		6	111,1	111,0	100,9	100,8	85,3	85,5		
		7	-	-	-	-	90,6	90,4		
		8	-	-	-	-	88,2	89,4		
HL_wFCC5_0,5Hid		1	103,9	103,6	98,6	98,3	93,7	93,3	<u>1,74</u>	
		2	103,0	102,8	99,2	99,1	91,3	91,2		
		3	104,6	104,5	99,1	98,6	93,6	93,3		
		4	103,2	103,2	100,2	99,7	89,0	89,0		
		5	104,8	104,6	97,5	97,2	90,9	90,4		
		6	104,5	104,1	98,1	97,7	92,2	91,9		
		7	-	-	-	-	93,3	93,3		
		8	-	-	-	-	90,0	89,8		
		9	-	-	-	-	94,2	94,0		
HL_wFCC10_0,5Hid		1	104,7	104,6	97,4	97,3	96,9	96,8	<u>1,68</u>	
		2	103,0	102,8	98,0	97,7	97,6	97,3		
		3	103,3	103,1	100,9	100,7	97,3	97,1		
		4	102,5	102,0	101,3	101,1	95,7	95,6		
		5	104,1	104,0	100,6	100,5	93,1	92,6		
		6	105,1	105,1	99,8	99,7	93,2	93,0		
		7	-	-	-	-	95,5	95,7		
		8	-	-	-	-	95,3	95,0		
		9	-	-	-	-	95,2	95,2		
HL_wFCC15_0,5Hid		1	104,4	104,4	100,4	100,1	102,1	102,4	<u>1,62</u>	
		2	105,2	105,1	101,7	101,5	99,5	99,3		
		3	106,9	106,8	103,2	103,1	99,4	99,2		
		4	105,0	104,9	102,6	102,3	98,6	98,3		
		5	104,7	104,6	102,7	102,6	97,8	97,3		
		6	106,2	106,0	101,6	101,5	97,6	97,1		
		7	-	-	-	-	98,8	98,8		
		8	-	-	-	-	94,8	94,9		

0.5HID

SÉRIE OHID

ENSAIO - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade de propagação média (mm/ μ s)
			105,8	105,8	105,1	105,1	94,0	93,9
		2	105,7	105,3	104,1	103,9	91,8	91,8
		3	105,8	105,7	104,9	104,6	83,3	83,4
		4	106,5	106,3	102,4	102,3	92,8	92,6
		5	105,6	105,7	102,6	102,1	85,6	85,5
		6	106,7	106,7	99,9	100,2	83,4	83,5
		1	99,5	99,3	97,2	96,8	89,1	88,7
		2	99,2	99,0	94,2	94,1	89,1	88,9
		3	99,3	99,9	95,8	95,8	87,0	86,8
		4	99,6	99,5	95,4	95,3	90,9	90,8
		5	100,2	100,2	96,6	97,0	-	-
		6	99,9	99,5	95,8	95,3	-	-
		1	96,7	96,4	93,0	92,9	99,3	98,9
		2	98,7	98,8	91,1	91,0	92,9	93,9
		3	95,7	95,4	92,1	91,8	94,5	94,3
		4	97,5	97,1	95,9	95,8	93,5	93,4
		5	97,3	97,1	95,2	94,8	94,8	94,5
		6	97,6	97,2	95,3	95,1	95,8	95,6
		1	94,1	93,8	92,1	92,2	98,7	98,4
		2	97,3	97,2	89,9	89,7	96,9	96,8
		3	98,5	98,5	91,0	90,9	96,0	96,0
		4	93,3	93,5	94,3	94,0	96,5	96,3
		5	95,7	95,6	93,8	93,7	95,5	95,9
		6	97,5	97,5	93,2	93,1	97,5	97,2

PIH0

D.2 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO

SÉRIE S/ADJUVANTES

ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)	Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)	Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)
	HL_wFCC0	1	1,21	<u>1,3</u>	2,29	<u>2,0</u>	2,43	<u>2,7</u>
		2	1,25		1,95		2,54	
		3	1,57		2,10		2,22	
		4	1,34		2,38		2,82	
		5	1,02		1,92		3,11	
		6	1,37		1,51		2,85	
	HL_wFCC5	1	1,68	<u>1,7</u>	2,42	<u>2,2</u>	2,75	<u>2,2</u>
		2	1,61		2,29		1,89	
		3	1,75		2,07		2,10	
		4	1,69		2,55		1,93	
		5	1,74		1,98		2,27	
		6	1,67		2,04		2,33	
	HL_wFCC10	1	1,45	<u>1,6</u>	1,91	<u>1,8</u>	2,34	<u>2,1</u>
		2	1,65		1,89		1,86	
		3	1,70		1,76		1,94	
		4	1,76		1,77		2,08	
		5	1,79		1,77		1,67	
		6	1,55		1,99		2,42	
	HL_wFCC15	1	1,64	<u>1,7</u>	1,96	<u>1,9</u>	1,69	<u>2,0</u>
		2	1,55		1,95		2,27	
		3	1,84		1,79		2,08	
		4	1,56		1,88		1,72	
		5	1,67		2,08		1,79	
		6	1,71		1,82		2,17	

S/ADJUVANTES

SÉRIE 0.5HID

		ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO					
Série	Argamassa	28 dias		56 dias		91 dias	
		Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)	Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)	Tensão de rotura à flexão (MPa)	Tensão média de rotura à flexão (MPa)
		0,57		0,59		1,16	
		0,54		0,57		1,15	
		0,53		0,58		1,09	
	HL_wFCC0_0.5Hid	0,49	0,5	0,57	0,6	0,94	1,1
		0,58		0,56		1,09	
		0,51		0,53		1,03	
		-		-		1,02	
		-		-		1,07	
		0,65		0,54		0,91	
		0,72		0,62		0,91	
		0,60		0,54		0,89	
		0,56		0,56		0,69	
	HL_wFCC5_0.5Hid	0,55	0,6	0,68	0,6	0,73	0,8
		0,55		0,65		0,89	
		-		-		0,77	
		-		-		0,71	
		-		-		0,85	
		0,49		0,60		0,64	
		0,57		0,56		0,79	
		0,52		0,57		0,72	
		0,55		0,67		0,87	
		0,70		0,65		0,86	
	HL_wFCC10_0.5Hid	0,66	0,6	0,59	0,6	0,76	0,8
		-		-		0,67	
		-		-		0,66	
		-		-		0,86	
		0,70		0,57		0,71	
		0,60		0,56		0,80	
		0,58		0,56		0,75	
		0,58		0,73		0,78	
		0,65		0,60		0,79	
	HL_wFCC15_0.5Hid	0,71	0,6	0,62	0,6	0,75	0,7
		-		-		0,68	
		-		-		0,67	

0.5HID

D.3 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

SÉRIE S/ADJUVANTES

ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)
HL_wFCC0		1	3,49	3,48	4,75	4,16	5,91	5,86
		2	3,17	3,06	5,42	5,55	5,47	5,61
		3	3,21	3,40	5,30	5,28	5,40	5,71
		4	3,56	3,64	5,02	4,86	6,24	6,65
		5	3,36	3,26	4,95	4,85	6,53	6,05
		6	3,70	3,67	4,67	5,47	6,37	5,81
HL_wFCC5		1	4,50	4,51	5,96	5,56	6,25	6,03
		2	4,32	4,38	5,24	5,36	6,32	6,11
		3	4,51	4,45	5,44	5,54	6,10	6,23
		4	4,53	4,50	5,28	5,30	6,26	6,12
		5	4,38	4,43	5,35	5,34	5,71	5,43
		6	4,64	4,54	5,68	5,24	5,86	5,94
HL_wFCC10		1	4,58	4,62	5,45	5,50	6,12	6,04
		2	4,50	4,64	5,85	5,77	6,01	5,77
		3	4,40	4,69	5,56	5,37	6,11	6,09
		4	4,81	4,85	5,80	5,89	5,98	6,14
		5	4,69	4,67	5,64	5,73	6,07	6,02
		6	4,72	4,59	5,36	5,55	6,01	5,76
HL_wFCC15		1	4,92	4,89	5,92	5,61	5,94	5,72
		2	4,71	4,85	5,55	5,67	5,93	6,03
		3	4,89	4,98	5,51	5,75	5,88	5,90
		4	4,95	5,04	5,57	5,48	5,43	5,49
		5	5,19	4,93	5,47	5,17	5,79	5,76
		6	4,99	4,77	5,23	5,30	5,71	5,41

S/ADJUVANTES

SÉRIE HID

ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO								
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)
	HL_wFCC0_Hid	1	0,77	0,76	1,05	0,92	1,10	0,90
		2	0,73	0,69	0,95	0,95	1,08	1,11
		3	0,67	0,71	0,99	0,91	1,24	1,06
		4	0,86	0,89	1,01	0,94	1,18	1,16
		5	0,89	0,86	1,11	1,02	1,15	1,23
		6	0,89	0,92	1,00	1,07	1,17	1,16
	HL_wFCC5_Hid	1	0,89	0,82	1,17	1,10	1,11	1,09
		2	0,80	0,84	1,31	1,27	1,13	1,14
		3	0,86	0,88	1,25	1,20	1,22	1,22
		4	0,73	0,82	1,00	1,04	1,16	1,24
		5	0,89	0,94	0,98	0,96	1,19	1,19
		6	0,83	0,95	1,00	0,95	1,09	1,19
	HL_wFCC10_Hid	1	0,94	0,92	1,16	1,04	1,14	1,00
		2	0,88	0,93	1,09	1,03	1,06	1,02
		3	0,98	1,07	1,09	1,12	1,15	1,06
		4	1,06	1,03	1,06	1,04	1,24	1,03
		5	0,92	0,90	1,00	1,00	1,20	1,05
		6	0,84	0,89	1,07	0,94	1,05	1,06
	HL_wFCC15_Hid	1	0,92	0,87	1,04	1,08	0,91	0,95
		2	0,67	0,69	1,12	1,01	0,85	0,96
		3	0,86	0,86	1,08	1,05	1,11	1,04
		4	0,88	0,91	0,95	1,08	0,80	1,02
		5	0,85	0,88	1,01	0,98	1,10	1,01
		6	0,90	0,95	1,10	1,01	1,06	0,84

DH

SÉRIE 0.5HID

		ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO						
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		56 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)
	HL_wFCC0_0.5Hid	1	0,71	0,70	0,68	0,88	1,96	1,90
		2	0,68	0,66	0,85	0,84	1,96	1,62
		3	0,70	0,65	0,78	0,76	1,72	1,82
		4	0,68	0,50	0,78	0,80	1,76	1,91
		5	0,67	0,74	0,81	0,77	1,80	1,75
		6	0,65	0,68	0,80	0,82	1,75	1,83
		7	-	-	-	-	1,72	1,82
		8	-	-	-	-	1,58	1,65
	HL_wFCC5_0.5Hid	1	0,84	0,81	0,78	0,80	1,81	1,77
		2	0,91	0,94	0,86	0,83	1,65	1,41
		3	0,80	0,84	0,90	0,79	1,51	1,57
		4	0,79	0,85	0,85	0,89	1,15	1,30
		5	0,80	0,85	0,88	0,92	1,22	1,28
		6	0,84	0,88	0,72	0,80	1,60	1,31
		7	-	-	-	-	1,51	1,31
		8	-	-	-	-	1,59	1,48
		9	-	-	-	-	1,36	1,44
	HL_wFCC10_0.5Hid	1	0,76	0,78	0,76	0,74	1,35	1,27
		2	0,82	0,90	0,60	0,62	1,28	1,24
		3	0,79	0,69	0,71	0,74	1,29	1,22
		4	0,87	0,86	0,88	0,87	1,35	1,43
		5	0,86	0,90	0,82	0,87	1,35	1,38
		6	0,91	0,90	0,78	0,89	1,25	1,04
		7	-	-	-	-	1,02	1,03
		8	-	-	-	-	1,23	1,23
		9	-	-	-	-	1,31	1,30
	HL_wFCC15_0.5Hid	1	0,96	0,99	0,74	0,80	1,28	1,25
		2	0,94	0,98	0,76	0,76	1,05	0,99
		3	0,96	0,97	0,83	0,79	0,84	1,07
		4	0,97	0,92	0,94	0,83	1,21	1,00
		5	0,95	0,96	0,81	0,79	1,50	1,29
		6	0,94	0,99	0,88	0,80	1,50	1,35
		7	-	-	-	-	1,26	1,21
		8	-	-	-	-	1,36	1,32

0.5HID

ENSAIO - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO										
Série	Argamassa	Amostra	28 dias			56 dias			91 dias	
			Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Tensão média de rotura à compressão (MPa)
	HL_wFCC0_0Hid	1	0,64	0,68	0,60	0,53	1,83	1,83		
		2	0,73	0,75	0,68	0,74	1,68	1,58		
		3	0,69	0,63	0,71	0,61	2,02	1,99		2,0
		4	0,69	0,71	0,82	0,66	1,94	1,87	0,7	
		5	0,72	0,71	0,80	0,67	2,10	2,17		
		6	0,75	0,74	0,86	0,90	2,28	2,25		
		1	0,86	0,56*	0,86	0,88	1,86	1,81		
		2	0,74	0,5*	0,83	0,85	1,52	1,64		
		3	0,86	0,92	0,86	0,72	1,71	1,85		1,6
		4	0,89	0,89	0,92	0,89	1,29	1,33	0,8	
		5	0,75	0,88	0,65	0,86	-	-		
		6	0,59*	1,00	1,05	0,60	-	-		
		1	0,98	1,03	0,78	0,89	1,52	1,56		
		2	1,02	0,99	0,66	0,82	1,34	1,61		
		3	0,97	1,02	0,77	0,83	1,54	1,43		
		4	1,02	0,93	1,05	1,01	1,55	1,45	0,9	
		5	0,98	0,88	0,70	1,00	1,43	1,54		
		6	0,92	0,93	0,72	0,97	1,52	1,62		
		1	0,68*	0,77	0,98	0,97	1,51	1,47		
		2	0,67*	0,54*	0,90	0,93	1,55	1,40		
		3	0,80	0,74	0,89	0,90	1,48	1,60		
		4	1,00	1,00	1,10	1,10	1,61	1,59	1,0	
		5	1,11	1,00	0,78	1,00	1,47	1,48		
		6	1,12	1,08	1,06	1,11	1,57	1,57		

*Os valores a vermelho foram desprezados uma vez que as faces das semi-amostras, que foram sujeitas ao ensaio, se encontravam ligeiramente degradadas e, assim, obtiveram-se valores de tensão de rotura à compressão inferiores aos obtidos nas restantes amostras.

D.4 – AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

28 e 56 dias de hidratação

Aos 28 e 56 dias de hidratação não se registou carbonatação nas argamassas estudadas, como mostram as figuras abaixo.

SÉRIE S/ADJUVANTES



SÉRIE HID



SÉRIE 0.5HID



SÉRIE 0HID



91 dias de hidratação

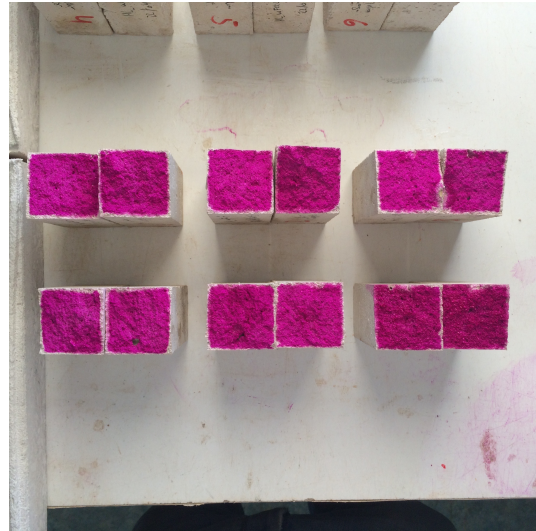
Aos 91 dias de hidratação foram registradas alterações na profundidade de carbonatação em todas as argamassas estudadas, como mostram as figuras abaixo.

SÉRIE S/ADJUVANTES

HL_wFCC0



HL_wFCC5



HL_wFCC10



HL_wFCC15



SÉRIE HID

HL_wFCC0_Hid



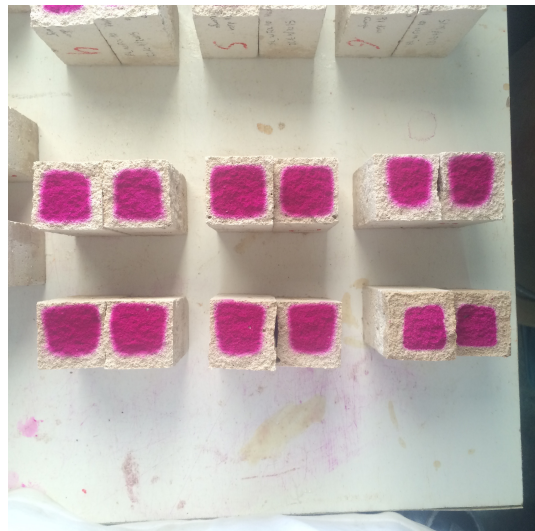
HL_wFCC5_Hid



HL_wFCC10_Hid



HL_wFCC15_Hid



SÉRIE 0.5Hid

HL_wFCC0_5Hid



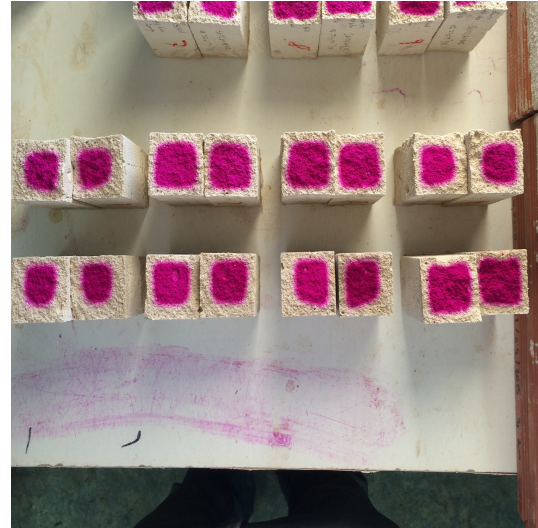
HL_wFCC5_5Hid



HL_wFCC10_5Hid



HL_wFCC15_5Hid



SÉRIE 0HID

HL_wFCC0_0Hid



HL_wFCC5_0Hid



HL_wFCC10_0Hid



HL_wFCC15_0Hid



D.5 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

SÉRIE S/ADJUVANTES – 28 dias de hidratação

Série	Argamassa	Amostra	MASSA (g)																
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0		1	215,066	220,268	224,626	229,079	232,367	235,105	239,539	242,979	245,339	245,719	245,789	245,830	246,219	246,367	246,392	246,556	246,796
		2	218,560	224,170	229,013	233,617	236,961	239,717	244,189	247,571	249,536	249,536	249,593	249,653	250,039	250,193	250,217	250,379	250,607
		3	220,267	225,821	230,435	235,275	238,771	241,689	246,301	249,846	251,824	251,980	252,016	252,089	252,468	252,633	252,658	252,782	253,034
		4	235,852	240,868	245,251	249,628	252,930	255,663	260,076	263,598	266,505	268,622	269,335	269,449	269,920	270,065	270,087	270,256	270,509
		5	242,381	247,390	251,702	256,031	259,266	261,929	266,257	269,773	272,735	275,194	276,549	276,823	277,317	277,514	277,549	277,750	277,978
		6	235,738	241,650	246,474	251,347	254,930	257,883	262,676	266,418	268,910	269,371	269,442	269,518	269,920	270,098	270,141	270,287	270,561
HL_wFCC5		1	242,759	245,569	248,853	251,927	254,190	256,066	259,292	261,968	264,232	266,262	268,030	269,664	271,913	278,137	278,257	278,437	278,746
		2	213,309	214,529	218,699	221,971	224,454	226,450	229,735	232,375	234,627	236,630	238,385	240,039	242,740	244,022	244,168	244,386	244,691
		3	215,378	218,727	221,874	224,987	227,307	229,332	232,629	235,341	237,587	239,581	241,333	242,907	246,312	246,583	246,766	246,941	247,150
		4	213,504	214,903	218,827	221,975	224,275	226,186	229,413	232,033	234,256	236,231	237,961	239,575	244,229	244,473	244,608	244,795	245,105
		5	241,820	245,390	248,247	251,090	253,230	254,983	257,915	260,309	262,305	264,123	265,674	267,076	276,317	276,700	276,853	277,042	277,372
		6	212,345	215,896	218,760	221,751	223,914	225,709	228,745	231,264	233,427	235,355	237,074	238,616	242,814	243,090	243,175	243,347	243,659
HL_wFCC10		1	228,798	232,250	234,866	237,531	239,502	241,168	243,995	246,345	248,347	250,095	251,660	253,094	262,325	262,552	262,675	262,913	264,743
		2	226,133	228,458	231,704	234,417	236,433	238,082	240,896	243,249	245,225	246,939	249,483	249,849	259,227	259,532	259,703	259,981	258,223
		3	230,184	233,545	236,348	239,117	241,220	242,954	245,847	248,240	250,225	252,020	253,621	255,080	263,954	264,240	264,416	264,631	255,559
		4	222,014	225,759	228,500	231,256	233,366	235,094	237,908	240,237	242,205	243,907	245,435	246,817	254,589	254,875	255,081	255,271	264,971
		5	224,417	227,963	230,594	233,269	235,283	236,928	239,650	241,943	243,874	245,549	247,082	248,395	257,199	257,512	257,683	257,889	260,350
		6	230,181	233,903	236,654	239,489	241,610	243,321	246,271	248,730	250,811	252,556	254,145	255,542	263,794	264,083	264,264	264,420	263,234
HL_wFCC15		1	237,992	242,033	244,727	247,530	249,678	251,456	254,402	256,839	258,898	260,656	262,240	263,653	273,400	273,701	273,956	274,050	275,424
		2	219,015	223,108	225,836	228,717	230,944	232,793	235,855	238,388	240,552	242,421	244,135	245,620	251,651	251,918	252,087	252,276	252,646
		3	217,295	221,410	224,253	227,111	229,244	231,007	233,993	236,431	238,490	240,320	241,967	243,432	249,739	249,976	250,123	250,323	250,704
		4	234,943	239,060	241,559	244,155	246,151	247,775	250,563	252,854	254,730	256,409	257,906	259,252	269,878	270,218	270,354	270,603	270,985
		5	219,790	222,159	225,626	228,683	230,961	232,839	236,060	238,753	240,974	242,950	244,701	246,253	252,334	252,614	252,800	252,997	253,393
		6	241,040	245,317	248,017	250,749	252,920	254,683	257,667	260,122	262,172	263,967	265,608	266,986	276,872	277,194	277,405	277,540	277,986

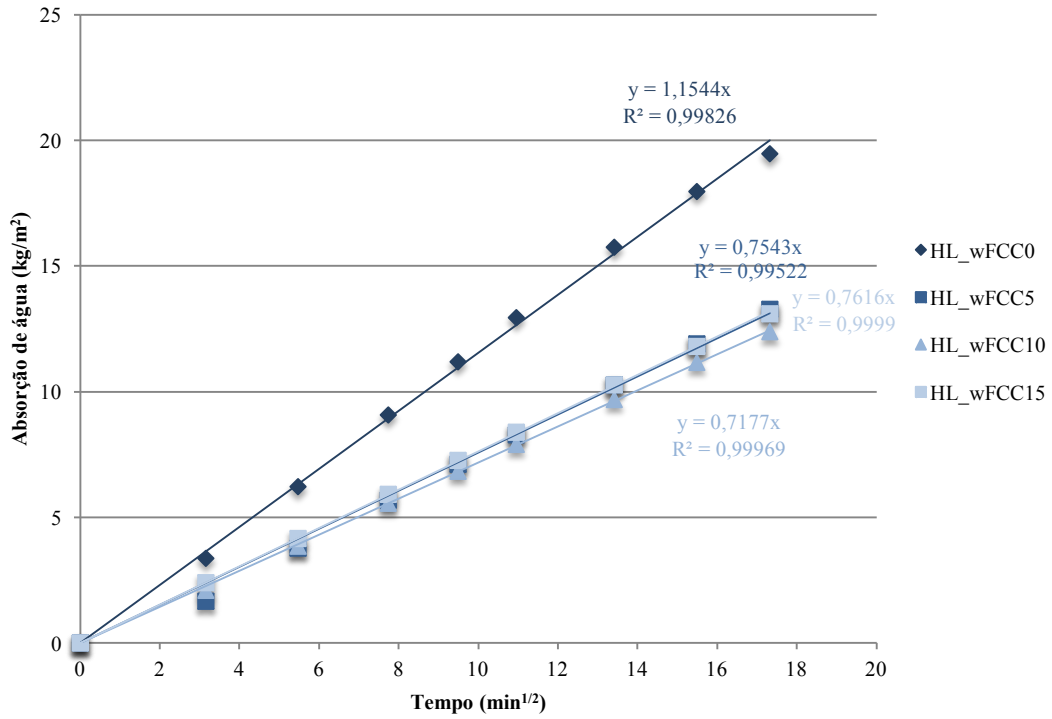
S/ADJUVANTES

SÉRIE S/ADJUVANTES – 91 dias de hidratação

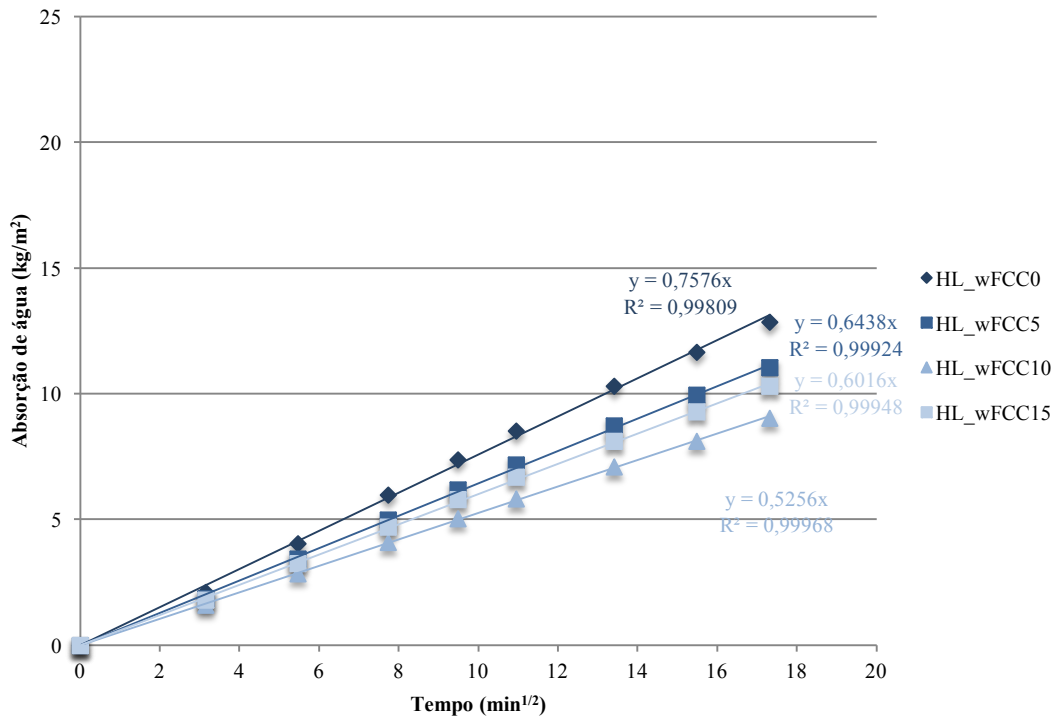
Série	Argamassa	Amostra	MASSA (g)																
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0		1	234,078	237,364	240,392	243,496	245,742	247,567	250,405	252,596	254,482	256,608	257,721	258,683	265,406	265,496	265,558	265,613	265,862
		2	235,976	239,31	242,25	245,209	247,394	249,211	251,989	254,145	255,975	258,045	259,126	260,082	267,021	267,802	267,805	267,864	268,119
		3	229,247	232,408	235,523	238,597	240,826	242,624	245,414	247,532	249,42	251,536	252,649	253,593	260,26	260,372	260,425	260,459	260,676
		4	238,947	242,506	245,733	248,906	251,172	253,033	255,988	258,196	260,162	262,37	263,529	264,504	270,967	271,118	271,141	271,215	271,521
		5	229,607	232,937	236,194	239,369	241,598	243,436	246,313	248,471	250,384	252,454	253,552	254,504	260,691	260,803	260,806	260,869	261,143
		6	242,968	246,544	249,635	252,696	254,973	256,798	259,66	261,865	263,818	266,008	267,157	268,16	275,735	275,908	275,91	275,975	276,216
HL_wFCC5		1	237,116	239,905	242,286	244,677	246,501	248,061	250,469	252,398	254,101	256,076	257,139	258,143	269,147	269,519	269,674	269,804	270,203
		2	232,328	235,273	237,891	240,458	242,385	243,997	246,43	248,284	249,961	251,746	252,734	253,617	263,5	264,125	264,287	264,374	264,922
		3	233,991	236,951	239,526	242,111	244,17	245,841	248,456	250,436	252,23	254,25	255,362	256,347	265,887	266,202	266,401	266,523	267,092
		4	238,21	241,439	244,358	246,945	248,921	250,581	253,251	255,438	257,32	259,563	260,755	261,795	270,52	270,777	270,954	271,057	271,492
		5	231,722	234,647	236,87	239,172	240,983	242,503	244,908	246,865	248,521	250,379	251,411	252,34	263,071	263,578	263,751	263,865	264,463
		6	236,963	239,87	242,248	244,773	246,656	248,202	250,638	252,503	254,261	256,141	257,161	258,084	268,641	269,541	269,738	269,832	270,336
HL_wFCC10		1	237,673	240,213	242,275	244,362	245,936	247,239	249,305	251,001	252,498	254,191	255,156	255,965	266,603	270,725	270,968	271,106	271,623
		2	227,464	230,033	232,064	234,151	235,772	237,074	239,275	240,924	242,49	244,223	245,19	246,058	257,021	258,803	258,996	259,104	259,555
		3	238,53	241,057	243,023	245,062	246,524	247,787	249,751	251,305	252,668	254,243	255,111	255,885	266,016	271,599	271,919	272,038	272,576
		4	224,579	226,946	228,844	230,693	232,044	233,185	235,102	236,603	237,905	239,348	240,14	240,867	250,46	255,615	255,86	256,028	256,41
		5	228,713	231,433	233,458	235,49	237,033	238,382	240,526	242,263	243,856	245,581	246,549	247,405	258,62	260,59	260,74	260,908	261,352
		6	238,861	241,392	243,411	245,392	246,841	248,075	250,085	251,668	253,075	254,67	255,492	256,28	266,102	271,772	272,035	272,178	272,576
HL_wFCC15		1	231,965	234,719	236,828	239,115	240,789	242,156	244,445	246,297	247,918	249,761	250,73	251,628	262,709	264,667	264,855	264,924	265,3
		2	230,546	233,386	235,455	237,564	239,215	240,646	242,837	244,746	246,336	248,189	249,215	250,628	260,859	263,182	263,332	263,454	263,818
		3	234,43	237,437	239,749	242,146	243,935	245,415	247,836	249,733	251,381	253,2	254,183	255,076	265,939	267,593	267,724	267,824	268,304
		4	232,119	234,95	237,073	239,242	240,938	242,378	244,604	246,43	248,049	249,9	250,844	251,683	262,515	265,305	265,536	265,626	266,001
		5	230,516	233,443	235,701	238,029	239,779	241,243	243,587	245,533	247,191	249,251	250,247	251,125	261,887	263,495	263,679	263,753	264,152
		6	232,972	236,009	238,893	241,591	243,481	244,987	247,252	249,084	250,511	252,271	253,198	254,023	264,227	265,959	266,085	266,217	266,546

S/ADJUVANTES

Retas de ajuste capilar - 28 dias de hidratação



Retas de ajuste capilar - 91 dias de hidratação



SÉRIE HID – 28 dias de hidratação

		ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE - 28 dias de hidratação																
Série	Argamassa	Massa (g)																
		0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0_Hid	1	158,153	161,701	164,362	167,029	169,098	170,859	173,695	176,072	178,048	179,699	181,223	182,540	187,425	187,666	187,683	187,726	187,876
	2	157,936	161,570	164,061	166,580	168,522	170,161	172,935	175,214	177,186	178,930	180,465	181,855	187,355	187,643	187,688	187,786	187,925
	3	142,750	146,286	148,702	151,172	153,031	154,631	157,342	159,582	161,481	163,143	164,618	165,947	169,585	169,858	169,873	169,786	170,115
	4	147,139	150,836	153,489	156,191	158,228	159,938	162,837	165,192	167,179	168,877	170,391	171,742	174,782	175,056	175,060	175,174	175,296
	5	144,653	148,368	150,997	153,625	155,664	157,323	160,150	162,472	164,388	166,110	167,608	168,912	171,957	172,232	172,270	172,386	172,495
	6	158,120	161,940	164,560	167,215	169,226	170,893	173,645	175,924	177,819	179,461	180,908	182,202	187,510	187,824	187,859	187,960	188,125
HL_wFCC5_Hid	1	149,787	152,325	154,017	155,729	156,995	158,034	159,671	160,951	161,958	162,782	163,500	164,143	169,614	173,687	175,838	176,572	176,794
	2	148,656	151,375	153,103	154,843	156,121	157,164	158,816	160,089	161,095	161,929	162,668	163,282	168,703	172,644	174,704	175,350	175,526
	3	149,560	152,329	154,072	155,813	157,091	158,137	159,821	161,127	162,153	163,016	163,766	164,417	170,057	174,286	175,980	176,399	176,483
	4	144,999	147,723	149,462	151,241	152,552	153,618	155,302	156,619	157,632	158,482	159,198	159,835	165,318	169,265	170,746	171,136	171,224
	5	145,480	148,410	150,160	151,891	153,222	154,275	155,963	157,232	158,226	159,053	159,787	160,412	165,976	170,083	171,595	171,903	172,012
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HL_wFCC10_Hid	1	147,307	150,709	152,574	154,658	156,200	157,451	159,391	160,905	162,084	163,036	163,862	164,566	170,831	174,798	175,099	175,187	175,280
	2	148,605	151,842	153,721	155,748	157,300	158,560	160,570	162,100	163,301	164,292	165,108	165,800	172,248	176,326	176,734	176,853	176,941
	3	149,659	152,785	154,652	156,620	158,130	159,339	161,303	162,808	163,982	164,932	165,759	166,485	172,799	177,088	177,720	177,885	177,999
	4	150,236	153,579	155,525	157,498	158,957	160,150	162,035	163,427	164,543	165,473	166,236	166,936	172,972	177,388	178,341	178,533	178,730
	5	143,953	147,261	149,175	151,178	152,680	153,873	155,788	157,275	158,394	159,342	160,133	160,816	167,092	170,904	171,160	171,270	171,456
	6	152,085	155,351	157,405	159,427	160,917	162,171	164,103	165,275	166,767	167,758	168,558	169,288	175,636	180,114	180,788	180,920	181,036
HL_wFCC15_Hid	1	150,625	154,362	156,246	158,227	159,707	160,886	162,757	164,149	165,286	166,204	166,996	167,670	174,123	178,698	179,323	179,460	179,559
	2	142,737	146,483	148,438	150,500	152,047	153,280	155,230	156,752	157,918	158,870	159,690	160,390	167,157	169,758	169,845	169,929	170,030
	3	156,353	160,136	162,046	164,058	165,560	166,763	168,661	170,129	171,295	172,205	172,995	173,713	180,449	185,391	185,996	186,114	186,214
	4	140,650	144,378	146,133	148,041	149,467	150,602	152,398	153,788	154,877	155,801	156,560	157,219	163,637	167,155	167,299	167,410	167,539
	5	152,522	156,277	158,079	160,013	161,467	162,622	164,468	165,833	166,928	167,827	168,594	169,327	175,649	180,388	181,339	181,512	181,631
	6	142,428	146,393	148,315	150,393	151,925	153,140	155,120	156,615	157,757	158,727	159,547	160,318	167,068	169,600	169,694	169,737	169,853

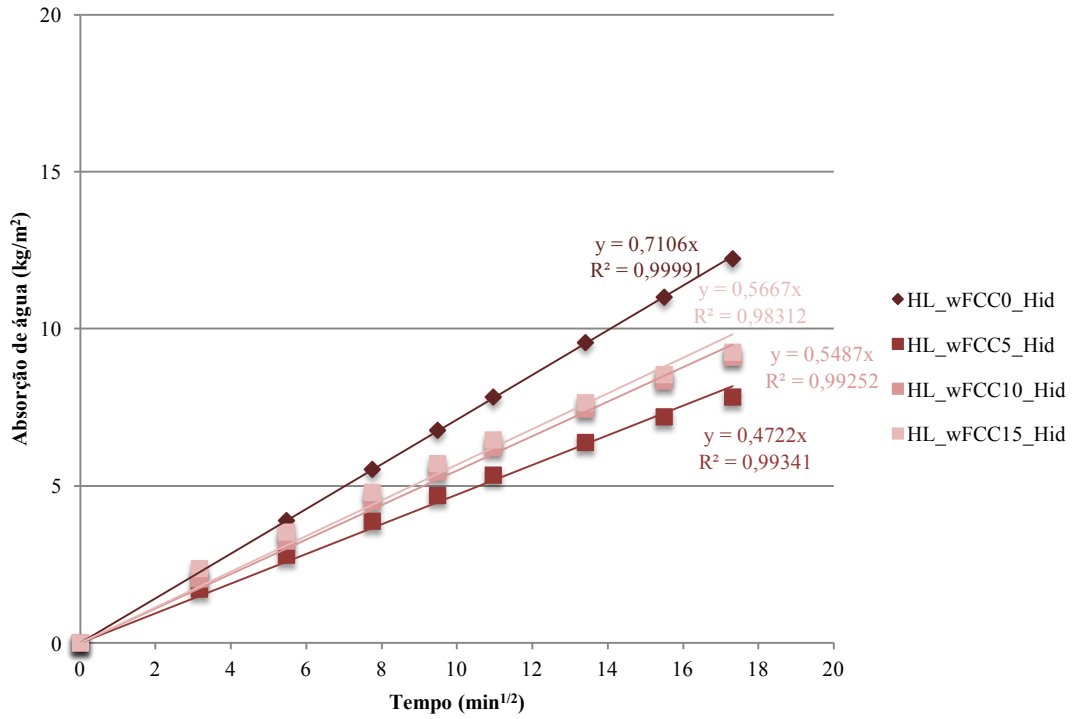
III

SÉRIE HID – 91 dias de hidratação

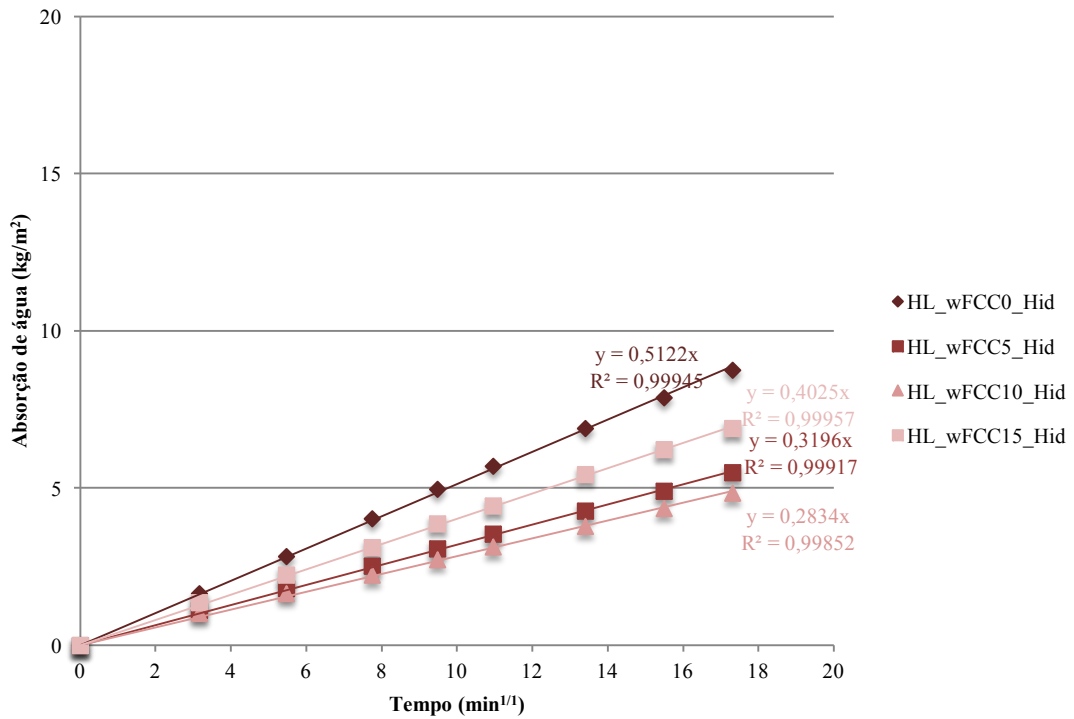
ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE - 91 dias de hidratação																			
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)																
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0_Hid		1	154,837	157,380	159,278	161,087	162,540	163,669	165,444	166,891	168,228	169,615	170,437	171,154	179,561	180,628	180,770	180,825	181,013
		2	154,151	156,736	158,658	160,517	162,015	163,173	165,152	166,808	168,174	169,700	170,557	171,371	179,731	179,992	180,125	180,146	180,446
		3	155,840	158,584	160,465	162,394	163,869	164,994	166,981	168,588	170,043	171,594	172,442	173,289	181,662	181,967	182,073	182,102	182,340
		4	150,691	153,425	155,333	157,230	158,807	159,984	161,875	163,559	164,939	166,744	167,616	168,519	175,849	176,033	176,115	176,202	176,433
		5	159,444	162,057	163,966	165,947	167,486	168,716	170,724	172,250	173,686	175,348	176,245	177,050	185,569	186,179	186,315	186,345	186,604
		6	148,835	151,475	153,308	155,207	156,698	157,882	159,814	161,332	162,830	164,442	165,386	166,291	173,712	173,824	173,871	173,916	174,226
HL_wFCC5_Hid		1	147,526	149,296	150,111	151,095	151,906	152,478	153,462	154,303	155,070	155,969	156,481	157,013	164,239	169,793	171,334	171,661	172,176
		2	161,975	163,724	164,599	165,631	166,496	167,178	168,240	169,161	170,660	171,040	171,639	172,149	180,554	187,202	188,481	188,727	189,094
		3	149,901	151,435	152,439	153,352	154,135	154,864	155,766	156,566	157,230	158,142	158,634	159,074	166,218	172,200	174,068	174,434	174,880
		4	160,640	162,170	163,177	164,100	164,793	165,462	166,434	167,234	167,909	168,766	169,226	169,706	176,553	182,718	185,920	186,660	187,338
		5	148,167	150,203	151,741	153,211	154,298	155,283	156,846	158,167	159,256	160,655	161,448	162,153	171,794	172,661	172,737	172,785	173,040
		6	162,010	164,014	165,493	166,930	168,021	169,007	170,461	171,802	172,865	174,253	175,026	175,718	186,088	188,978	189,071	189,165	189,449
HL_wFCC10_Hid		1	160,260	161,746	162,701	163,568	164,300	164,912	165,787	166,661	167,384	168,390	168,870	169,392	176,313	181,793	185,080	186,493	187,917
		2	158,411	159,937	160,889	161,845	162,616	163,301	164,368	165,208	166,060	167,184	167,790	168,380	176,394	182,730	185,103	185,456	185,921
		3	164,281	165,746	166,630	167,530	168,203	168,824	169,808	170,598	171,274	172,219	172,676	173,171	180,499	186,546	190,118	191,576	192,756
		4	159,712	161,304	162,309	163,237	163,995	164,667	165,739	166,651	167,488	168,625	169,146	169,680	177,786	184,340	186,671	187,022	187,454
		5	167,513	169,148	170,229	171,246	172,039	172,711	173,746	174,685	175,429	176,371	176,990	177,531	185,533	192,133	195,212	196,054	196,797
		6	156,896	158,826	160,049	161,156	162,094	162,812	164,001	165,035	165,933	167,052	167,716	168,265	176,412	182,585	183,678	183,840	184,165
HL_wFCC15_Hid		1	162,856	164,853	166,107	167,354	168,472	169,307	170,766	171,950	172,917	174,111	174,797	175,390	183,299	189,204	191,387	191,902	192,260
		2	154,634	156,677	158,022	159,395	160,634	161,534	163,191	164,472	165,619	166,974	167,724	168,431	177,930	181,965	182,212	182,224	182,409
		3	163,089	166,028	167,880	169,692	171,094	172,108	173,683	174,911	175,866	177,023	177,633	178,266	186,046	191,453	192,317	192,431	192,747
		4	155,404	157,225	158,378	159,580	160,653	161,463	163,041	164,442	165,592	167,056	167,872	168,615	178,337	182,893	183,069	183,149	183,305
		5	164,004	165,983	167,301	168,564	169,638	170,509	172,052	173,229	174,340	175,614	176,365	177,014	185,500	191,692	192,962	193,139	193,431
		6	155,120	157,422	158,911	160,423	161,682	162,754	164,458	165,800	167,009	168,411	169,276	169,984	180,125	182,773	182,851	182,924	183,053

III

Retas de ajuste capilar - 28 dias de hidratação



Retas de ajuste capilar - 91 dias de hidratação



SÉRIE 0.5HID -28 dias de hidratação

		ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE - 28 dias de hidratação																	
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)																
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0_5Hid		1	150,929	155,179	158,047	161,028	163,159	164,967	167,844	170,123	172,052	173,724	175,206	176,358	178,533	178,842	178,925	178,976	179,069
		2	153,616	158,000	160,880	163,818	166,008	167,831	170,757	173,158	175,213	177,038	178,620	179,861	182,046	182,455	182,558	182,645	182,740
		3	150,404	154,774	157,551	160,407	162,527	164,377	167,187	169,513	171,458	173,208	174,686	175,846	177,768	178,149	178,226	178,319	178,426
		4	152,409	156,840	159,569	162,466	164,656	166,468	169,424	171,859	173,885	175,709	177,271	178,477	180,485	180,875	180,996	181,060	181,160
		5	150,793	155,223	158,012	160,933	163,063	164,864	167,692	170,058	172,002	173,793	175,270	176,446	178,666	179,032	179,210	179,237	179,312
		6	147,545	151,963	154,605	157,271	159,292	161,056	163,805	166,148	168,097	169,951	171,494	172,618	174,710	174,981	175,020	175,129	175,178
HL_wFCC5_5Hid		1	152,629	155,544	157,646	159,735	161,276	162,487	164,395	165,947	167,151	168,193	169,131	169,885	177,244	179,921	180,075	180,199	180,276
		2	152,662	155,431	157,361	159,331	160,759	162,487	163,677	165,096	166,240	167,242	168,174	168,872	176,180	179,797	180,068	180,205	180,134
		3	154,180	157,216	159,278	161,373	162,865	161,872	165,938	167,414	168,655	169,668	170,616	171,315	178,644	181,062	181,283	181,365	181,394
		4	151,375	154,291	156,280	158,310	159,764	160,962	162,762	164,244	165,481	166,489	167,384	168,184	175,543	178,413	178,715	178,788	178,781
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	151,413	154,438	156,280	158,423	159,851	160,921	162,550	163,916	164,481	165,944	166,817	167,487	174,465	178,131	178,360	178,498	178,500
HL_wFCC10_5Hid		1	148,840	152,205	154,239	156,313	157,807	159,011	160,773	162,171	163,302	164,269	165,128	165,767	172,548	176,402	176,610	176,700	176,819
		2	144,450	147,774	149,743	151,734	153,200	154,388	156,156	157,553	158,644	159,619	160,463	161,079	167,896	171,274	171,496	171,594	171,580
		3	148,712	152,043	154,042	156,036	157,409	158,520	160,213	161,527	162,583	163,555	164,293	164,959	171,656	175,913	176,279	176,331	176,433
		4	143,983	147,253	149,171	151,160	152,585	153,743	155,506	156,887	157,957	158,985	159,750	160,401	167,162	170,560	170,776	170,881	170,904
		5	145,582	149,118	151,017	152,992	154,456	155,614	157,417	158,816	159,882	160,868	161,782	162,399	169,225	172,431	172,656	172,755	172,832
		6	149,894	153,271	155,211	157,255	158,714	159,871	161,674	163,013	164,186	165,128	165,977	166,640	173,427	177,291	177,567	177,640	177,828
HL_wFCC15_5Hid		1	149,755	153,199	155,165	157,149	158,569	159,680	161,388	162,599	163,697	164,564	165,271	165,973	172,518	176,901	177,273	177,371	177,476
		2	148,565	152,058	154,117	156,188	157,668	158,835	160,641	161,883	163,036	163,921	164,679	165,370	172,013	175,674	175,891	175,996	176,169
		3	148,890	152,276	154,234	156,263	157,726	158,893	160,655	161,947	163,035	163,992	164,693	165,408	172,159	176,047	176,266	176,360	176,654
		4	149,412	152,696	154,615	156,558	157,960	159,067	160,755	162,007	163,107	163,964	164,709	165,357	171,911	176,616	177,066	177,170	177,379
		5	150,704	154,185	156,122	158,112	159,510	160,650	162,281	163,582	164,623	165,490	166,259	166,941	173,432	177,900	178,343	178,422	178,615
		6	147,275	150,666	152,584	154,500	155,820	156,881	158,448	159,654	160,698	161,599	162,317	162,950	169,348	173,876	174,314	174,411	174,558

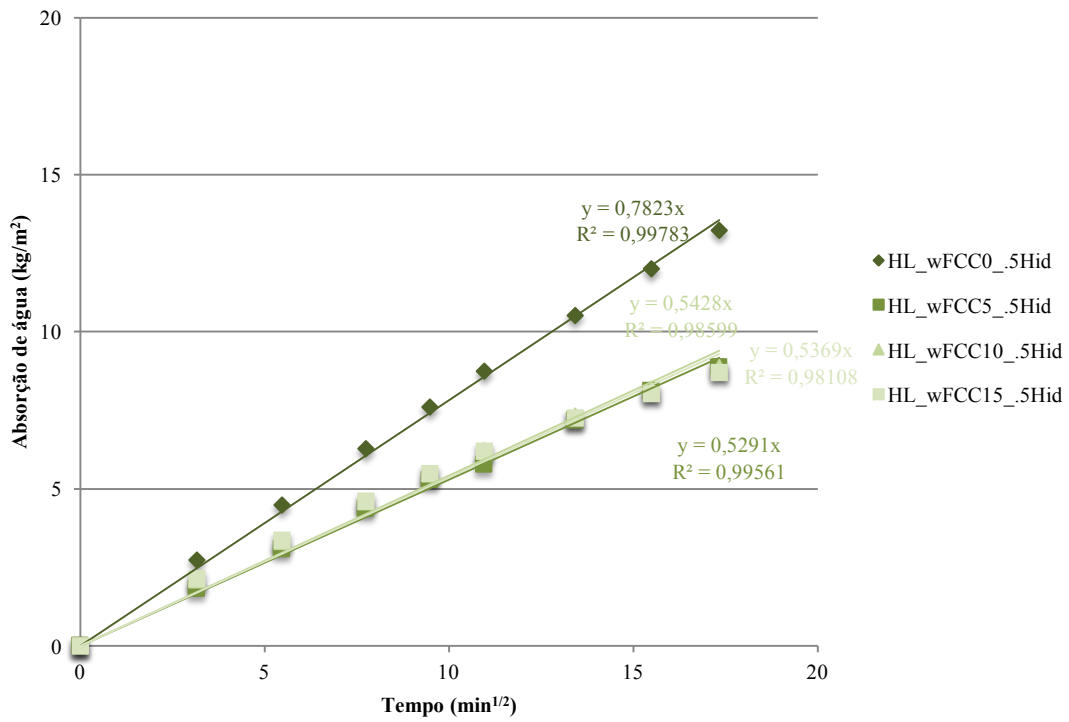
0.5HID

SÉRIE 0.5HID -91 dias de hidratação

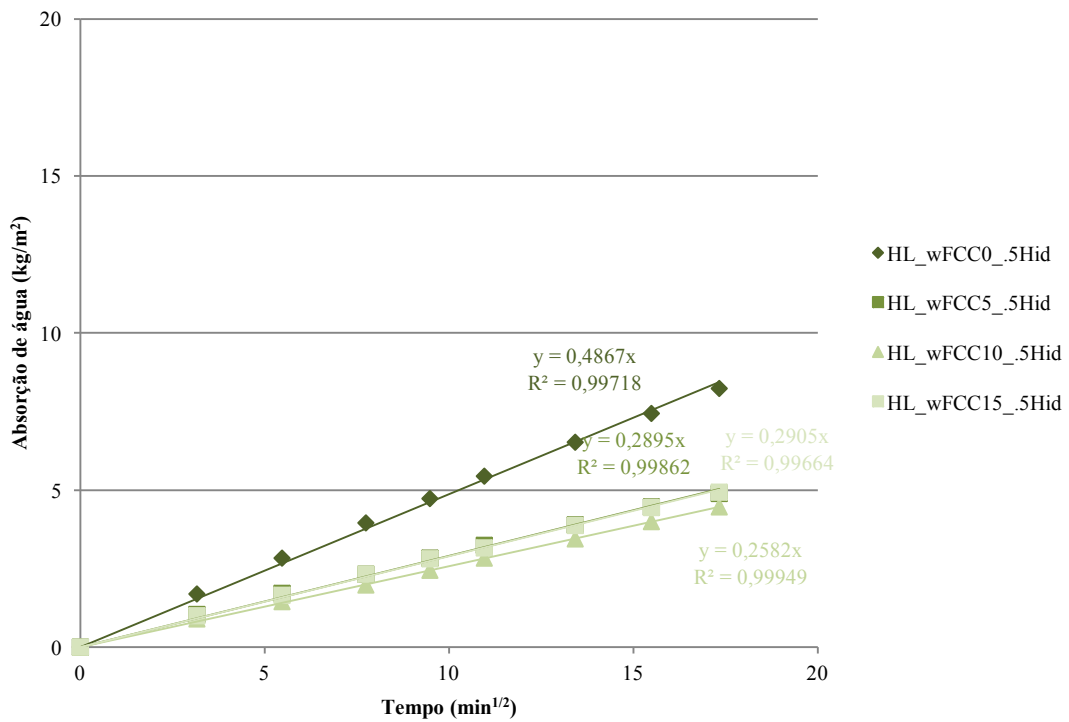
ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE - 91 dias de hidratação																					
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)																		
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h		
HL_wFCC0_5Hid		1	156,615	159,339	161,086	162,806	164,101	165,220	166,953	168,366	169,632	170,755	171,825	172,742	181,170	182,083	182,224	182,409	182,690		
		2	155,093	157,872	159,739	161,903	162,778	163,931	165,694	167,125	168,383	169,542	170,573	171,491	179,870	180,559	180,707	180,820	180,021	180,021	
		3	152,802	155,343	156,881	158,440	159,634	160,618	162,239	163,492	164,581	165,613	166,626	167,377	175,254	177,680	177,885	178,045	178,201	178,201	178,201
		4	152,762	155,286	157,039	158,666	159,900	160,907	162,374	163,796	164,913	165,992	166,838	167,707	175,834	177,961	178,099	178,205	178,328	178,328	178,328
		5	156,712	159,537	161,585	163,415	164,836	166,050	168,025	169,524	170,969	172,290	173,391	174,355	182,013	182,533	182,573	182,697	182,829	182,829	182,829
		6	154,528	157,310	159,412	161,310	162,737	164,057	165,844	167,598	169,015	170,231	171,516	172,541	179,811	180,098	180,142	180,289	180,395	180,395	180,395
HL_wFCC5_5Hid		1	149,084	150,776	151,867	152,935	153,838	154,511	155,519	156,490	157,223	157,933	158,750	159,286	165,578	171,454	173,696	173,853	173,998	173,998	
		2	152,220	154,222	155,501	156,600	157,430	158,165	159,307	160,327	161,098	161,829	162,585	163,213	169,369	174,998	177,427	177,669	177,842	177,842	
		3	150,967	152,636	153,582	154,387	155,050	155,664	156,609	157,422	158,074	158,706	159,275	159,826	164,901	169,675	172,835	175,104	175,104	176,299	176,299
		4	149,178	150,635	151,613	152,487	153,208	153,859	154,774	155,641	156,282	156,987	157,642	158,176	163,323	168,214	171,447	173,544	174,402	174,402	174,402
		5	148,379	149,974	151,015	152,042	152,931	153,603	154,711	155,622	156,322	157,255	157,832	158,565	164,578	170,387	172,868	173,132	173,176	173,176	173,176
		6	148,424	150,028	151,148	152,210	153,058	153,638	154,702	155,596	156,327	157,115	157,739	158,238	164,362	170,234	172,686	173,006	173,006	173,010	173,010
HL_wFCC10_5Hid		1	153,048	154,490	155,360	156,200	156,978	157,561	158,516	159,377	160,124	160,811	161,466	161,987	167,541	172,735	176,102	178,327	179,695	179,695	
		2	154,807	156,238	157,145	157,972	158,682	159,273	160,327	161,236	161,995	162,772	163,374	163,920	169,745	175,075	178,641	181,001	181,001	181,920	
		3	151,391	152,832	153,653	154,373	155,052	155,606	156,550	157,448	158,116	158,820	159,298	159,959	164,970	169,433	172,379	174,502	174,502	177,938	177,938
		4	156,009	157,495	158,383	159,302	159,980	160,573	161,580	162,457	163,285	163,961	164,556	165,046	170,580	175,674	178,912	181,264	183,448	183,448	183,448
		5	153,732	155,080	156,056	156,914	157,746	158,404	159,344	160,194	161,006	161,824	162,556	163,096	168,899	174,473	177,988	180,107	180,573	180,573	180,573
		6	160,098	161,531	162,502	163,390	164,197	164,800	165,815	166,758	167,445	168,340	168,936	169,572	175,653	181,597	185,316	187,528	188,043	188,043	188,043
HL_wFCC15_5Hid		1	151,678	153,192	154,322	155,417	156,203	157,047	158,074	159,031	159,823	160,619	161,416	161,866	168,092	173,977	177,587	178,249	178,346	178,346	
		2	154,084	155,582	156,721	157,801	158,483	159,101	160,231	161,184	161,983	162,811	163,534	163,983	170,168	176,195	179,869	180,872	180,991	180,991	
		3	151,656	153,193	154,177	155,069	155,793	156,282	157,291	158,217	158,935	159,670	160,340	160,884	166,741	172,626	176,336	178,256	178,518	178,518	
		4	152,400	153,992	154,890	155,947	156,527	157,018	158,111	158,841	159,600	160,339	161,008	161,501	167,216	172,796	176,356	178,497	179,255	179,255	
		5	148,505	150,271	151,453	152,540	153,397	153,913	155,152	156,189	157,047	157,836	158,625	159,226	165,759	171,908	174,615	174,663	174,710	174,710	174,710
		6	150,074	151,696	152,793	153,978	154,939	155,481	156,701	157,654	158,474	159,381	160,065	160,645	167,281	173,675	176,310	176,483	176,483	176,483	176,483

0.5HID

Retas de ajuste capilar - 28 dias de hidratação



Retas de ajuste capilar - 91 dias de hidratação



SÉRIE OHID – 28 dias de hidratação

Série		ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE - 28 dias de hidratação																
		Massa (g)																
Argamassa	Amostra	0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h
HL_wFCC0_0Hid	1	146,166	151,727	154,832	158,105	160,497	162,545	165,787	168,339	170,480	171,683	172,355	172,789	174,829	175,338	175,623	176,023	176,207
	2	151,674	157,069	160,076	163,175	165,440	167,440	170,507	172,992	175,167	176,799	177,697	178,174	180,330	180,969	181,316	181,757	181,938
	3	149,416	155,088	158,251	161,528	164,007	166,101	169,355	171,979	174,135	175,453	176,073	176,525	178,723	179,355	179,653	180,067	180,208
	4	148,867	154,997	158,049	161,290	163,731	165,729	168,891	171,468	173,545	174,740	175,355	175,749	177,603	178,160	178,513	178,793	178,981
	5	148,830	154,673	157,595	160,714	163,168	165,213	168,411	170,987	173,018	174,249	174,881	175,357	177,563	178,189	178,385	178,690	178,886
	6	148,145	153,778	156,793	159,973	162,389	164,394	167,535	170,106	172,278	173,684	174,417	174,843	176,678	177,151	177,262	177,525	177,664
HL_wFCC5_0Hid	1	140,217	143,762	145,612	147,615	149,131	150,379	152,309	153,821	155,158	156,272	157,217	158,094	164,841	165,641	165,743	165,943	166,061
	2	157,635	161,370	163,249	165,115	166,411	167,577	169,346	170,748	171,999	173,060	173,966	174,766	182,637	184,774	184,956	185,154	185,194
	3	145,378	148,905	150,712	152,621	154,066	155,207	157,043	158,543	159,788	160,892	161,815	162,687	170,080	170,975	171,190	171,368	171,515
	4	155,770	159,135	161,022	162,976	164,407	165,587	167,383	168,832	170,088	171,342	172,143	172,990	181,073	182,722	182,870	183,007	183,119
	5	144,312	147,507	149,462	151,502	152,918	154,132	155,948	157,466	158,747	159,879	160,766	161,628	169,159	170,155	170,277	170,364	170,445
	6	151,645	154,918	156,941	159,101	160,510	161,730	163,640	165,177	166,452	167,603	168,456	169,291	177,212	178,724	178,874	178,889	178,962
HL_wFCC10_0Hid	1	144,400	148,055	149,916	151,791	153,148	154,217	155,903	157,210	158,308	159,311	160,087	160,802	167,796	170,155	170,341	170,466	170,594
	2	149,506	152,974	154,796	156,658	157,970	159,043	160,760	162,060	163,184	164,152	164,980	165,699	172,910	175,832	176,087	176,188	176,405
	3	146,012	149,316	151,074	152,925	154,169	155,215	156,877	158,167	159,244	160,224	160,979	161,721	168,875	171,730	171,987	172,065	172,233
	4	148,471	151,934	153,686	155,449	156,728	157,763	159,405	160,729	161,824	162,785	163,590	164,192	171,532	174,469	174,756	174,829	174,990
	5	146,872	150,118	151,877	153,666	154,962	155,995	157,658	158,978	160,059	161,016	161,818	162,542	169,680	172,325	172,594	172,676	172,827
	6	148,676	151,963	153,748	155,562	156,852	157,921	159,548	160,864	161,967	162,971	163,775	164,459	171,726	174,495	174,788	174,881	175,029
HL_wFCC15_0Hid	1	142,458	146,390	148,257	150,296	151,724	152,933	154,669	156,055	157,253	158,276	159,046	159,771	166,742	168,373	168,563	168,682	168,874
	2	157,678	161,707	163,506	165,426	166,815	167,940	169,594	170,948	172,092	173,010	173,853	174,613	182,059	185,816	186,204	186,347	186,554
	3	145,708	149,951	151,792	153,761	155,173	156,387	158,120	159,495	160,666	161,651	162,499	163,276	170,539	172,163	172,385	172,489	172,693
	4	153,791	157,858	159,643	161,541	162,899	164,037	165,735	167,096	168,284	169,311	170,099	170,864	178,542	181,339	181,692	181,760	181,978
	5	155,368	159,363	161,160	163,094	164,440	165,616	167,292	168,617	169,826	170,768	171,653	172,380	179,862	182,852	183,191	183,325	183,546
	6	147,035	151,164	153,037	155,050	156,442	157,668	159,405	160,783	161,963	162,926	163,793	164,556	171,728	173,389	173,630	173,705	173,888

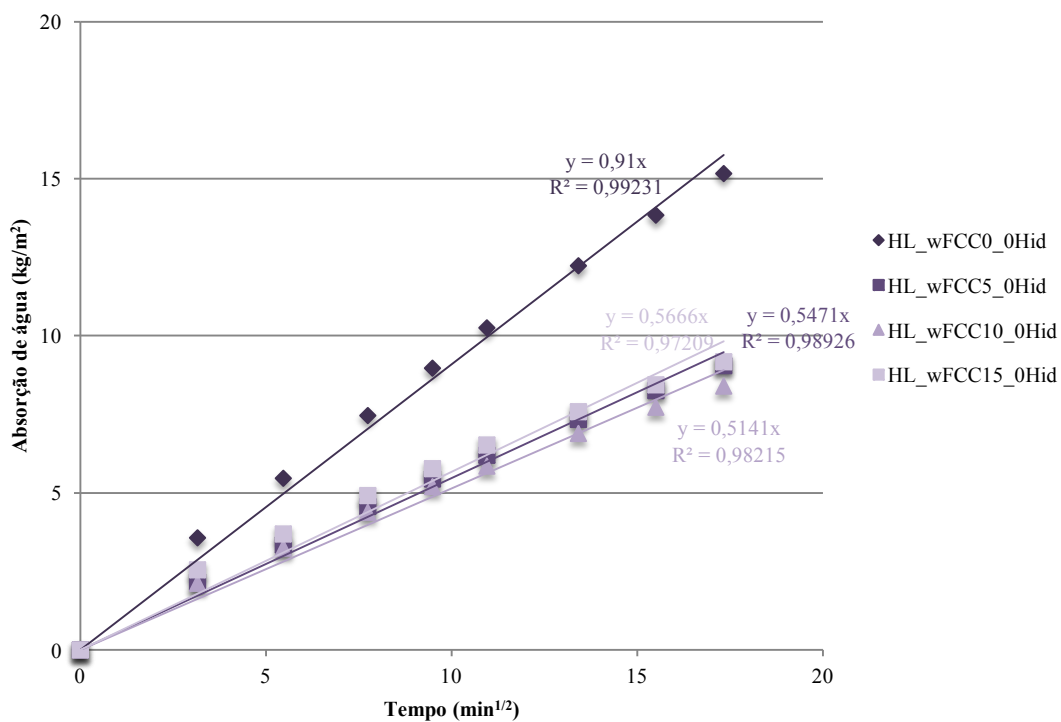
OHID

SÉRIE 0HID – 91 dias de hidratação

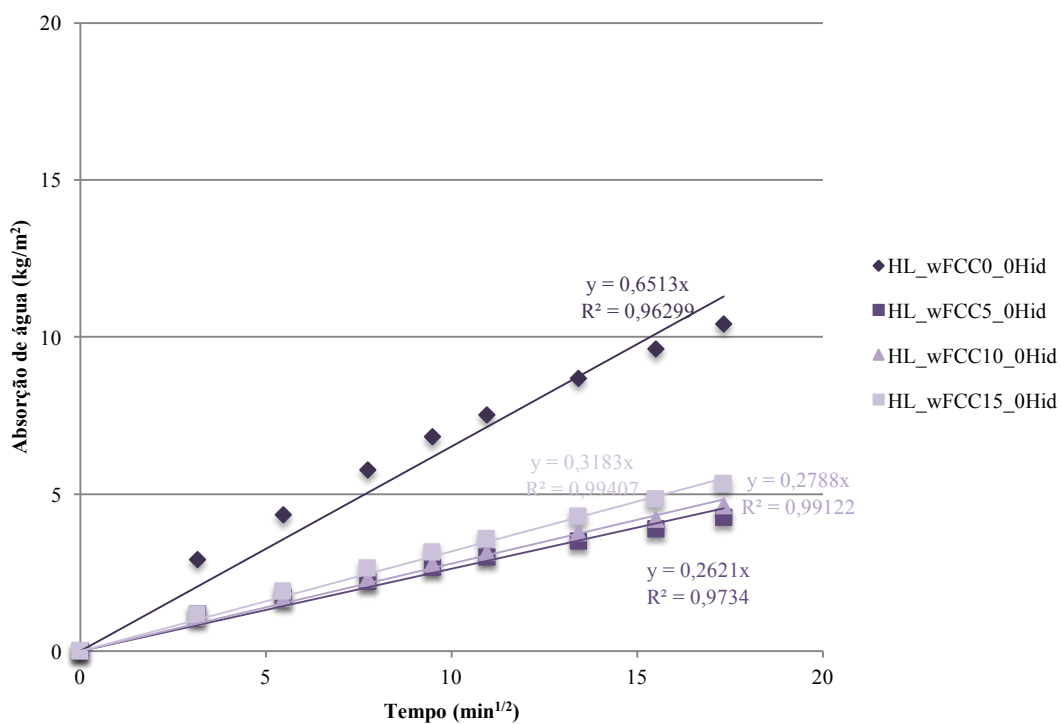
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)																	
			0 min.	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h	48 h	72 h	96 h	168 h	
HL_wFCC0_0Hid		1	150,586	155,306	157,703	160,098	161,856	163,079	165,119	166,695	167,969	169,403	170,678	171,694	175,805	176,285	176,491	176,730	176,869	
		2	147,344	152,501	155,022	157,362	159,045	160,260	162,306	163,844	165,215	166,397	167,638	168,563	172,260	172,734	172,910	173,076	173,314	
		3	144,519	149,030	151,204	153,434	154,974	156,071	157,611	159,026	160,134	161,305	162,303	162,999	168,794	169,477	169,672	169,870	170,082	
		4	147,728	153,069	155,579	158,000	159,745	160,818	162,592	164,057	165,308	166,602	167,795	168,554	173,532	174,160	174,457	174,572	174,906	
		5	146,799	150,876	152,871	155,006	156,666	157,769	159,635	161,215	162,519	163,743	164,917	165,879	171,211	171,716	171,948	172,108	172,344	
		6	152,440	156,544	158,639	160,942	162,600	163,655	165,495	167,015	168,284	169,508	170,702	171,664	177,570	178,392	178,636	178,796	179,019	
HL_wFCC5_0Hid		1	148,387	150,248	151,082	151,942	152,850	153,234	154,029	154,666	155,223	155,810	156,329	156,739	160,718	164,262	166,390	168,055	170,701	
		2	149,670	151,807	152,642	153,538	154,214	154,771	155,687	156,323	156,913	157,485	157,981	158,353	162,628	166,170	168,371	169,950	172,364	
		3	149,925	151,900	152,662	153,462	154,106	154,570	155,448	155,940	156,627	157,124	157,736	158,000	161,928	165,291	167,430	168,955	171,930	
		4	147,762	149,541	150,477	151,199	151,907	152,441	153,196	153,964	154,464	154,945	155,567	155,873	159,548	162,747	164,726	166,256	169,248	
		5	150,351	152,048	152,940	153,751	154,478	155,102	155,782	156,400	156,948	157,466	158,172	158,545	162,298	165,536	167,630	169,170	172,283	
		6	147,453	149,280	150,086	150,946	151,665	152,216	152,942	153,581	154,192	154,771	155,263	155,598	159,434	162,662	164,634	166,055	169,108	
HL_wFCC10_0Hid		1	149,023	150,632	151,516	152,502	153,296	153,822	154,756	155,502	156,141	156,801	157,431	157,792	162,599	166,765	169,313	171,032	173,056	
		2	155,487	157,204	158,200	159,121	159,908	160,482	161,386	162,196	162,808	163,502	164,126	164,455	169,311	173,578	176,203	178,116	180,284	
		3	151,797	153,581	154,515	155,408	156,142	156,694	157,765	158,385	159,008	159,678	160,237	160,517	164,880	168,772	171,151	173,015	176,157	
		4	147,718	149,567	150,404	151,502	152,220	152,759	153,765	154,412	155,113	155,777	156,372	156,831	161,219	165,221	167,510	169,311	171,660	
		5	145,939	147,490	148,636	149,660	150,407	151,038	152,080	152,737	153,480	154,244	154,812	155,198	159,988	164,137	166,497	168,184	169,805	
		6	157,400	159,259	160,204	161,335	162,107	162,655	163,757	164,544	165,276	165,996	166,631	167,154	172,202	176,720	179,576	181,497	183,315	
HL_wFCC15_0Hid		1	151,750	153,564	154,838	156,103	157,000	157,736	158,943	159,890	160,718	161,519	162,291	162,764	169,307	175,046	176,526	176,936	177,076	
		2	159,692	161,581	162,891	164,171	165,045	165,771	167,017	167,994	168,862	169,690	170,395	171,004	177,884	183,982	186,431	186,730	186,826	
		3	154,205	156,012	157,086	158,170	158,975	159,650	160,714	161,546	162,312	163,066	163,660	164,197	169,866	175,057	178,122	179,656	180,321	
		4	153,996	155,947	157,073	158,287	159,011	159,714	160,828	161,703	162,404	163,151	163,725	164,133	169,758	174,582	177,261	179,063	180,000	
		5	155,710	157,545	158,652	159,748	160,536	161,178	162,269	163,160	163,891	164,629	165,285	165,784	171,465	176,460	179,378	181,396	182,075	
		6	151,902	153,829	154,912	156,007	156,870	157,478	158,599	159,342	160,161	160,870	161,508	162,025	167,774	172,719	175,546	176,973	177,362	

IIIH

Retas de ajuste capilar - 28 dias de hidratação



Retas de ajuste capilar - 91 dias de hidratação



D.6 – SECAGEM

SÉRIE S/ADJUVANTES – 28 dias de hidratação

		ENSAIO DE SECAGEM - 28 dias de hidratação														
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)													
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	9º dia	11º dia	14º dia	16º dia	21º dia	31º dia	36º dia	
HL_wFCC0		1	246,796	244,389	242,648	241,068	239,643	235,346	232,968	230,949	228,496	227,203	224,821	221,824	220,732	
		2	250,607	248,136	246,321	244,688	243,197	238,736	236,277	234,244	231,711	230,381	227,912	224,982	223,929	
		3	253,034	250,924	249,380	247,982	246,701	242,826	240,576	238,581	235,933	234,467	231,601	227,979	226,659	
		4	270,509	268,206	266,568	265,117	263,821	260,003	257,811	255,753	253,045	251,512	248,555	244,555	243,107	
		5	277,978	275,535	273,792	272,220	270,815	266,651	264,275	262,198	259,459	257,968	255,113	251,312	249,905	
		6	270,561	267,885	260,037	264,422	262,986	258,838	256,507	254,365	251,567	250,060	247,154	243,521	242,218	
HL_wFCC5		1	278,746	276,089	274,535	273,203	272,029	268,555	266,604	264,872	262,564	261,266	258,562	254,755	253,149	
		2	244,691	242,308	240,993	239,840	238,811	235,789	234,120	232,661	230,667	229,533	227,257	223,957	222,577	
		3	247,150	244,576	243,256	242,115	241,117	238,151	236,497	235,047	233,072	231,949	229,679	226,319	224,928	
		4	245,105	242,329	240,826	239,535	238,410	235,095	233,280	231,694	229,614	228,492	226,145	222,858	221,503	
		5	277,372	274,758	273,348	272,161	271,102	267,986	266,237	264,658	262,504	261,280	258,713	254,870	253,225	
		6	243,659	241,123	239,721	238,526	237,490	234,441	232,756	231,202	229,117	227,931	225,609	222,291	220,873	
HL_wFCC10		1	264,743	262,086	260,643	259,450	258,388	255,331	253,662	252,080	249,997	248,811	246,439	243,015	241,559	
		2	258,223	255,441	253,892	252,603	251,489	248,314	246,625	245,082	243,058	241,937	239,699	236,485	235,121	
		3	255,559	252,662	251,059	249,734	248,586	245,346	243,610	242,073	240,054	238,926	236,658	233,441	232,086	
		4	264,971	261,936	260,299	258,941	257,745	254,357	252,531	250,977	248,909	247,743	245,423	242,069	240,654	
		5	260,350	256,805	254,896	253,331	251,990	248,221	246,329	244,703	242,637	241,532	239,377	236,387	235,166	
		6	263,234	260,453	258,853	257,504	256,320	252,925	251,105	249,397	247,206	245,999	243,654	240,311	238,924	
HL_wFCC15		1	275,424	271,859	270,328	269,042	267,906	264,618	262,865	261,226	259,099	257,941	255,594	252,251	250,831	
		2	252,646	250,021	248,509	247,232	246,131	243,042	241,419	240,019	238,157	237,141	235,071	232,099	230,811	
		3	250,704	247,539	245,733	244,236	242,974	239,470	237,726	236,230	234,286	233,236	231,179	228,362	227,168	
		4	270,985	267,785	265,984	264,485	263,189	259,557	257,762	256,144	254,086	252,988	250,802	247,718	246,385	
		5	253,393	250,575	248,976	247,651	246,517	243,477	241,894	240,476	238,585	237,533	235,422	232,345	231,012	
		6	277,986	274,814	272,989	271,466	270,158	266,509	264,672	263,039	260,984	259,879	257,726	254,614	253,275	

S/ADJUVANTES

SÉRIE S/ADJUVANTES – 91 dias de hidratação

Série	Argamassa	Amostra	MASSA (g)												
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	8º dia	11º dia	14º dia	21º dia	28º dia		
HL_wFCC0		1	265,862	262,889	260,207	258,114	256,544	253,286	252,414	249,088	247,449	243,872	242,252		
		2	268,119	265,115	262,395	260,255	258,595	255,140	254,234	250,762	249,059	245,400	243,812		
		3	260,676	258,023	255,499	253,524	248,899	248,036	244,742	243,042	239,299	237,565	236,603		
		4	271,521	268,431	265,558	263,296	261,603	258,136	257,221	253,697	251,938	248,185	246,585		
		5	261,143	257,928	255,163	253,063	251,497	248,136	245,851	242,587	241,123	237,944	236,603		
		6	276,216	273,043	270,097	267,769	266,044	262,481	261,520	257,845	256,100	252,431	250,867		
HL_wFCC5		1	270,203	266,482	263,737	261,905	260,543	257,551	256,709	253,235	251,712	248,066	246,422		
		2	264,922	261,135	258,291	256,394	255,038	252,179	251,386	248,235	246,646	243,185	241,586		
		3	267,092	263,001	260,266	258,394	256,995	253,977	253,151	249,813	248,217	244,788	243,216		
		4	271,492	267,775	264,887	262,974	261,612	258,725	256,658	253,803	252,394	249,162	247,659		
		5	264,463	260,846	258,211	256,401	255,043	252,098	251,257	247,984	246,359	242,777	241,135		
		6	270,336	266,969	264,352	262,643	261,417	258,712	257,941	254,843	253,185	249,347	247,465		
HL_wFCC10		1	271,623	268,145	265,292	263,297	261,826	258,745	257,886	254,631	253,116	249,771	248,229		
		2	259,555	256,657	254,113	252,331	251,062	248,368	247,628	244,652	243,135	239,785	238,186		
		3	272,576	269,093	266,141	264,000	262,418	259,130	257,266	254,266	252,913	249,843	248,427		
		4	256,410	253,160	250,320	248,428	247,667	244,214	243,440	240,363	238,789	235,460	234,007		
		5	261,352	257,936	255,200	253,161	251,632	248,417	247,548	244,372	242,960	239,889	238,500		
		6	272,576	269,028	266,143	264,125	262,668	259,637	258,830	255,617	254,125	250,811	249,283		
HL_wFCC15		1	265,300	262,158	259,121	256,958	255,400	252,273	251,448	248,417	247,121	244,253	242,949		
		2	263,818	260,750	257,628	255,424	253,843	250,688	249,831	246,713	245,405	242,486	241,174		
		3	268,304	265,024	262,057	259,911	258,353	255,215	254,377	251,281	249,920	246,906	245,519		
		4	266,001	262,721	259,582	257,431	255,913	252,865	252,059	249,011	247,713	244,784	243,432		
		5	264,152	260,843	257,736	255,530	253,948	250,766	249,944	246,966	245,695	242,832	241,518		
		6	266,546	263,310	260,159	257,949	256,410	253,349	251,655	248,845	247,658	244,900	243,633		

S/ADJUVANTES

SÉRIE HID – 28 dias de hidratação

		ENSAIO DE SECAGEM - 28 dias de hidratação																												
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)																											
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	9º dia	11º dia	14º dia	16º dia	21º dia	31º dia	36º dia															
HL_wFCC0_Hid		1	187,876	185,088	182,934	180,956	179,188	173,903	171,116	168,808	166,076	164,725	162,537	160,881	160,481															
		2	187,925	184,768	182,505	180,535	178,794	173,545	170,751	168,510	165,864	164,558	162,388	160,650	160,219															
		3	170,115	166,386	163,644	161,298	159,274	153,806	151,428	149,575	146,608	145,350	144,743	144,560	144,560															
		4	175,296	172,524	170,517	168,749	167,157	162,434	159,781	157,510	154,815	153,469	151,255	149,679	149,307															
		5	172,495	169,902	168,057	166,450	165,006	160,778	158,338	156,091	153,299	151,898	149,444	147,372	146,878															
		6	188,125	185,482	183,574	181,897	180,405	175,992	173,428	170,993	168,042	166,519	163,831	161,286	160,663															
HL_wFCC5_Hid		1	176,794	174,969	173,522	172,203	170,993	167,222	165,685	163,174	160,766	159,474	157,033	154,147	153,221															
		2	175,526	173,487	171,917	170,496	169,184	165,286	163,100	161,180	158,839	157,586	155,165	152,545	151,737															
		3	176,483	174,592	173,176	171,892	170,727	167,191	165,188	163,363	161,034	159,788	157,394	154,406	153,364															
		4	171,224	169,306	167,835	166,490	165,272	161,603	159,574	157,716	155,381	154,134	151,822	149,119	148,204															
		5	172,012	170,034	168,500	167,083	165,805	161,915	159,728	157,771	155,369	154,097	151,759	149,230	148,445															
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-														
HL_wFCC10_Hid		1	175,280	173,238	171,518	169,934	168,485	164,117	161,763	159,706	157,226	155,962	153,727	151,450	150,694															
		2	176,941	174,522	172,566	170,772	169,168	164,496	162,155	160,183	157,841	156,659	154,594	152,584	151,924															
		3	177,999	175,974	174,373	172,945	171,658	167,856	165,759	163,838	161,423	160,164	157,779	154,920	153,913															
		4	178,730	176,767	175,209	173,819	172,574	168,806	166,687	164,778	162,354	161,059	158,643	155,704	154,674															
		5	171,456	169,176	167,366	165,755	164,306	159,966	157,738	155,867	153,610	152,451	150,380	148,127	147,373															
		6	181,036	178,724	176,873	175,179	173,649	169,020	166,737	164,792	162,430	161,227	159,031	156,608	155,769															
HL_wFCC15_Hid		1	179,559	177,251	175,398	173,703	172,183	167,732	165,477	163,573	161,245	160,066	157,913	155,517	154,659															
		2	170,030	167,691	165,797	164,066	162,513	158,060	156,026	154,347	152,296	151,267	149,370	147,229	146,447															
		3	186,214	184,236	182,716	181,324	180,051	176,210	174,005	172,010	169,573	168,267	165,837	162,825	161,698															
		4	167,539	165,386	163,705	162,175	160,796	156,738	154,719	153,059	151,009	149,952	147,942	145,561	144,671															
		5	181,631	179,258	177,383	175,672	174,122	169,615	167,327	165,454	163,187	162,023	159,887	157,460	156,576															
		6	169,853	167,711	166,024	164,442	163,018	158,875	156,677	154,917	152,806	151,717	149,620	147,281	146,417															

III

SÉRIE HID – 91 dias de hidratação

ENSAIO DE SECAGEM - 91 dias de hidratação													
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)										
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	8º dia	11º dia	14º dia	21º dia	28º dia
HL_wFCC0_Hid		1	181,013	179,469	177,374	175,362	173,726	170,306	169,343	165,685	164,091	160,787	159,534
		2	180,446	178,644	176,330	174,221	172,526	168,983	167,994	164,288	162,677	159,390	158,251
		3	182,340	180,628	178,260	176,040	174,256	170,540	169,492	165,688	164,136	160,949	159,858
		4	176,433	174,309	171,412	168,806	166,773	162,696	161,636	158,095	156,856	154,221	153,568
		5	186,604	184,974	182,657	180,436	178,641	174,904	173,863	169,994	168,431	165,158	163,987
		6	174,226	172,311	169,788	167,515	165,717	162,042	161,050	157,523	156,134	153,242	152,321
HL_wFCC5_Hid		1	172,176	170,280	167,543	165,055	163,189	159,638	158,739	155,499	154,326	151,703	150,834
		2	189,094	187,084	184,188	181,538	179,545	175,679	174,726	171,294	169,970	167,072	166,015
		3	174,880	173,008	170,453	168,009	166,166	162,599	160,921	157,954	156,832	154,280	153,412
		4	187,338	185,352	182,623	180,092	178,160	174,414	173,465	170,123	168,809	165,921	164,840
		5	173,040	171,128	168,461	165,936	163,997	160,252	159,296	156,052	154,816	152,131	151,282
		6	189,449	187,526	184,744	182,084	180,034	175,959	174,883	171,279	169,888	166,870	165,811
HL_wFCC10_Hid		1	187,917	186,086	183,514	181,159	179,336	175,578	174,549	170,711	169,285	166,296	165,206
		2	185,921	183,964	181,183	178,660	176,754	172,890	171,872	168,256	166,893	164,006	162,950
		3	192,756	190,713	187,824	185,238	183,265	179,346	178,310	174,607	173,257	170,399	169,321
		4	187,454	185,473	182,665	180,110	178,132	174,163	173,120	169,449	168,048	165,143	164,122
		5	196,797	194,738	191,946	189,455	187,528	183,613	182,593	178,830	177,351	174,289	173,088
		6	184,165	182,167	179,559	177,191	175,340	171,582	169,675	166,379	165,121	162,376	161,361
HL_wFCC15_Hid		1	192,260	190,116	187,320	184,833	182,871	178,799	177,690	173,669	172,204	169,217	168,090
		2	182,409	180,398	177,751	175,333	173,444	169,549	168,491	164,605	163,101	160,092	159,010
		3	192,747	190,823	188,216	185,829	183,939	179,883	178,733	174,402	172,755	169,545	168,355
		4	183,305	181,256	178,355	175,687	173,657	169,534	168,435	164,682	163,356	160,581	159,625
		5	193,431	191,463	188,721	186,252	184,330	180,293	179,169	175,006	173,476	170,419	169,274
		6	183,053	180,767	177,567	174,691	172,520	168,244	166,406	163,132	162,040	158,296	157,054

III

SÉRIE 0.5HID -28 dias de hidratação

ENSAIO DE SECAGEM - 28 dias de hidratação													
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)										
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	9º dia	14º dia	24º dia	29º dia	
HL_wFCC0_5Hid		1	179,069	173,555	169,763	166,522	163,576	158,209	156,268	153,987	153,244	153,143	
		2	182,740	177,180	173,347	170,204	167,322	161,981	160,004	157,398	156,176	155,996	
		3	178,426	173,080	169,347	166,268	163,460	158,265	156,336	153,845	152,748	152,591	
		4	181,160	175,398	171,654	168,630	165,898	160,532	158,533	155,990	154,856	154,691	
		5	179,312	173,562	169,421	166,192	163,345	158,258	156,376	153,997	153,064	152,935	
		6	175,178	169,348	165,443	162,225	159,363	154,322	152,542	150,467	149,838	149,757	
HL_wFCC5_5Hid		1	180,276	174,113	170,801	168,353	166,250	162,027	160,242	157,500	155,421	155,004	
		2	180,134	173,978	170,655	168,215	166,096	161,867	160,076	157,394	155,333	154,939	
		3	181,394	175,686	172,581	170,203	168,147	163,999	162,210	159,382	157,014	156,514	
		4	178,781	172,786	169,602	167,199	165,120	160,907	159,126	156,377	154,160	153,708	
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	178,500	172,829	169,629	167,164	165,039	160,774	159,021	156,324	154,274	153,875	
HL_wFCC10_5Hid		1	176,819	170,923	167,548	165,046	162,892	158,613	156,830	154,140	151,980	151,466	
		2	171,580	165,704	162,206	159,638	157,478	153,283	151,591	149,067	147,294	146,908	
		3	176,433	170,678	167,443	165,005	162,930	158,809	157,092	154,400	152,037	151,428	
		4	170,904	165,112	161,718	159,187	157,054	152,960	151,276	148,732	146,876	146,467	
		5	172,832	167,241	163,835	161,334	159,193	155,020	153,270	150,598	148,553	148,099	
		6	177,828	172,305	168,987	166,506	164,326	160,053	158,270	155,521	153,160	152,595	
HL_wFCC15_5Hid		1	177,476	172,084	168,784	166,369	164,300	160,137	158,410	155,704	153,272	152,596	
		2	176,169	170,932	167,746	165,374	163,382	159,250	157,557	154,875	152,320	151,566	
		3	176,654	171,003	167,774	165,409	163,385	159,268	157,589	154,945	152,558	151,842	
		4	177,379	171,694	168,378	166,028	164,028	160,036	158,375	155,764	153,291	152,514	
		5	178,615	173,031	169,664	167,270	165,239	161,200	159,516	156,881	154,419	153,706	
		6	174,558	169,409	166,138	163,821	161,831	157,837	156,188	153,595	151,084	150,345	

011510

SÉRIE 0.5HID -91 dias de hidratação

ENSAYO DE SECAGEM - 91 dias de hidratação		Massa (g)																	
Série	Argamassa	Amostra	0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	8º dia	11º dia	14º dia	21º dia	28º dia	0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia
HL_wFCC0_5Hid		1	182,690	180,227	177,300	175,039	172,399	168,853	167,914	165,243	163,410	161,571	159,766	182,690	180,227	177,300	175,039	172,399	168,853
		2	180,021	178,691	176,992	173,858	171,308	164,060	162,137	160,161	158,317	156,317	154,668	180,021	178,691	176,992	173,858	171,308	167,839
		3	178,201	175,926	173,230	171,158	168,689	165,355	164,416	161,677	159,793	157,866	156,035	178,201	175,926	173,230	171,158	168,689	165,355
		4	178,328	176,061	173,464	171,448	169,063	165,704	164,773	161,924	159,961	157,924	156,063	178,328	176,061	173,464	171,448	169,063	165,704
		5	182,829	178,713	175,863	173,763	171,373	168,188	167,313	164,715	162,934	161,208	159,496	182,829	178,713	175,863	173,763	171,373	168,188
		6	180,395	177,993	175,863	173,056	170,480	166,950	165,979	163,074	161,129	159,160	157,360	180,395	177,993	175,863	173,056	170,480	166,950
HL_wFCC5_5Hid		1	173,998	171,633	169,197	167,484	165,507	162,634	161,820	159,165	157,181	154,947	152,953	173,998	171,633	169,197	167,484	165,507	
		2	177,842	173,472	170,504	168,648	166,687	164,042	163,278	160,976	159,283	157,415	155,585	177,842	173,472	170,504	168,648	166,687	
		3	176,299	173,582	170,892	168,988	166,831	163,873	163,027	160,497	158,641	156,592	154,668	176,299	173,582	170,892	168,988	166,831	
		4	174,402	171,665	169,107	167,252	165,113	162,148	161,307	158,756	156,833	154,737	152,796	174,402	171,665	169,107	167,252	165,113	
		5	173,176	170,430	167,783	165,958	163,880	160,906	160,079	157,428	155,551	153,490	151,585	173,176	170,430	167,783	165,958	163,880	
		6	173,010	170,277	167,599	165,759	163,631	160,769	159,920	157,395	155,629	153,590	151,735	173,010	170,277	167,599	165,759	163,631	
HL_wFCC10_5Hid		1	179,695	176,855	173,906	171,816	169,447	166,269	165,350	162,598	160,710	158,803	156,908	179,695	176,855	173,906	171,816	169,447	
		2	181,920	179,283	176,640	174,786	172,561	169,354	168,424	165,511	163,382	161,112	159,066	181,920	179,283	176,640	174,786	172,561	
		3	177,938	175,072	172,135	170,065	167,688	164,493	163,577	160,883	159,017	157,087	155,205	177,938	175,072	172,135	170,065	167,688	
		4	183,448	179,338	176,503	174,589	172,466	169,542	168,690	166,153	164,282	162,298	160,357	183,448	179,338	176,503	174,589	172,466	
		5	180,573	177,592	174,614	172,485	170,118	166,938	166,030	163,340	161,453	159,477	157,549	180,573	177,592	174,614	172,485	170,118	
		6	188,043	185,148	182,126	180,000	177,525	174,194	173,263	170,332	168,410	166,313	164,309	188,043	185,148	182,126	180,000	177,525	
HL_wFCC15_5Hid		1	178,346	175,196	172,200	170,141	167,850	164,647	163,724	161,035	159,188	157,338	155,481	178,346	175,196	172,200	170,141	167,850	
		2	180,991	178,041	175,130	173,122	170,827	167,678	166,778	164,014	162,088	160,095	158,166	180,991	178,041	175,130	173,122	170,827	
		3	178,518	175,302	172,021	169,747	167,229	163,997	163,093	160,535	158,817	157,112	155,306	178,518	175,302	172,021	169,747	167,229	
		4	179,255	176,429	173,539	171,485	169,103	165,891	164,985	162,245	160,340	158,350	156,414	179,255	176,429	173,539	171,485	169,103	
		5	174,710	170,359	166,875	164,757	162,501	159,609	158,804	156,514	154,910	153,270	151,490	174,710	170,359	166,875	164,757	162,501	
		6	176,498	173,626	170,651	168,583	166,178	162,970	162,102	159,355	157,483	155,551	153,630	176,498	173,626	170,651	168,583	166,178	

0.5HID

SÉRIE 0HID – 28 dias de hidratação

ENSAIO DE SECAGEM – 28 dias de hidratação												
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)									
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	9º dia	14º dia	24º dia	29º dia
HL_wFCC0_0Hid		1	176,207	170,743	166,007	163,491	160,567	154,959	152,714	149,956	148,464	148,295
		2	181,938	176,642	172,614	169,436	166,447	160,396	158,120	155,145	153,951	153,803
		3	180,208	175,083	170,876	167,177	164,493	158,182	155,922	152,995	151,666	151,513
		4	178,981	173,865	169,840	166,697	163,460	157,300	155,084	152,152	151,063	150,957
		5	178,886	174,157	170,442	167,544	164,659	158,557	156,128	152,828	151,102	150,893
		6	177,664	172,925	169,400	166,534	163,726	158,055	155,782	152,373	150,503	150,279
HL_wFCC5_0Hid		1	166,061	161,649	158,594	156,124	153,919	149,611	147,834	145,077	142,880	142,454
		2	185,194	180,494	177,231	174,409	172,072	167,591	165,731	162,797	160,337	159,833
		3	171,515	167,608	164,833	162,442	160,222	155,784	153,847	150,850	148,231	147,636
		4	183,119	178,821	175,822	173,178	170,748	166,068	164,134	161,145	158,794	158,249
		5	170,445	166,401	163,508	161,001	158,712	154,194	152,295	149,354	147,135	146,718
		6	178,962	175,053	172,220	169,756	167,525	162,721	160,651	157,416	154,797	154,277
HL_wFCC10_0Hid		1	170,594	166,221	163,169	160,605	158,334	153,835	152,035	149,325	147,455	147,050
		2	176,405	172,047	168,963	166,327	163,989	159,375	157,523	154,718	152,637	152,170
		3	172,233	168,004	165,095	162,652	160,502	156,147	154,365	151,583	149,324	148,782
		4	174,990	170,488	167,277	164,561	162,261	157,855	156,069	153,373	151,447	151,021
		5	172,827	168,904	166,088	163,673	161,511	157,192	155,394	152,571	150,201	149,637
		6	175,029	171,122	168,273	165,847	163,710	159,351	157,520	154,630	152,140	151,536
HL_wFCC15_0Hid		1	168,874	164,491	161,378	158,931	156,851	152,769	151,100	148,478	146,151	145,516
		2	186,554	181,925	178,673	176,043	173,783	169,271	167,406	164,491	161,854	161,103
		3	172,693	168,548	165,564	163,046	160,871	156,510	154,698	151,898	149,477	148,802
		4	181,978	177,963	174,976	172,404	170,172	165,717	163,846	160,898	158,085	157,254
		5	183,546	179,385	176,240	173,552	171,198	166,655	164,799	161,929	159,413	158,702
		6	173,888	169,839	166,806	164,242	162,014	157,533	155,709	152,945	150,695	150,101

0HID

SÉRIE 0HID – 91 dias de hidratação

ENSAIO DE SECAGEM - 91 dias de hidratação													
Série	Argamassa	Amostra	Massa (g)										
			0 dia	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	7º dia	8º dia	11º dia	14º dia	21º dia	28º dia
HL_wFCC0_0Hid		1	176,869	174,174	170,705	168,025	165,001	161,120	160,087	157,180	155,248	153,670	152,351
		2	173,314	169,266	165,949	163,472	160,666	157,002	155,991	153,226	151,396	150,134	148,941
		3	170,082	167,355	163,909	161,361	158,487	154,661	153,574	150,670	148,677	147,277	146,025
		4	174,906	172,662	169,775	167,630	165,090	161,393	160,315	157,101	154,602	152,170	150,441
		5	172,344	169,802	166,729	164,365	161,674	157,927	156,855	153,974	151,864	150,082	148,635
		6	179,019	176,714	174,036	171,813	169,260	165,371	164,279	161,030	158,649	156,475	154,845
HL_wFCC5_0Hid		1	170,701	168,719	166,160	164,252	162,159	159,258	158,416	155,933	154,107	152,338	150,829
		2	172,364	170,306	167,570	165,569	163,436	160,438	159,595	157,062	155,213	153,485	152,003
		3	171,930	168,528	166,095	164,404	162,599	160,034	159,263	157,027	155,311	153,727	152,308
		4	169,248	167,710	165,466	163,721	161,800	158,956	158,118	155,617	153,733	151,938	150,407
		5	172,283	170,727	168,591	166,918	165,063	162,292	161,470	158,937	156,959	154,972	153,345
		6	169,108	167,507	165,355	163,694	161,812	158,970	158,141	155,644	153,835	151,855	150,286
HL_wFCC10_0Hid		1	173,056	171,139	168,717	166,905	164,851	162,018	161,166	158,371	156,341	154,205	152,492
		2	180,284	178,493	176,133	174,313	172,283	169,269	168,360	165,480	163,251	160,929	159,135
		3	176,157	174,285	171,814	169,885	167,741	164,568	163,643	160,843	158,821	156,850	155,238
		4	171,660	169,888	167,507	165,667	163,635	160,633	159,750	157,047	154,979	152,890	151,222
		5	169,805	166,509	164,182	162,483	160,618	157,865	157,057	154,616	152,760	150,899	149,331
		6	183,315	181,524	179,080	177,174	175,011	171,766	170,866	168,038	165,714	163,266	161,486
HL_wFCC15_0Hid		1	177,076	175,347	173,137	171,492	169,593	166,899	165,995	162,955	160,678	158,189	156,351
		2	186,826	184,715	182,093	180,147	177,943	174,729	173,775	170,926	168,631	166,284	164,468
		3	180,321	176,947	174,537	172,827	170,841	167,935	167,057	164,584	162,500	160,369	158,698
		4	180,000	178,307	176,073	174,359	172,376	169,444	168,536	165,741	163,464	161,058	159,214
		5	182,075	180,210	177,878	176,118	174,098	171,054	170,161	167,319	165,027	162,605	160,761
		6	177,362	175,626	173,358	171,521	169,653	166,623	165,765	163,080	160,878	158,555	156,695

0HID

D.7 – PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA

SÉRIE S/ADJUVANTES

ENSAIO - PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA															
Série	Argamassa	Amostra	Tempo (min.)	28 dias			91 dias			28 dias			91 dias		
				Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Tempo (min.)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	
HL _w FCC0	HL _w FCC10	1	1	0,4	0,4	0,7	0,7		1	0,6	0,6	0,3	0,3		
			2	0,7	0,3	1,2	0,5		2	1,1	0,5	0,6	0,3		
			3	0,9	0,3	1,4	0,2		3	1,6	0,5	0,8	0,2		
		2	1	1,1	1,1	0,7	0,7		1	0,6	0,6	0,3	0,3		
			2	1,9	0,8	1,3	0,6		2	1,1	0,5	0,5	0,2		
			3	2,6	0,7	1,8	0,5		3	1,6	0,5	0,7	0,2		
	3	1	0,6	0,6	0,6	0,6		1	0,5	0,5	0,2	0,2			
		2	0,9	0,3	1,0	0,4		2	0,8	0,4	0,4	0,2			
		3	1,2	0,3	1,4	0,4		3	1,2	0,4	0,5	0,1			
		4	1	0,8	0,8	0,4	0,4		1	0,4	0,4	0,2	0,2		
			2	1,2	0,4	0,5	0,1		2	0,7	0,4	0,4	0,2		
			3	1,6	0,4	0,7	0,2		3	1,0	0,3	0,5	0,1		
HL _w FCCS	HL _w FCC15	1	1	0,4	0,4	0,3	0,3		1	0,5	0,5	0,2	0,2		
			2	0,7	0,3	0,5	0,2		2	0,8	0,3	0,4	0,2		
			3	1,2	0,5	0,7	0,2		3	1,1	0,3	0,6	0,2		
		2	1	0,3	0,3	0,2	0,2		1	0,6	0,6	0,3	0,3		
			2	0,6	0,3	0,3	0,1		2	1,0	0,4	0,4	0,1		
			3	0,8	0,2	0,5	0,2		3	1,5	0,5	0,7	0,3		
	3	1	0,4	0,4	0,2	0,2		1	0,8	0,8	0,4	0,4			
		2	0,7	0,3	0,4	0,2		2	1,5	0,7	0,6	0,2			
		3	1,0	0,3	0,5	0,1		3	2,2	0,7	0,9	0,3			
		4	1	0,4	0,4	-	-		1	1,0	1,0	1,1	1,1		
			2	0,7	0,3	-	-		2	1,8	0,8	1,8	0,7		
			3	1,0	0,3	-	-		3	2,4	0,6	2,4	0,6		

S/ADJUVANTES

SÉRIE HID

ENSAIO - PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA																
Série	Argamassa	Amostra	Tempo (min.)	28 dias			91 dias			Argamassa	Amostra	Tempo (min.)	28 dias		91 dias	
				Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)				Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)		
HID	HL _w FCC0 _{HID}	1	1	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1	0,3	0,3	0,2	0,2	
			2	1,0	0,5	0,7	0,3	0,3	0,5		0,2	0,4	0,2			
			3	1,4	0,4	1,0	0,3	0,3	0,7		0,2	0,5	0,1			
		2	1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3				
			2	0,6	0,3	0,4	0,2	0,2	1,0	0,4	0,6	0,3				
			3	0,7	0,2	0,8	0,4	0,4	1,4	0,4	0,9	0,3				
	3	1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2					
		2	0,5	0,2	0,3	0,1	0,1	0,6	0,2	0,5	0,3					
		3	0,6	0,2	0,4	0,1	0,1	0,8	0,2	0,6	0,1					
	4	1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4					
		2	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1	1,1	0,5	0,7	0,3					
		3	0,8	0,2	0,4	0,1	0,1	1,5	0,5	0,9	0,2					
HID	HL _w FCC5 _{HID}	1	1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1,0	1,0	0,7	0,7	
			2	0,7	0,3	0,4	0,2	0,2	1,7		0,7	1,3	0,6			
			3	1,0	0,3	0,5	0,1	0,1	2,2		0,6	1,7	0,4			
		2	1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4				
			2	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	1,8	0,7	0,8	0,4				
			3	0,6	0,1	0,4	0,1	0,1	2,7	0,9	1,1	0,3				
	3	1	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4					
		2	0,8	0,4	0,4	0,2	0,2	-	-	0,8	0,4					
		3	1,1	0,3	0,6	0,2	0,2	-	-	1,1	0,3					
	4	1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4					
		2	0,6	0,3	0,5	0,2	0,2	1,5	0,6	0,9	0,5					
		3	0,8	0,2	0,6	0,1	0,1	2,0	0,5	1,3	0,4					

SÉRIE 0.5HID

ENSAIO - PERMEABILIDADE À ÁGUA LÍQUIDA																			
Série	Argamassa	Amostra	Tempo (min.)	28 dias			91 dias			28 dias			91 dias						
				Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Tempo (min.)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)	Valor medido (cm ³)	Delta Permeabilidade (cm ³)					
0.5HID	HL _w FCC0 ₅ HID	1	1	0,8	0,8	0,3	0,3	1	1,0	1,0	0,6	0,6	1	1,0	1,0	0,6	0,6		
			2	1,5	0,7	0,6	0,3	2	1,7	0,7	1,0	0,4	1,0	0,4	2	1,7	0,7	1,0	0,4
			3	1,9	0,5	0,9	0,3	3	2,3	0,6	1,4	0,4	1,4	0,4	3	2,3	0,6	1,4	0,4
		2	1	0,6	0,6	0,3	0,3	1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1	1,2	1,2	1,0	1,0	
			2	1,0	0,4	0,5	0,2	2	1,6	0,4	1,6	0,6	1,6	0,6	2	1,6	0,4	1,6	0,6
			3	1,3	0,4	0,7	0,2	3	2,0	0,4	2,0	0,4	2,0	0,4	3	2,0	0,4	2,0	0,4
		3	1	0,9	0,9	0,3	0,3	1	1,8	1,8	1,2	1,2	1,2	1	1,8	1,8	1,2	1,2	
			2	1,6	0,7	0,5	0,2	2	2,5	0,7	1,8	0,6	1,8	0,6	2	2,5	0,7	1,8	0,6
			3	2,1	0,5	0,7	0,2	3	3,0	0,5	2,3	0,5	2,3	0,5	3	3,0	0,5	2,3	0,5
		4	1	-	-	0,4	0,4	1	-	-	2,2	2,2	2,2	1	-	-	2,2	2,2	
			2	-	-	0,7	0,3	2	-	-	3,2	3,2	3,2	2	-	-	3,2	3,2	
			3	-	-	1,0	0,3	3	-	-	3,9	3,9	3,9	3	-	-	3,9	3,9	
0.5HID	HL _w FCC10 ₅ HID	1	1	0,8	0,8	0,4	0,4	1	1,5	1,5	0,8	0,8	1	1,5	1,5	0,8	0,8		
			2	1,3	0,6	0,7	0,3	2	2,2	0,8	1,3	0,5	1,3	0,5	2	2,2	0,8	1,3	0,5
			3	1,7	0,4	0,9	0,2	3	2,8	0,6	1,8	0,5	1,8	0,5	3	2,8	0,6	1,8	0,5
		2	1	1,2	1,2	0,5	0,5	1	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	1	0,9	0,9	0,7	0,7	
			2	2,1	0,9	0,9	0,4	2	1,5	0,6	1,1	0,4	1,1	0,4	2	1,5	0,6	1,1	0,4
			3	2,7	0,6	1,2	0,3	3	1,8	0,4	1,5	0,4	1,5	0,4	3	1,8	0,4	1,5	0,4
		3	1	0,9	0,9	0,4	0,4	1	1,2	1,2	0,6	0,6	0,6	1	1,2	1,2	0,6	0,6	
			2	1,5	0,7	0,8	0,4	2	1,9	0,7	1,0	0,4	1,0	0,4	2	1,9	0,7	1,0	0,4
			3	1,9	0,4	1,1	0,3	3	2,4	0,5	1,4	0,4	1,4	0,4	3	2,4	0,5	1,4	0,4
		4	1	0,7	0,7	-	-	1	2,0	2,0	0,8	0,8	0,8	1	2,0	2,0	0,8	0,8	
			2	1,2	0,5	-	-	2	2,9	0,9	1,4	0,6	1,4	0,6	2	2,9	0,9	1,4	0,6
			3	1,6	0,4	-	-	3	3,5	0,6	1,9	0,6	1,9	0,6	3	3,5	0,6	1,9	0,6

D.8 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF)

SÉRIE S/ADJUVANTES

ENSAIO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF)						
			28 dias		91 dias	
Série	Argamassa	Amostra	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)
S/ADJUVANTES	HL_wFCC0	1	0,17	<u>0,1</u>	0,17	<u>0,1</u>
		2	0,21		0,21	
		3	0,11		0,11	
		4	0,09		0,09	
		5	0,12		0,12	
		6	0,22		0,22	
		7	0,22		0,22	
		8	0,11		0,11	
		9	0,19		0,19	
		10	0,01		0,01	
S/ADJUVANTES	HL_wFCC5	1	0,04	<u>0,1</u>	0,04	<u>0,1</u>
		2	0,13		0,13	
		3	0,10		0,10	
		4	0,06		0,06	
		5	0,05		0,05	
		6	0,07		0,07	
		7	0,07		0,07	
		8	0,05		0,05	
		9	0,02		0,02	
		10	0,09		0,09	
S/ADJUVANTES	HL_wFCC10	1	0,01	<u>0,1</u>	0,01	<u>0,1</u>
		2	0,03		0,03	
		3	0,03		0,03	
		4	0,04		0,04	
		5	0,23		0,23	
		6	0,02		0,02	
		7	0,03		0,03	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	
S/ADJUVANTES	HL_wFCC15	1	0,03	<u>0,0*</u>	0,03	<u>0,0*</u>
		2	0,06		0,06	
		3	0,04		0,04	
		4	0,00		0,00	
		5	0,05		0,05	
		6	-		-	
		7	-		-	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	

*Os valores da tensão média de rotura à tração aparecem zero, porque de acordo com a norma NP EN 1015-12 devem ser calculados com uma aproximação de uma casa decimal.

SÉRIE HID

ENSAIO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF)						
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)
HID	HL_wFCC0_Hid	1	0,00		0,00	
		2	0,01		0,01	
		3	0,06		0,06	
		4	0,01		0,01	
		5	-	0,0*	-	0,0*
		6	-		-	
		7	-		-	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	
HID	HL_wFCC5_Hid	1	0,08		0,08	
		2	0,05		0,05	
		3	0,01		0,01	
		4	0,00		0,00	
		5	0,04	0,0*	0,04	0,0*
		6	0,05		0,05	
		7	0,06		0,06	
		8	0,03		0,03	
		9	0,06		0,06	
		10	0,00		0,00	
HID	HL_wFCC10_Hid	1	0,00		0,00	
		2	0,04		0,04	
		3	0,03		0,03	
		4	0,00		0,00	
		5	0,01	0,0*	0,01	0,0*
		6	0,03		0,03	
		7	0,02		0,02	
		8	0,01		0,01	
		9	0,04		0,04	
		10	-		-	
HID	HL_wFCC15_Hid	1	0,00		0,00	
		2	0,04		0,04	
		3	0,01		0,01	
		4	0,04		0,04	
		5	0,03	0,0*	0,03	0,0*
		6	0,04		0,04	
		7	0,06		0,06	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	

*Os valores da tensão média de rotura à tração aparecem zero, porque de acordo com a norma NP EN 1015-12 devem ser calculados com uma aproximação de uma casa decimal.

SÉRIE 0.5HID

ENSAIO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF)						
Série	Argamassa	Amostra	28 dias		91 dias	
			Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)
0.5HID	HL_wFCC0_0.5Hid	1	0,01		0,12	
		2	0,04		0,10	
		3	0,04		0,11	
		4	0,07		0,10	
		5	0,03	0,0*	0,05	0,1
		6	0,05		0,06	
		7	-		0,08	
		8	-		0,07	
		9	-		-	
		10	-		-	
0.5HID	HL_wFCC5_0.5Hid	1	0,03		0,04	
		2	0,06		0,09	
		3	0,02		0,09	
		4	0,02		0,03	
		5	0,01	0,0*	0,03	0,1
		6	-		0,03	
		7	-		-	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	
0.5HID	HL_wFCC10_0.5Hid	1	0,04		0,01	
		2	0,03		0,04	
		3	0,01		0,01	
		4	0,03		0,02	
		5	-	0,0*	-	0,0*
		6	-		-	
		7	-		-	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	
0.5HID	HL_wFCC15_0.5Hid	1	0,02		0,02	
		2	0,09		0,02	
		3	0,00		0,03	
		4	-		-	
		5	-	0,0*	-	0,0*
		6	-		-	
		7	-		-	
		8	-		-	
		9	-		-	
		10	-		-	

*Os valores da tensão média de rotura à tração aparecem zero, porque de acordo com a norma NP EN 1015-12 devem ser calculados com uma aproximação de uma casa decimal.

SÉRIE OHID

ENSAIO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (PULL-OFF)						
			28 dias		91 dias	
Série	Argamassa	Amostra	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)	Tensão de rotura à tração (MPa)	Tensão média de rotura à tração (MPa)
OHID	HL_wFCC0_0Hid	1	0,01	0,0*	0,09	0,1
		2	0,02		0,10	
		3	0,01		0,04	
		4	0,06		0,04	
		5	0,03		0,08	
		6	0,02		0,06	
		7	0,08		0,12	
		8	0,06		0,07	
		9	0,06		0,08	
		10	-		-	
	HL_wFCC5_0Hid	1	0,05	0,0*	0,04	0,1
		2	0,00		0,03	
		3	0,04		0,11	
		4	0,01		0,11	
		5	0,00		0,11	
		6	0,04		0,05	
		7	0,04		0,02	
		8	0,01		0,02	
		9	0,05		-	
		10	0,05		-	
	HL_wFCC10_0Hid	1	0,10	0,1	0,09	0,1
		2	0,08		0,06	
		3	0,05		0,10	
		4	0,05		0,10	
		5	0,05		0,01	
		6	0,01		0,14	
		7	0,07		0,13	
		8	0,05		0,12	
		9	0,07		-	
		10	0,06		-	
	HL_wFCC15_0Hid	1	0,01	0,0*	0,06	0,1
		2	0,02		0,03	
		3	0,02		0,06	
		4	0,02		0,12	
		5	0,02		0,05	
		6	0,02		0,03	
		7	0,08		0,08	
		8	0,06		0,08	
		9	0,04		-	
		10	-		-	

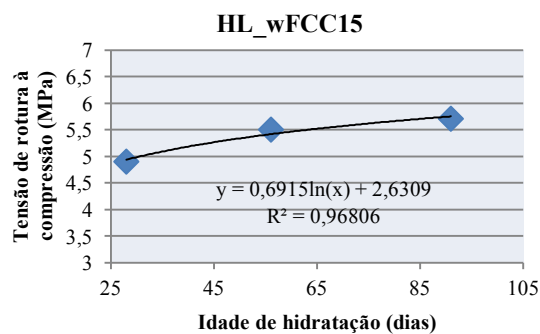
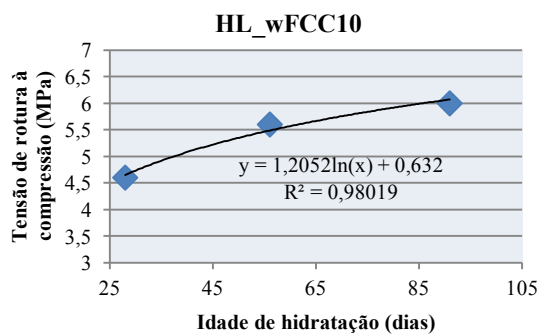
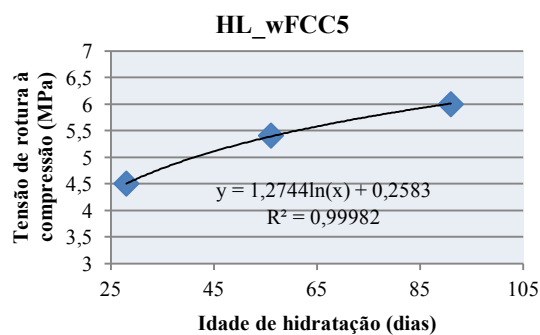
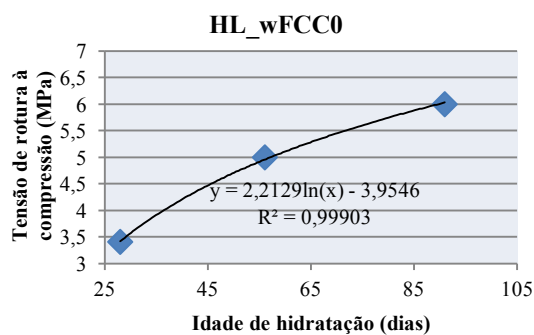
*Os valores da tensão média de rotura à tração aparecem zero, porque de acordo com a norma NP EN 1015-12 devem ser calculados com uma aproximação de uma casa decimal.

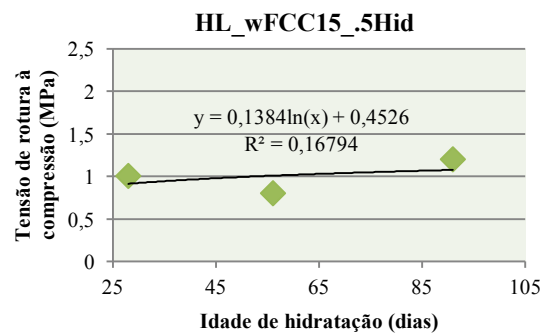
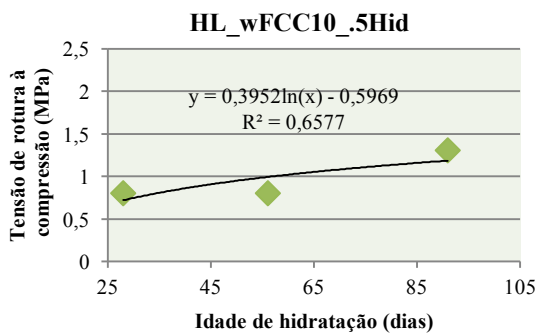
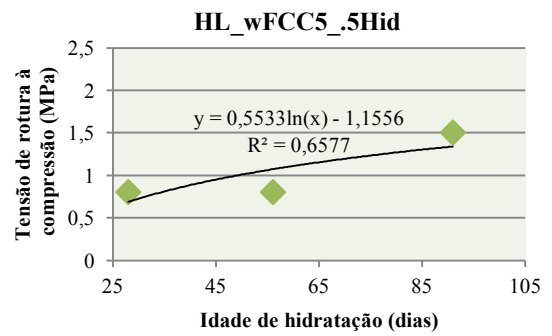
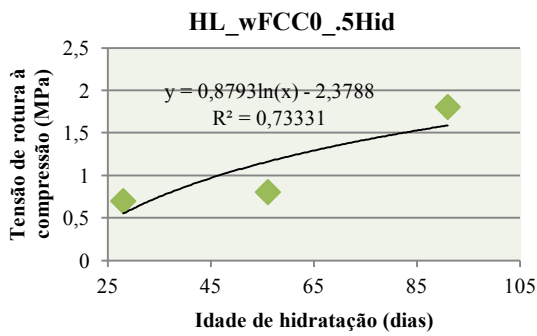
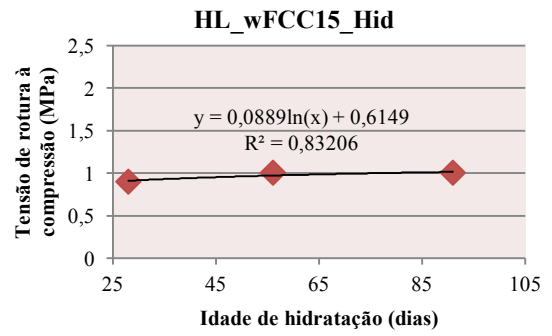
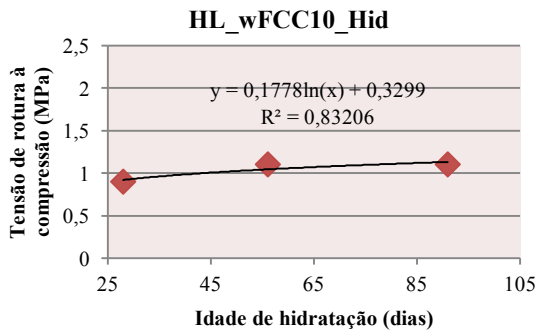
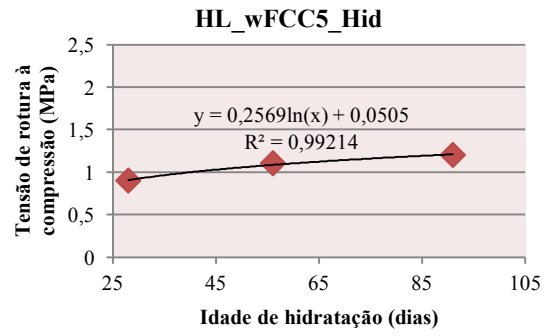
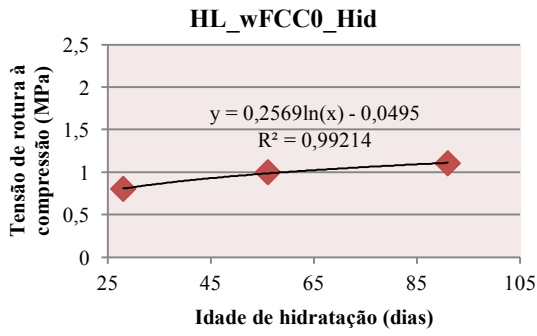
ANEXO E – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS (ESTADO ENDURECIDO)

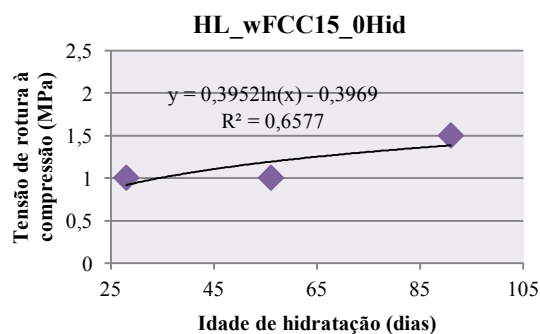
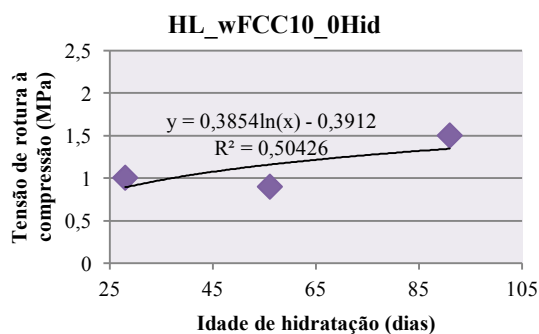
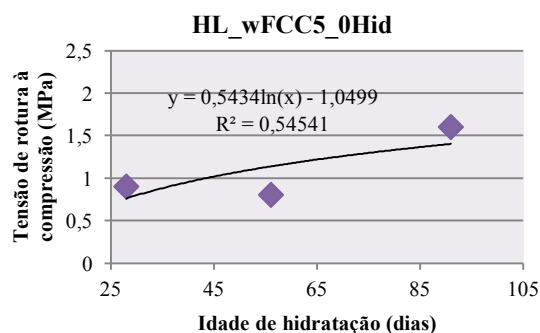
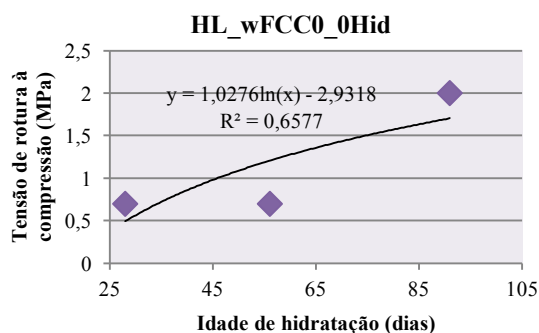
- E.1 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO;
- E.2 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO;
- E.3 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS;
- E.4 – RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E À COMPRESSÃO;
- E.5 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS;
- E.6 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS;
- E.7 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS E O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO.

E.1 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

		Valores médios da tensão de rotura à compressão (MPa)		
Série	Composição	28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0	3,4	5,0	6,0
	HL_wFCC5	4,5	5,4	6,0
	HL_wFCC10	4,6	5,6	6,0
	HL_wFCC15	4,9	5,5	5,7
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,8	1,0	1,1
	HL_wFCC5_Hid	0,9	1,1	1,2
	HL_wFCC10_Hid	0,9	1,1	1,1
	HL_wFCC15_Hid	0,9	1,0	1,0
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,7	0,8	1,8
	HL_wFCC5_.5Hid	0,8	0,8	1,5
	HL_wFCC10_.5Hid	0,8	0,8	1,3
	HL_wFCC15_.5Hid	1,0	0,8	1,2
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,7	0,7	2,0
	HL_wFCC5_0Hid	0,9	0,8	1,6
	HL_wFCC10_0Hid	1,0	0,9	1,5
	HL_wFCC15_0Hid	1,0	1,0	1,5

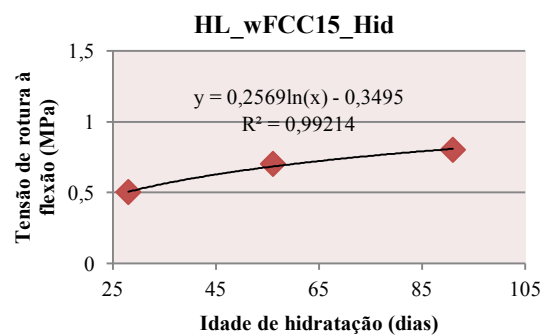
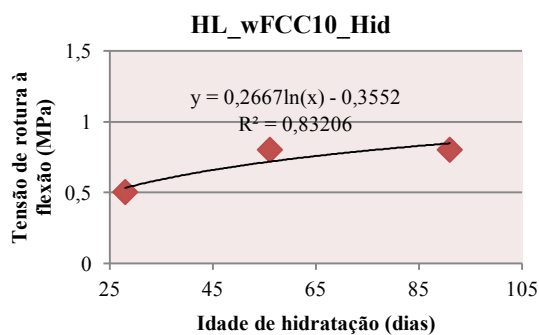
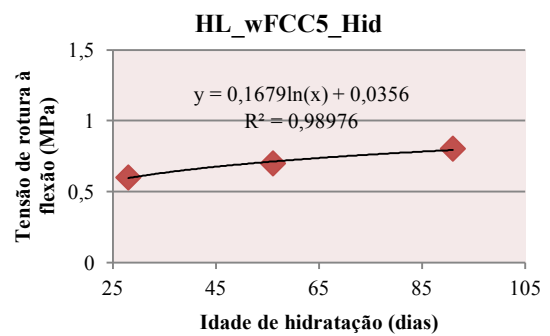
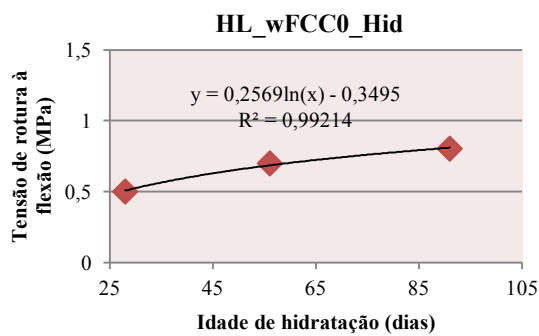
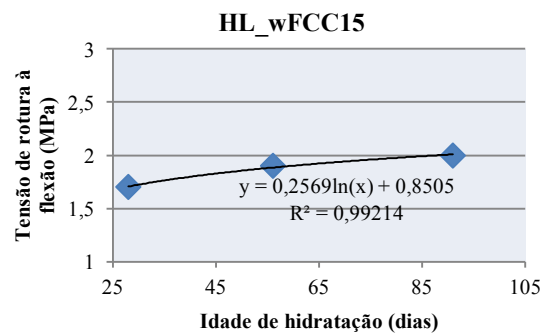
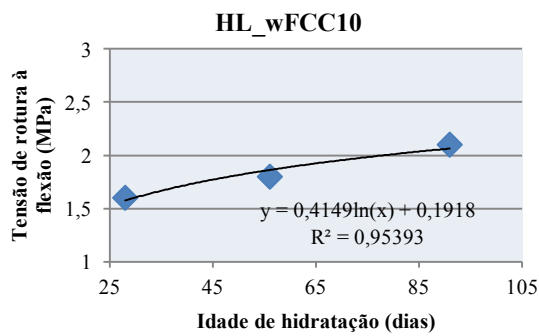
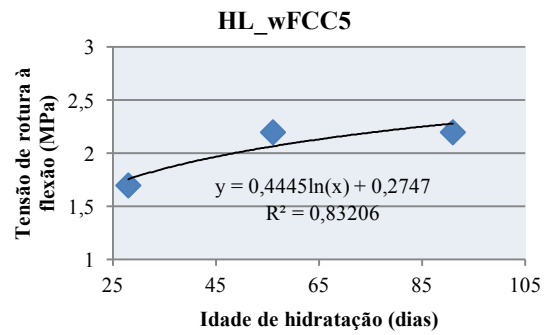
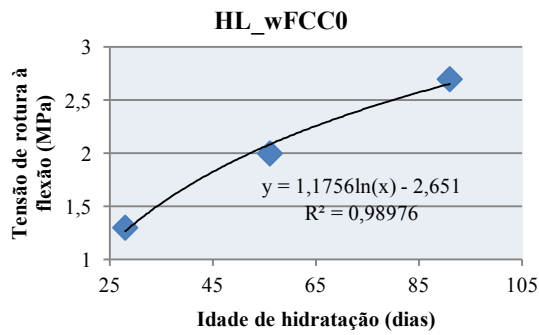


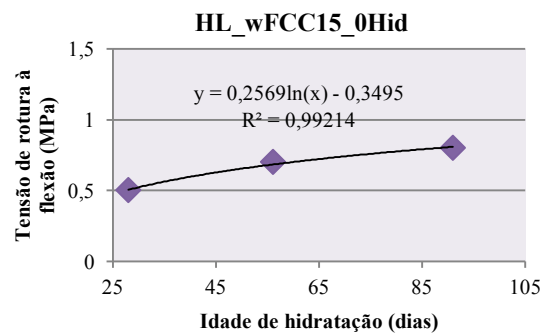
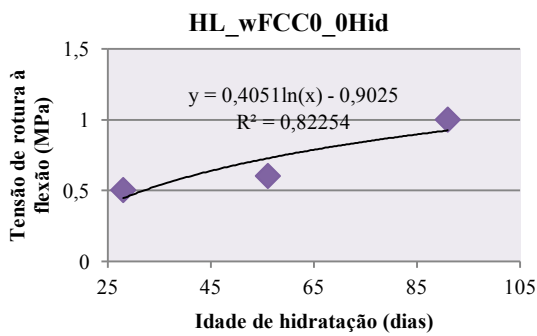
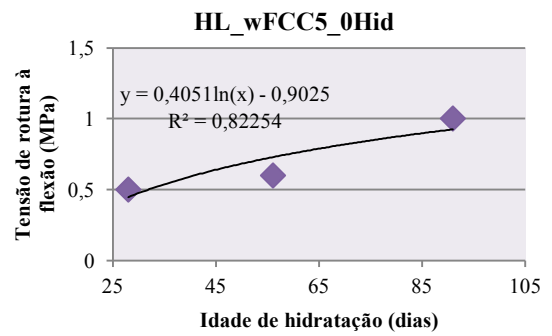
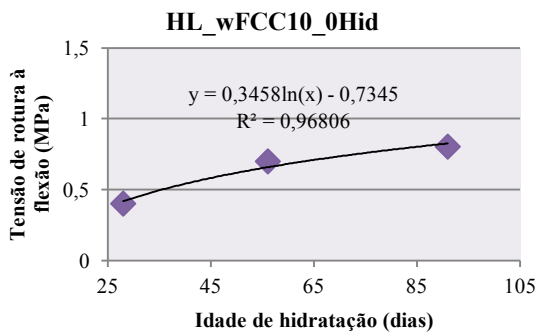
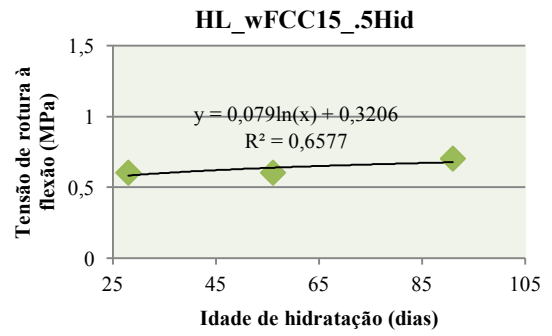
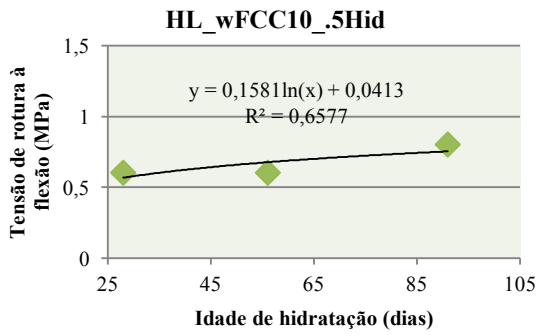
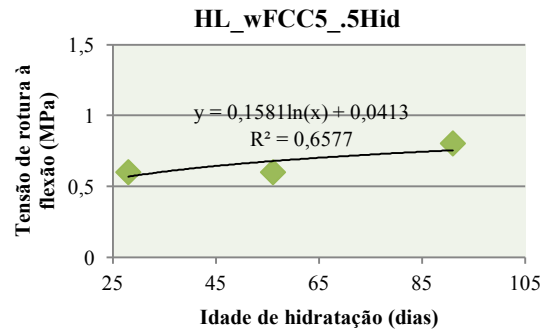
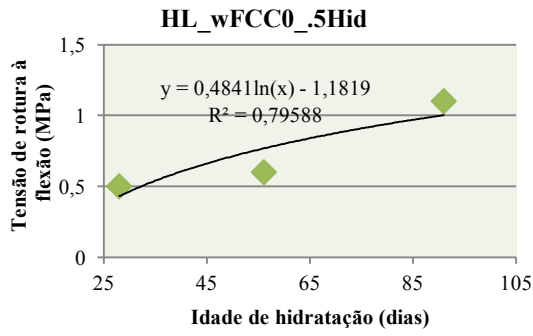




E.2 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO

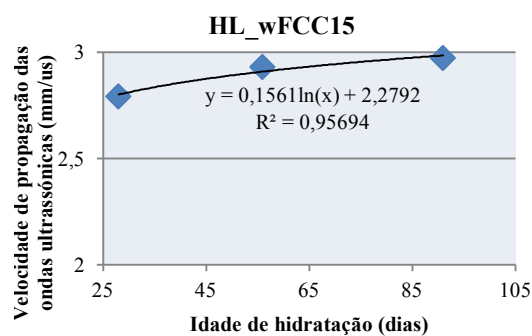
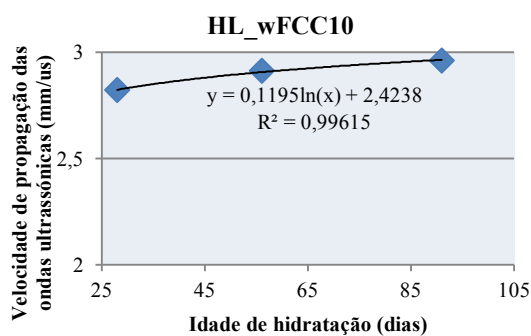
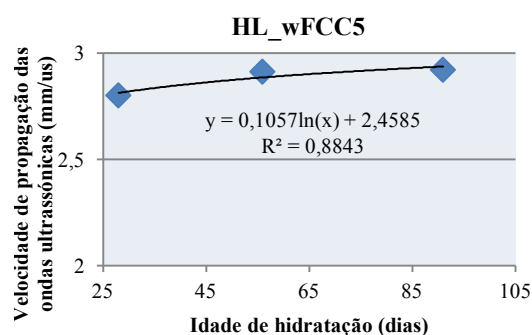
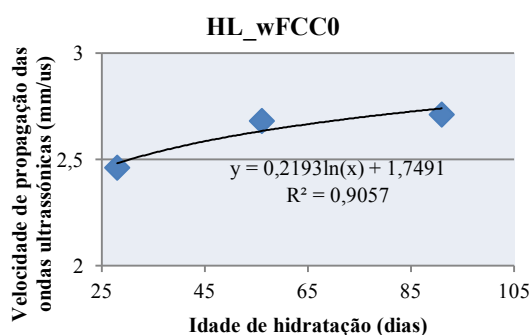
Valores médios da tensão de rotura à flexão (MPa)				
Série	Composição	28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0	1,3	2,0	2,7
	HL_wFCC5	1,7	2,2	2,2
	HL_wFCC10	1,6	1,8	2,1
	HL_wFCC15	1,7	1,9	2,0
Hid	HL_wFCC0_Hid	0,5	0,7	0,8
	HL_wFCC5_Hid	0,6	0,7	0,8
	HL_wFCC10_Hid	0,5	0,8	0,8
	HL_wFCC15_Hid	0,5	0,7	0,8
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	0,5	0,6	1,1
	HL_wFCC5_.5Hid	0,6	0,6	0,8
	HL_wFCC10_.5Hid	0,6	0,6	0,8
	HL_wFCC15_.5Hid	0,6	0,6	0,7
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	0,5	0,6	1,0
	HL_wFCC5_0Hid	0,5	0,6	1,0
	HL_wFCC10_0Hid	0,4	0,7	0,8
	HL_wFCC15_0Hid	0,5	0,7	0,8

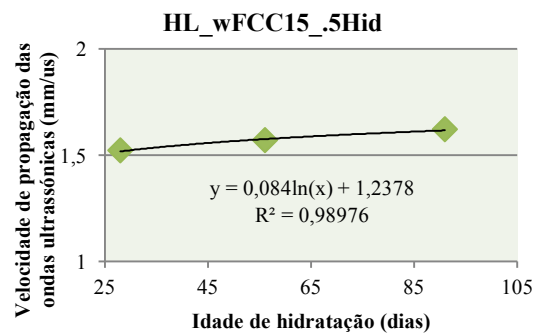
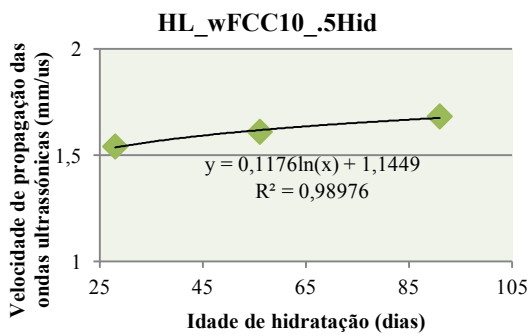
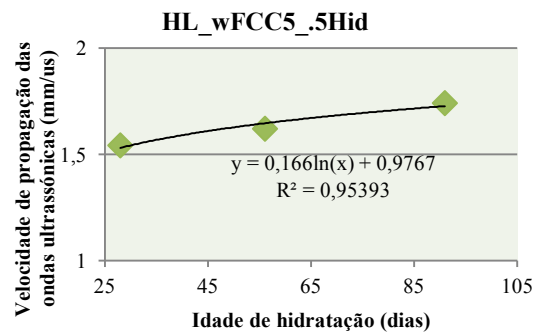
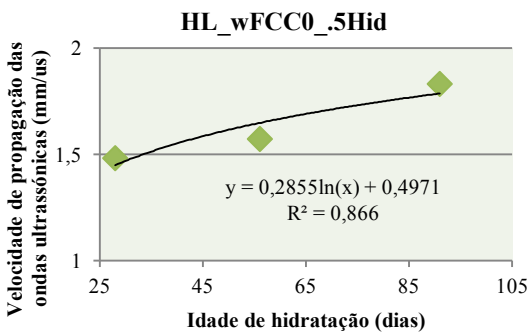
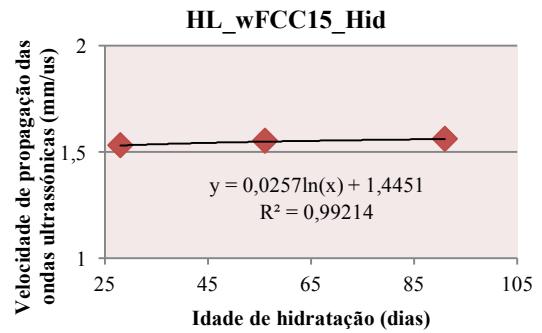
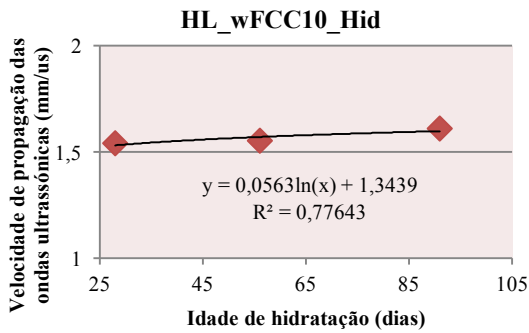
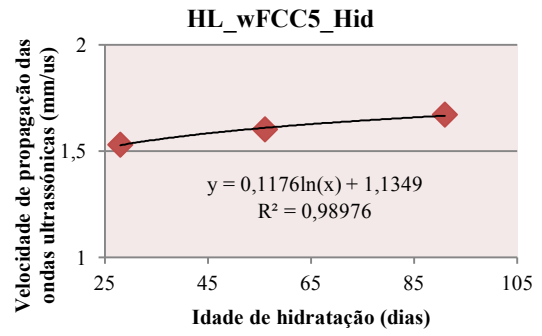
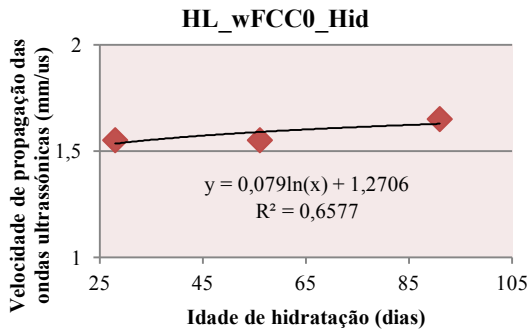


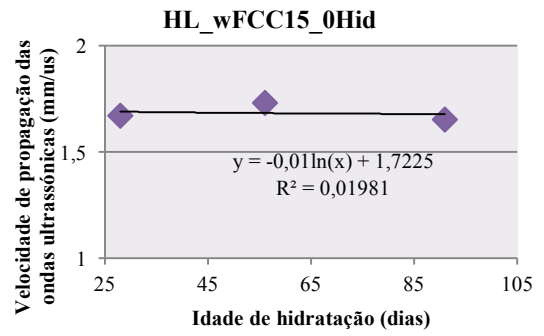
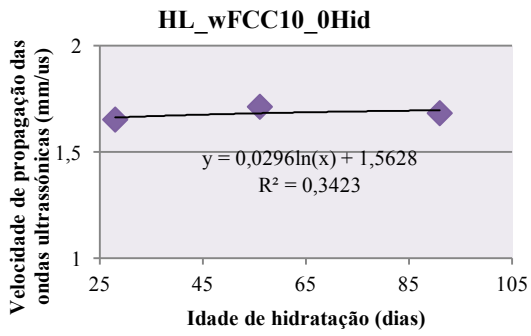
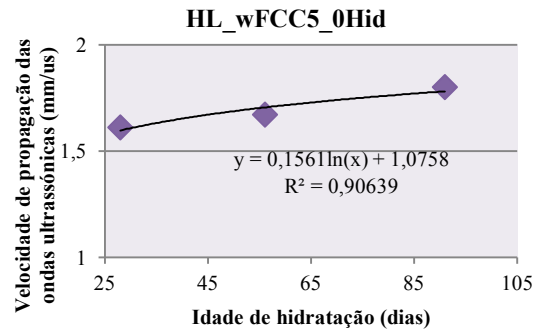
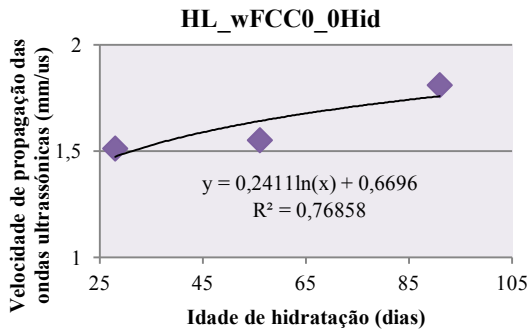


E.3 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

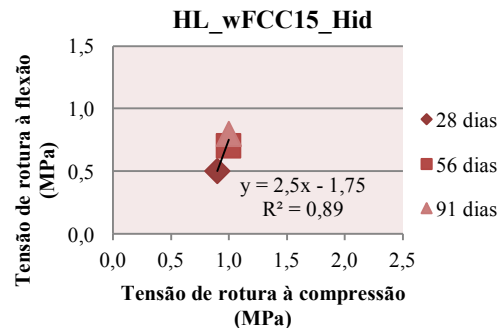
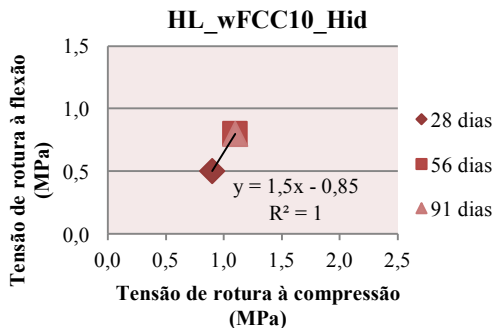
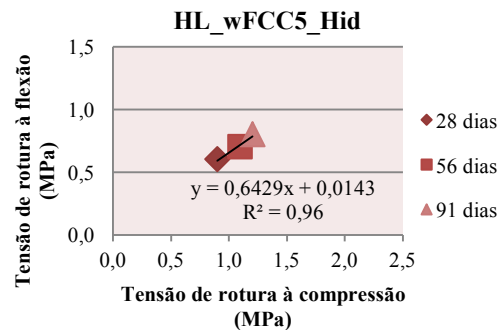
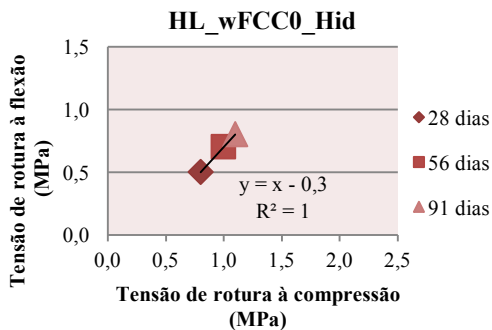
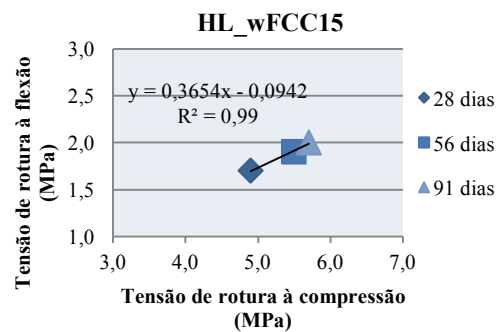
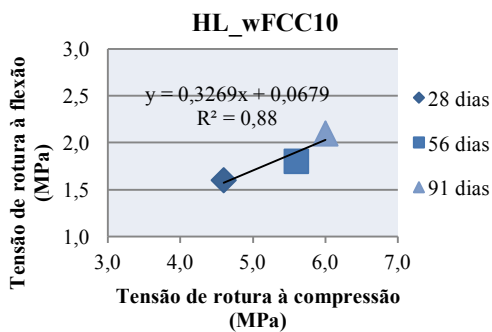
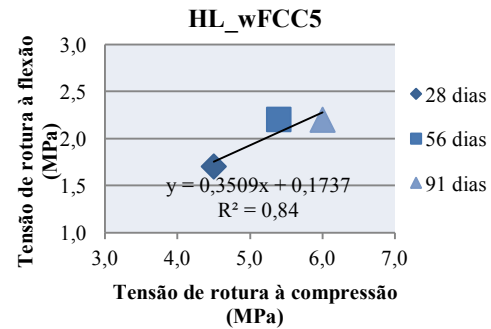
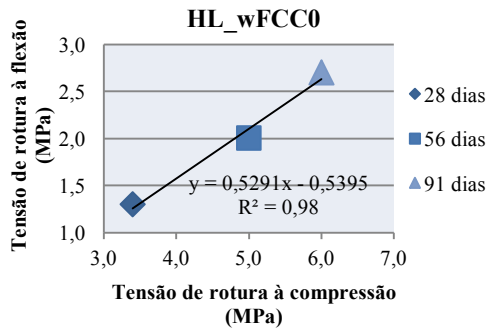
Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (mm/μs)				
Série	Composição	28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0	2,46	2,68	2,71
	HL_wFCC5	2,80	2,91	2,92
	HL_wFCC10	2,82	2,91	2,96
	HL_wFCC15	2,79	2,93	2,97
Hid	HL_wFCC0_Hid	1,55	1,55	1,65
	HL_wFCC5_Hid	1,53	1,60	1,67
	HL_wFCC10_Hid	1,54	1,55	1,61
	HL_wFCC15_Hid	1,53	1,55	1,56
0.5Hid	HL_wFCC0_.5Hid	1,48	1,57	1,83
	HL_wFCC5_.5Hid	1,54	1,62	1,74
	HL_wFCC10_.5Hid	1,54	1,61	1,68
	HL_wFCC15_.5Hid	1,52	1,57	1,62
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	1,51	1,55	1,81
	HL_wFCC5_0Hid	1,61	1,67	1,80
	HL_wFCC10_0Hid	1,65	1,71	1,68
	HL_wFCC15_0Hid	1,67	1,73	1,65

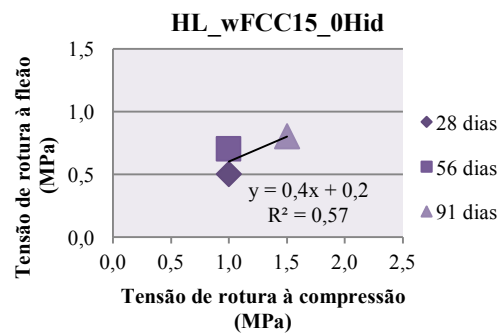
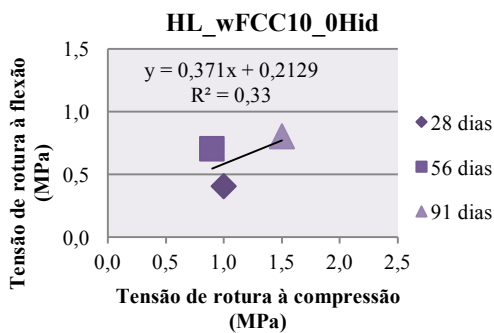
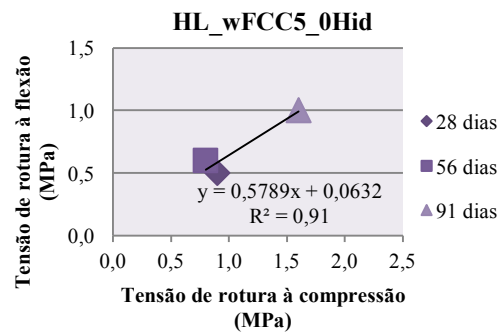
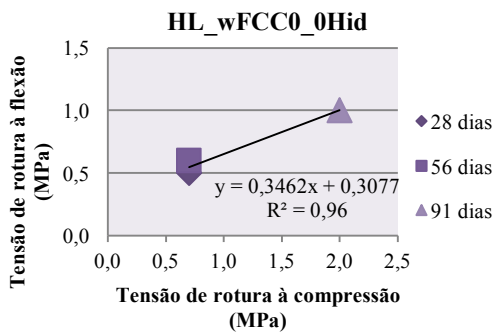
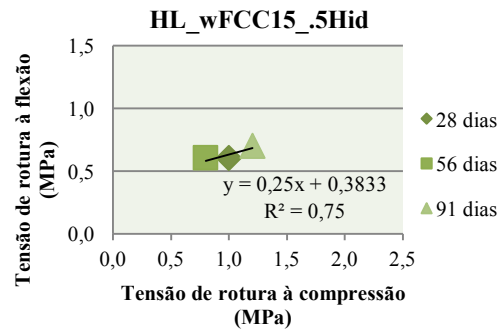
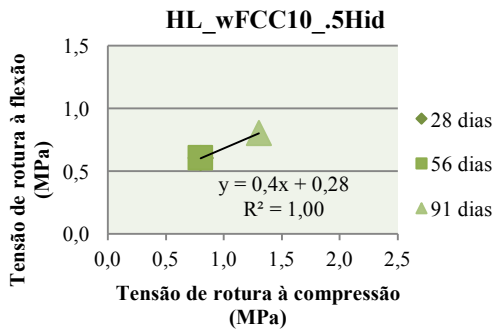
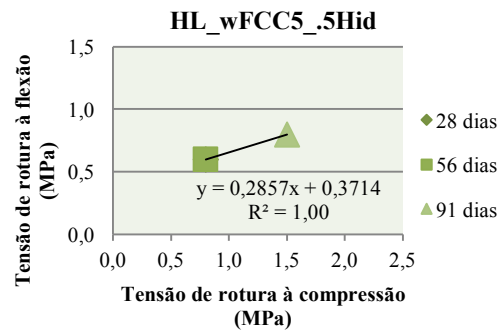
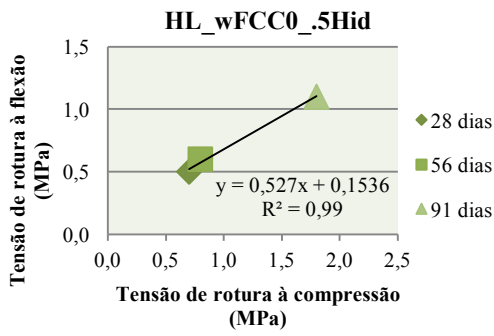




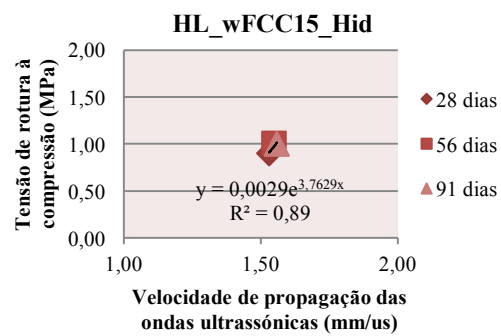
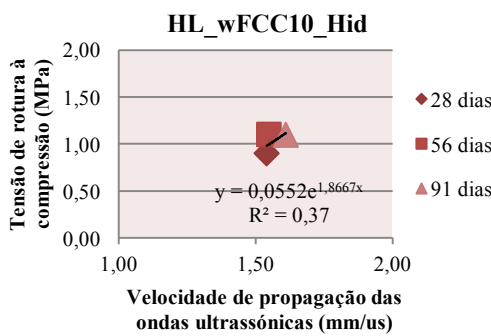
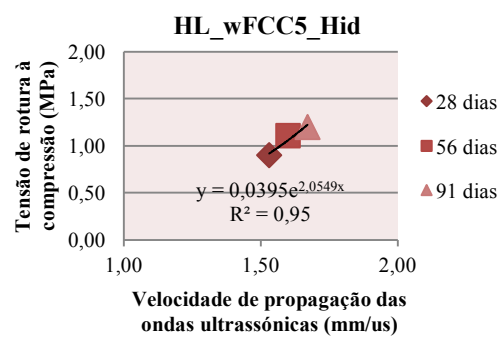
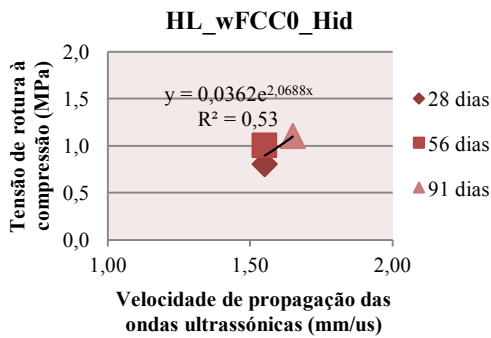
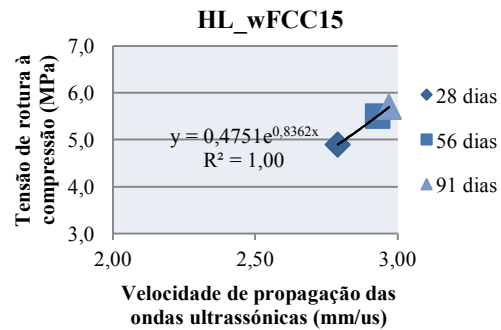
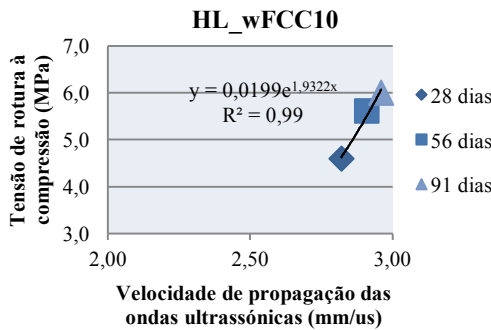
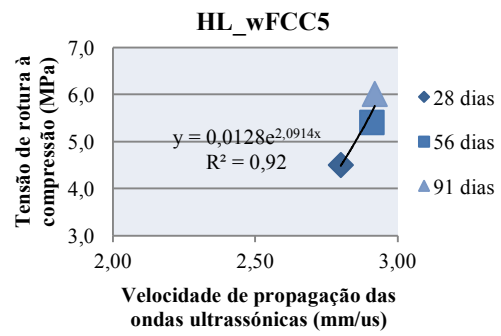
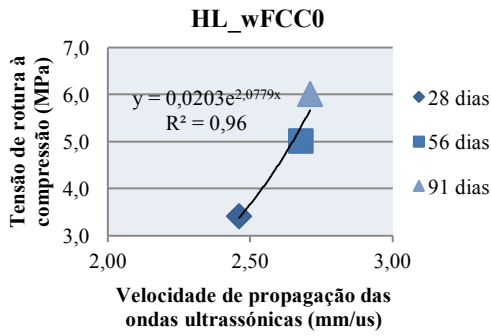


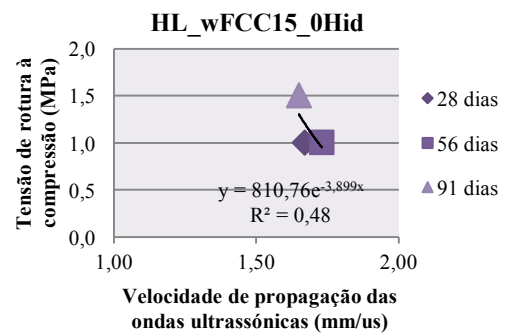
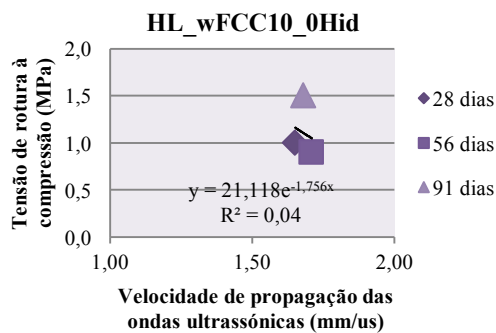
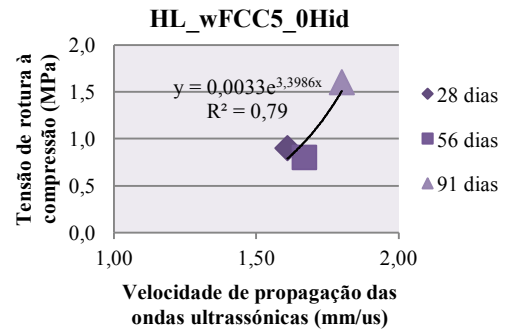
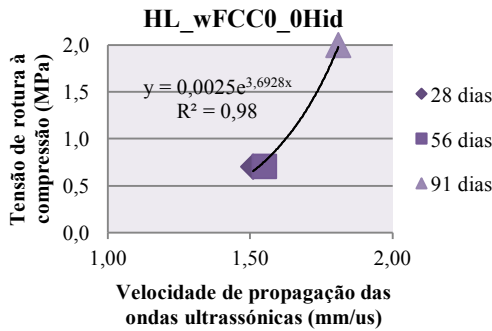
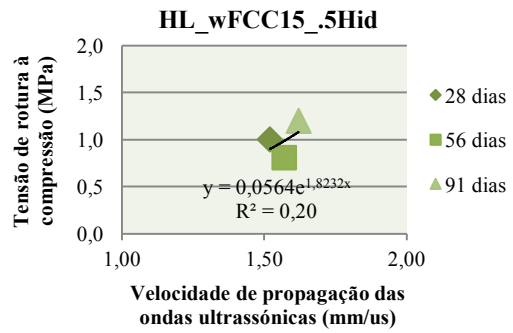
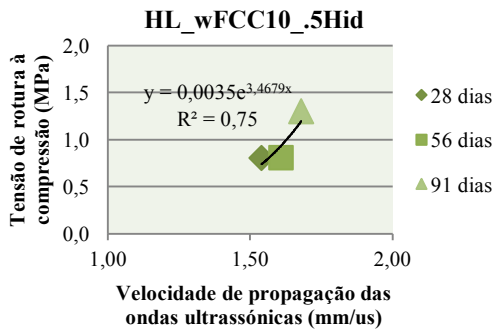
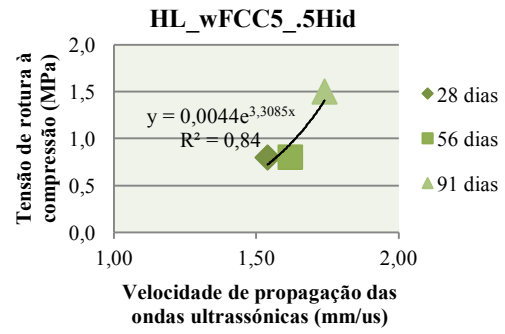
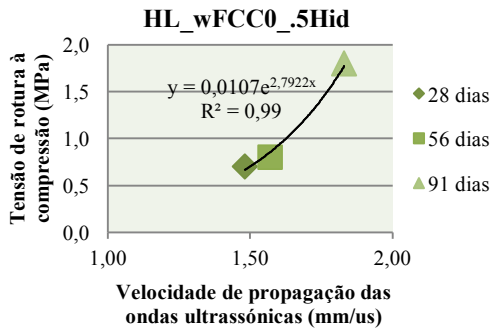
E.4 – RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E À COMPRESSÃO



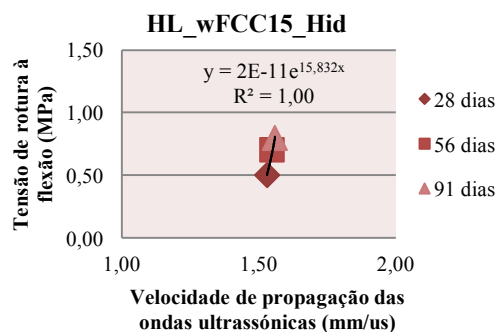
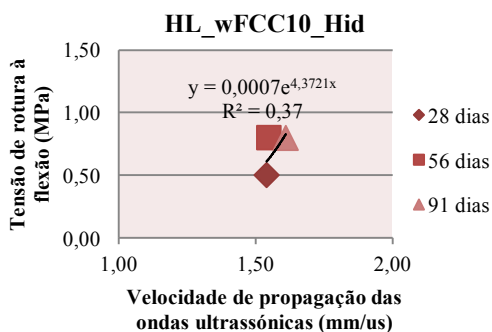
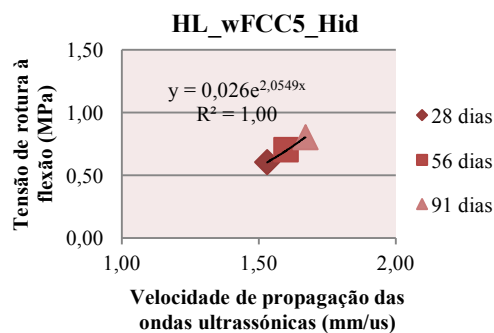
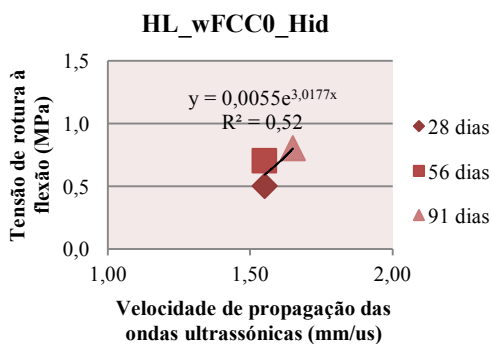
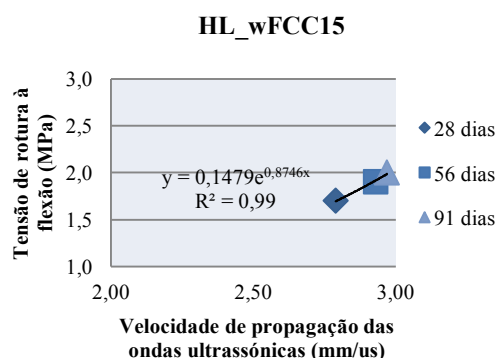
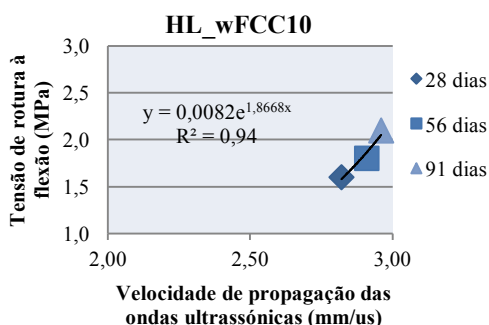
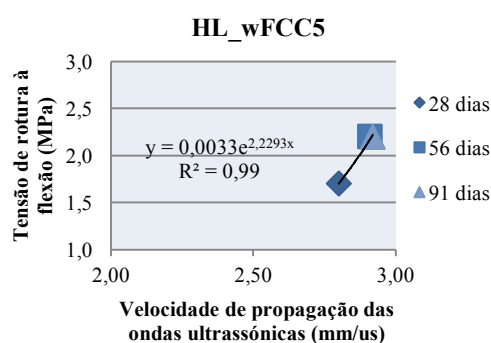
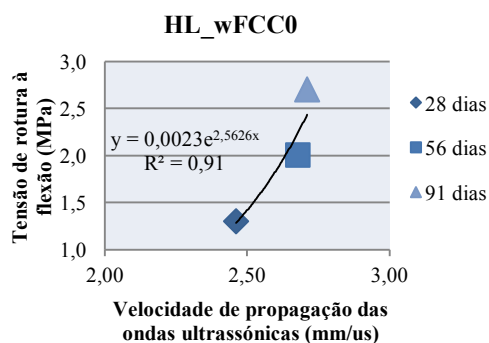


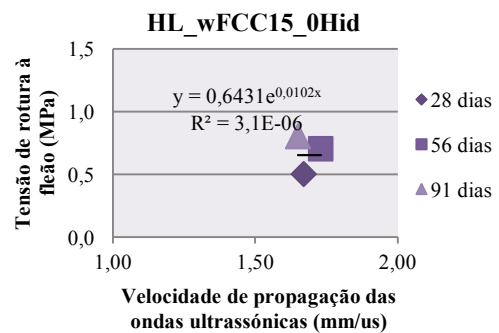
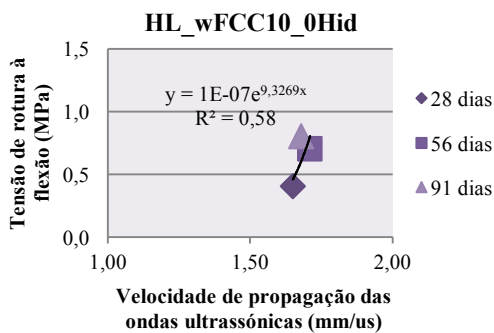
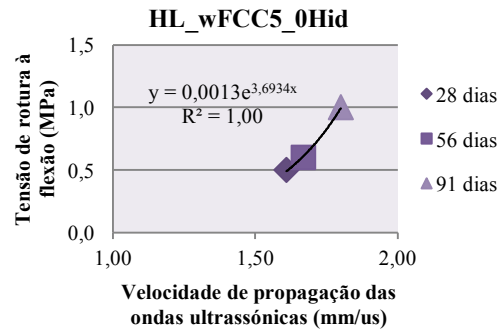
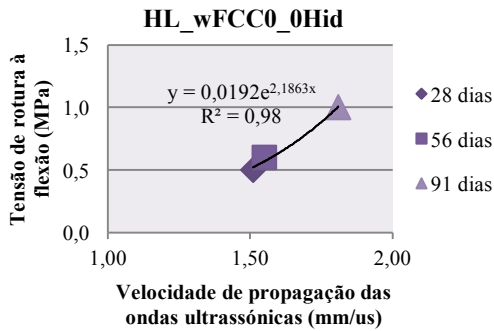
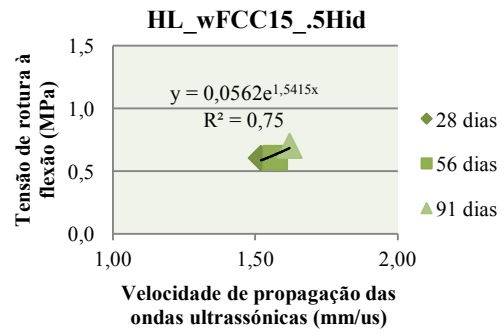
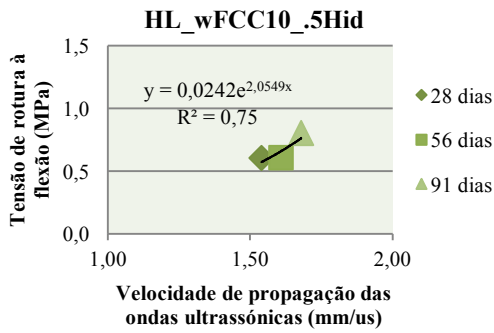
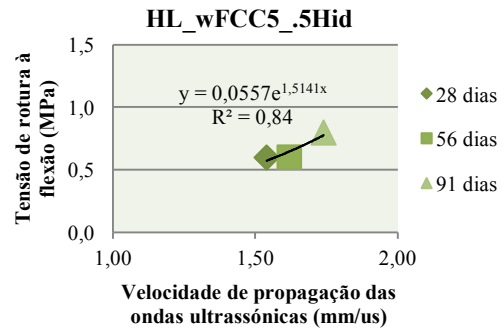
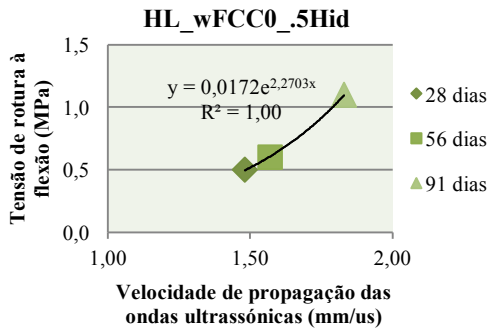
E.5 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS





E.6 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS





**E.7 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS
ULTRASSÓNICAS E O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO**

Série	Composição	Massa (g)			E – Módulo de deformação dinâmico (MPa)		
		28 dias	56 dias	91 dias	28 dias	56 dias	91 dias
s/adjuvantes	HL_wFCC0	513,85	528,932	516,923	10 935,433	13 357,579	13 348,474
	HL_wFCC5	521,882	529,693	521,723	14 387,629	15 778,456	15 647,280
	HL_wFCC10	517,995	517,37	514,11	14 482,070	15 391,431	15 832,489
	HL_wFCC15	513,882	512,803	501,975	14 066,115	15 482,999	15 567,514
Hid	HL_wFCC0_Hid	355,822	328,01	335,553	3 006,879	2 770,383	3 215,953
	HL_wFCC5_Hid	331,07	325,228	333,822	2 724,040	2 924,999	3 274,780
	HL_wFCC10_Hid	338,812	316,445	325,948	2 826,466	2 669,027	2 970,791
	HL_wFCC15_Hid	333,048	320,96	322,727	2 740,498	2 711,258	2 763,467
0.5Hid	HL_wFCC0_5Hid	321,683	330,042	343,598	2 479,602	2 859,670	4 050,076
	HL_wFCC5_5Hid	331,298	333,122	326,629	2 759,765	3 072,393	3 480,558
	HL_wFCC10_5Hid	332,457	334,987	322,027	2 768,102	3 052,806	3 195,046
	HL_wFCC15_5Hid	323,693	331,125	314,216	2 631,690	2 868,335	2 897,093
0Hid	HL_wFCC0_0Hid	322,49	316,553	340,587	2 581,145	2 677,473	3 927,480
	HL_wFCC5_0Hid	332,635	316,38	323,195	3 034,579	3 098,294	3 679,173
	HL_wFCC10_0Hid	334,98	326,89	319,592	3 206,382	3 361,573	3 175,200
	HL_wFCC15_0Hid	337,023	329,547	319,708	3 304,192	3 472,233	3 062,813

O módulo de deformação dinâmico foi calculado recorrendo à norma ABNT NBR 15630:2008, segundo a seguinte expressão:

$$E_d = v^2 \cdot \rho \frac{(1+v) \cdot (1-2v)}{1-v}$$

onde,

E_d – módulo de deformação dinâmico (MPa);

v – velocidade de propagação das ondas ultrassónicas (mm/ μ s);

ρ – massa volúmica da amostra no estado endurecido (kg/m³);

ν – coeficiente de Poisson. Adota-se nesta equação o valor de 0,2.

