

Efeito da Incorporação de um Resíduo da Refinação de Petróleo em Formulações Industriais para Argamassas de Ancoragem de Armaduras de Aço

RITA ALMEIDA DE OLIVEIRA

Licenciada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

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

Orientadores:

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

Coorientador:

Doutor, Luís Miguel Cardoso da Silva, Diretor I&D Grupo Saint-Gobain Weber para as
áreas de colagem e argamassas técnicas

Júri:

Presidente:

Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Doutora, Inês Flores-Colen, Professora Auxiliar (IST)

Doutor, Luís Miguel Cardoso da Silva, Diretor I&D Grupo Saint-
Gobain Weber para as áreas de colagem e argamassas técnicas

Abril 2018

Resumo

A indústria da construção civil traduz uma grande preocupação a nível mundial devido ao seu enorme impacto ambiental pelo que existem, atualmente, diversas medidas que visam incentivar a sua sustentabilidade. O cimento é um material essencial neste setor, no entanto, o seu processo de produção equivale à maior fonte de emissão antropogénica de CO₂ para a atmosfera. Desta forma, a substituição parcial de cimento por adições, na composição de materiais como as argamassas, contribui para a mitigação deste impacto através da redução do seu consumo.

A presente dissertação apresenta como objetivo a avaliação da viabilidade científica e tecnológica de substituir parcialmente, entre 10 e 30% (em massa), o cimento por um resíduo da indústria petrolífera (FCC) em argamassas de ancoragem para armaduras de aço. Estas argamassas, devido à sua função, devem apresentar algumas características e propriedades específicas, tais como, elevada aderência e resistência mecânica, rápido endurecimento, devem ser impermeáveis à água e fluidas sem segregar. A avaliação das propriedades das argamassas preparadas apresenta como referência a argamassa comercial da empresa *Saint-Gobain Weber Portugal* e à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor.

O resíduo reutilizado é produzido na refinaria da Petrogal, em Sines. Para o estudo do seu efeito na argamassa de ancoragem foi realizada uma campanha experimental que incluiu ensaios das argamassas preparadas com diferentes teores do resíduo – 10 %, 20 % e 30 %. A campanha permitiu estudar propriedades tanto no estado fresco (consistência por espalhamento e massa volúmica) como endurecido (ultrassons, resistividade elétrica, resistência à flexão e à compressão, variação dimensional, difusão de cloretos e aderência).

No estado fresco, o aumento do teor de incorporação do resíduo (i) aumenta a quantidade de água para os mesmos valores de espalhamento e (ii) diminui a massa volúmica aparente.

As argamassas com 10 % e 20 % de substituição do cimento pelo resíduo de FCC cumprem os requisitos impostos quer pela NP EN 1504-6 quer pela ficha técnica da argamassa utilizadas como referência. A argamassa com 30 % de substituição do cimento, aos 91 dias de idade também cumpre os todos os requisitos apesar de nas primeiras idades por vezes isso não acontecer.

Desta forma a utilização de até 20 % deste resíduo como substituto parcial do cimento demonstrou-se viável. A incorporação de 10 % do resíduo, tipicamente, traduz-se na produção de cimentos com propriedades melhoradas.

Neste sentido, este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de novos materiais à base de cimento, com menor impacte ambiental.

Palavras-chave: Argamassa de ancoragem; Impacte ambiental; Catalisador exausto de FCC; Pozolana

Abstract

Construction industry is a major concern worldwide due to its enormous environmental impact, so there are now several measures that aim to encourage its sustainability. Cement is an essential material in this sector however its production process translates into the largest source of anthropogenic CO₂ emissions into the atmosphere. Therefore, the partial replacement of cement by additions, in the composition of materials such as mortars, contributes to the mitigation of this impact through the reduction of its consumption.

This dissertation aims to evaluate the scientific and technological feasibility of partially replacing, between 10 and 30% (in mass), cement by an oil industry residue (FCC) in anchoring mortars for steel reinforcement. These mortars, due to their function, must have some specific characteristics and properties, such as high adhesion and mechanical resistance, fast hardening, must be impermeable to water, and of fluid consistency without segregating. The evaluation of the properties of prepared mortars is based on the commercial mortar of Saint-Gobain Weber Portugal using the specifications required by the current European standards.

The reused residue is produced at the Petrogal refinery in Sines. For the study of its effect on the mortar anchorage, an experimental campaign was carried out which included tests of mortars prepared with different contents of the residue - 10%, 20% and 30%. The campaign allowed the study of properties both in the fresh state (spreading consistency and density) and hardened state (ultrasonic, electrical resistivity, flexural and compressive resistance, dimensional variation, chloride diffusion and adhesion).

In the fresh state, increments in the incorporation of residue content (i) increase the amount of water for the same scattering values and (ii) decrease the apparent bulk density.

Mortars with 10% and 20% cement replacement by the FCC residue comply with the requirements of both NP EN 1504-6 and the mortar datasheet used as reference. The mortar with 30% cement replacement at 91 days of age also meets all requirements, although in the early ages sometimes the same does not happen. Thence, the use of up to 20% of this residue as a partial substitute of the cement was proved to be viable. And the incorporation of 10% of the residue typically translated into the production of cements with improved properties.

In this regard, this project intends to contribute to the development of new materials based on cement, with less environmental impact.

Keywords: Anchoring mortar; Environmental impact; Waste FCC catalyst; Pozzolana

Índice

1	Enquadramento	1
1.1	Justificação do tema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do TFM.....	2
2	Síntese de conhecimentos.....	5
2.1	Impacte Ambiental da Construção	5
2.2	Função e constituição das ancoragens.....	6
2.3	Processo de construção de ancoragens	8
2.4	Argamassas para ancoragem de armaduras de aço.....	9
2.4.1	Constituintes típicos e proporções	10
2.5	Propriedades cujos valores são impostos normativamente.....	17
3	Campanha experimental.....	19
3.1	Constituintes.....	21
3.1.1	Distribuição do tamanho de partículas dos agregados.....	21
3.1.2	Baridade e volume de vazios dos agregados.....	23
3.1.3	Equivalente de areia	25
3.1.4	Massa volúmica e absorção de água dos agregados	28
3.2	Preparação das argamassas	31
3.3	Determinação da quantidade de água das argamassas	33
3.4	Ensaio das argamassas no estado fresco.....	34
3.4.1	Consistência (pela mesa de espalhamento)	34
3.4.2	Massa volúmica aparente	35
3.5	Ensaio das argamassas no estado endurecido.....	37
3.5.1	Velocidade da propagação de ultrassons	38
3.5.2	Resistividade elétrica.....	41
3.5.3	Resistência mecânica.....	43
3.5.4	Variação dimensional	48
3.5.5	Difusão de cloretos.....	50

3.5.6	Aderência	55
4	Apresentação, análise e discussão de resultados.....	59
4.1	Caracterização dos agregados	59
4.1.1	Determinação do tamanho de partículas	60
4.1.2	Baridade e volume de vazios	62
4.1.3	Equivalente de areia	63
4.1.4	Massa volúmica e absorção de água dos agregados.....	64
4.1.5	Resumo das características dos agregados.....	64
4.2	Argamassas no estado fresco	65
4.2.1	Consistência	65
4.2.2	Massa volúmica aparente.....	66
4.3	Argamassas no estado endurecido.....	67
4.3.1	Velocidade de propagação de ultrassons	67
4.3.2	Resistividade elétrica.....	70
4.3.3	Resistência mecânica.....	72
4.3.3.3	Relação entre a velocidade de propagação de ultrassons, resistividade elétrica e resistência mecânica	79
4.3.4	Variação dimensional	81
4.3.5	Difusão de cloretos.....	82
4.3.6	Aderência	85
4.4	Convergência das propriedades das argamassas com os requisitos tecnológicos.....	87
5	Conclusões.....	90
5.1	Perspetivas de trabalho futuro	93
	Referências bibliográficas.....	96
	Anexos	i
	Anexo A – Documentos de apoio.....	A.i
	Anexo B – Análises de resultados.....	B.i

Índice de Figuras

Figura 2.1- Sistema de ancoragens [16]	7
Figura 2.2 – Esquema com um pormenor de uma ancoragem [13].....	8
Figura 3.1 – Fases do ensaio de análise granulométrica. a) Coluna de peneiros; b) Despejo da amostra nos peneiros; c) Pesagem.....	23
Figura 3.2 – Fases do ensaio de determinação da baridade. a) Determinação de M_1 ; b) Enchimento do recipiente; c) Rasamento do excedente; d) Recipiente pronto para a pesagem; e) Determinação de M_2	25
Figura 3.3 - Fases da determinação do ensaio de equivalente de areia. a) Provetas com a solução de lavagem até ao traço de referência inferior; b) Introdução da amostra de areia na proveta; c) Proveta e amostra após os 10 min de repouso; d) Proveta na máquina de agitação; e) Enchimento da proveta com a solução de lavagem.	27
Figura 3.4 – Continuação do ensaio Fases da determinação de equivalente de areia. a) Proveta após o repouso de 20 min; b) Medição de h_1 ; c) Medição de h_2	28
Figura 3.5 - Fases do ensaio de determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados. a) Rotação do picnómetro; b) Amostras em banho Maria; c) Enchimento do picnómetro com água; d) Pesagem do picnómetro cheio de água; e) Molde cheio com a amostra de areia; f) Apiloamento da amostra; g) Amostra em processo de secagem; h) Amostra pronta para a pesagem	30
Figura 3.6 - Fases do processo de amassadura. a) Pesagem dos constituintes; b) Adição do monocomponente à água previamente colocada no copo de mistura; c) Mistura; d) Argamassa no estado fresco.....	33
Figura 3.7 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento. a) Preparação do equipamento; b) Enchimento do molde; c) Rasamento da argamassa excedente; d) Argamassa pronta para o ensaio; e) Remoção do molde e batimentos f) Medições ...	35
Figura 3.8 – Fases do ensaio de determinação da massa volúmica. a) Determinação de M_1 ; b) Enchimento de metade da capacidade e compactação; c) Enchimento da totalidade do recipiente; d) Molde após a compactação e rasamento; e) Determinação de M_2	36
Figura 3.9 – Calibração do equipamento. a) Utilização da barra de calibração; b) Equipamento após atingir os $20,1 \mu s$	39
Figura 3.10 – Fases do ensaio de determinação dos ultrassons. a) Limpeza do excesso de água superficial da amostra; b) Determinação da massa da amostra; c) Untar com vaselina os topos da amostra; d) Emissão das ondas pelos transdutores, no interior da amostra; e) Registo do tempo medido.....	40

Figura 3.11 - Fases do ensaio de resistividade elétrica. a) Amostra seca superficialmente; b) Equipamento ligado, pronto para o ensaio; c) Registo do valor da resistividade elétrica; d) Peso de 2kg utilizado na realização do ensaio.....	42
Figura 3.12 - Moldes prismáticos com 40 x 40 x 160 mm	43
Figura 3.13 - Moldagem. a) Argamassa compactada em metade da capacidade do molde; b) Enchimento do molde; c) Remoção dos excessos nivelando a superfície; d) Amostras desmoldadas e identificadas.....	44
Figura 3.14 - Prensa hidráulica <i>PETRA</i> utilizada	45
Figura 3.15 - Fases do ensaio de resistência mecânica à tração por flexão. a) Posicionamento da amostra; b) Rotura da amostra; c) Valor registado pela prensa ...	46
Figura 3.16 - Fases do ensaio de resistência mecânica à compressão. a) Posicionamento da amostra; b) Rotura da amostra; c) Valor registado pela prensa ...	47
Figura 3.17 - Molde prismático com 100 x 100 x 400 mm	48
Figura 3.18 – Preparação das amostras para o ensaio da variação dimensional. a) Processo de colagem das peças metálicas numa face da amostra; b) Pormenor da pastilha revestida com a massa cola	49
Figura 3.19 - Molde cilíndrico \varnothing 100 mm x 250 mm	50
Figura 3.20 - Ânodos utilizados no ensaio.	51
Figura 3.21 - Fases da preparação das amostras. a) Amostras a secar ao ar; b) Amostras imersas na solução de cloreto de sódio.	51
Figura 3.22 - Fases do ensaio de difusão de cloretos. a) Bolachas saturadas; b) Preparação da manga com a bolacha no seu interior; c) Medição da temperatura de cada solução anódica, antes do início do ensaio; d) Conjuntos das três mangas com as bolachas, a solução anódica e o ânodo, no reservatório; e) Medição das intensidades de corrente após o ajuste pela Tabela 3.19; f) Abertura da bolacha após 24h; g) Pulverização a superfície fraturada da bolacha com nitrato de prata; h) Período de espera após pulverização das superfícies; i) Leitura da profundidade de penetração dos cloretos.	53
Figura 3.23 – Fases do ensaio de aderência. a) Lajeta e molde preparados; b) Enchimento do molde garantindo que a argamassa adere bem à placa; c) Amostra preparada, após acomodar a argamassa; d) Amostras identificadas, a curar a temperatura e humidade controlada.	56
Figura 3.24 – Continuação do ensaio de aderência. a) Argamassa cortada, pronta para a colagem das chapas metálicas; b) Amostras preparadas para o ensaio, com as chapas coladas; c) Parafuso enroscado na chapa metálica; d) Dinamómetro a tracionar a chapa metálica.	57

Figura 4.1 - Distribuição de tamanho de partículas dos agregados. a) Areia 0,315; (b) Areia 0,63; (c) Areia 1,25; (d) Calcário; e) Curva global dos agregados.....	61
Figura 4.2 – Curvas granulométricas das misturas preparadas e limites de referência definidos pela <i>Saint-Gobain Weber</i>	62
Figura 4.3 – Baridade com correspondente desvios padrão e volume de vazios dos agregados.....	62
Figura 4.4 - Absorção de água em percentagem de massa seca	64
Figura 4.5 – Representação gráfica da consistência obtida por espalhamento (mm) da argamassa de referência e das argamassas com diferentes incorporações do resíduo FCC. As linhas apresentadas representam os respetivos desvios padrão.	65
Figura 4.6 – Relação entre a massa volúmica (kg/m^3) e a quantidade de água das argamassas em estudo. R^2 corresponde ao fator de correlação obtido para os resultados da massa volúmica.....	66
Figura 4.7 – Representação gráfica dos valores médios da velocidade de propagação dos ultrassons (m/s) obtidos nas argamassas ensaiadas ao longo do tempo.	67
Figura 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico	69
Figura 4.9 – Representação gráfica dos valores médios da resistividade elétrica ($\Omega\cdot\text{m}$) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas	71
Figura 4.10 - Representação gráfica da tensão média de rotura à tração por flexão (MPa) das argamassas preparadas para as diferentes idades. As linhas verticais correspondem aos respetivos desvios padrão e as linhas horizontais aos valores impostos pela ficha técnica da argamassa de referência (Tabela 4.6).	73
Figura 4.11 - Representação gráfica da tensão média de rotura à compressão (MPa) das argamassas preparadas para as diferentes idades. As linhas verticais correspondem aos respetivos desvios padrão e as linhas horizontais a 80 % dos valores impostos pela ficha técnica da argamassa de referência.....	76
Figura 4.12- Retração das quatro argamassas em estudo (mm/m).....	81
Figura 4.13 - Profundidades de difusão dos cloretos (mm) e respetivos desvios padrão (representados pelas linhas), em estado não-estacionário, nas argamassas preparadas aos 28 e 91 dias de idade	83
Figura 4.14 - Coeficientes de migração ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) e respetivos desvios padrão (representados pelas linhas), em estado não-estacionário, nas argamassas preparadas, aos 28 e 91 dias de idade	84
Figura 4.15 – Tensões médias de aderência (MPa) e respetivos desvios padrão (representados nas linhas).....	86

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Constituição típica de argamassas de ancoragem (em %, de massa)	10
Tabela 2.2 – Composição da matéria prima.....	11
Tabela 2.3 - Constituintes principais do cimento portland	11
Tabela 2.4 - Caraterísticas químicas e físicas do resíduo de FCC [43]	15
Tabela 2.5 - Requisitos de identificação das argamassas de ancoragem impostos pela norma NP EN 1504-6, aplicáveis a argamassas hidráulicas	17
Tabela 2.6 - Requisitos de desempenho das argamassas de ancoragem impostos pela norma NP EN 1504-6. Aplicáveis a argamassas hidráulicas.....	17
Tabela 3.1 – Designação atribuída às argamassas em função da composição do ligante.....	19
Tabela 3.2 - Atividades desenvolvidas na campanha experimental	20
Tabela 3.3 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de DTP.....	21
Tabela 3.4 – Massa mínima da amostra de agregado a ensaiar, segundo a norma EN 933-2	22
Tabela 3.5 - Equipamentos, utensílios e materiais para a determinação da baridade .	24
Tabela 3.6 – Capacidade mínima do recipiente em função da máxima dimensão do agregado	24
Tabela 3.7 – Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio do equivalente de areia	25
Tabela 3.8 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de determinação da massa volúmica e absorção de água dos agregados.....	28
Tabela 3.9 - Composição das argamassas	31
Tabela 3.10 - Equipamentos, utensílios e materiais utilizados para a preparação das argamassas	32
Tabela 3.11 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de espalhamento..	34
Tabela 3.12 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio da massa volúmica	36
Tabela 3.13 – Forma e dimensão dos moldes utilizados para moldar a argamassa para os ensaios no estado endurecido	37
Tabela 3.14 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de propagação de ultrassons	38
Tabela 3.15 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio para determinação da resistividade elétrica	41
Tabela 3.16 - Equipamentos, utensílios e materiais para os ensaios de resistência mecânica	45

Tabela 3.17 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de variação dimensional	48
Tabela 3.18 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de determinação da difusão dos cloretos	50
Tabela 3.19 - Tensão e duração do ensaio de difusão de cloretos	52
Tabela 3.20 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de aderência	55
Tabela 4.1 -Análise granulométrica dos agregados, peneiros utilizados de acordo com a NP EN 933 - 2, percentagem do material retido no fundo (%finos)	60
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de equivalente de areia (SE(10) é o equivalente de areia e % a quantidade de areia presente na amostra, em percentagem mássica)	63
Tabela 4.3 - Tabela resumo das características dos agregados	64
Tabela 4.4 – Valores médios da velocidade de propagação dos ultrassons (m/s) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas	67
Tabela 4.5 - Valores médios da resistividade elétrica (ohm.m) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas	70
Tabela 4.6 - Tensão de rotura à tração por flexão, que a argamassa em estudo deve cumprir, segundo ensaios realizados pela <i>Saint-Gobain Weber</i>	74
Tabela 4.7 - Índice de atividade determinado a partir da tensão média de rotura à tração por flexão	75
Tabela 4.8 – Tensão média de rotura à compressão, que a argamassa em estudo deve cumprir, segundo ensaios realizados pela <i>Saint-Gobain Weber</i>	77
Tabela 4.9 - Índice de atividade da tensão média de rotura à compressão.....	78
Tabela 4.10 - Coeficientes de ductilidade para as argamassas produzidas na campanha experimental.....	78
Tabela 4.11 – Percentagens de crescimento das tensões (tração por flexão e compressão) entre as idades de ensaio para as argamassas produzidas	79
Tabela 4.12 - Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de velocidade de propagação dos ultrassons, de resistividade elétrica e de resistência mecânica à tração e à flexão para as argamassas preparadas, aos 7, 28 e 91 dias de idade	80
Tabela 4.13 - Tipos de rotura obtidos durante o ensaio, conforme apresentadas no Anexo A.2.....	87
Tabela 4.14 – Comparação das propriedades das argamassas estudadas e os requisitos impostos pela norma NP EN 1504-6 e pela ficha técnica da argamassa comercial de ancoragem (Anexo A.1)	88

Lista de siglas e abreviaturas

Lista de siglas e abreviaturas	
CC	Argamassa hidráulica e betão hidráulico, segundo a norma NP EN 1504-1
G_COM	Designação atribuída à argamassa comercial da <i>Saint-Gobain Weber</i> utilizada como argamassa de referência neste trabalho
G_xFCC	Designação atribuída às argamassas em estudo que contêm resíduo de FCC, em que x representa a percentagem mássica de substituição parcial de cimento pelo resíduo de FCC, no ligante
CEM	Cimentos correntes, de acordo com a norma NP EN 197-1
DTP	Distribuição do tamanho de partícula
EN	Norma Europeia
FCC	Catalisador da unidade de "cracking" catalítico em leito fluidizado (abreviatura adotada genericamente a partir da designação da unidade em inglês "fluid catalytic cracking")
IPQ	Instituto Português da Qualidade
IA	Índice de Atividade pozolânica, de acordo com a norma americana ASTM C311
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
LOI	Perda por ignição
NP	Norma Portuguesa
TFM	Trabalho Final de Mestrado

Compostos químicos	Designações
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
K ₂ O	Óxido de Potássio
<u>La₂O₃</u>	<u>Óxido de lantânio</u>
MgO	Óxido de Magnésio
<u>NiO</u>	<u>Óxido de níquel</u>
Na ₂ O	Óxido de Sódio
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
<u>TiO₂</u>	<u>Dióxido de titânio</u>
<u>V₂O₅</u>	<u>Pentóxido de vanádio</u>

Compostos químicos típicos do cimento e respetivas designações		
Notação na Química do Cimento	Designação	Fórmula Química
A	Alumina	Al ₂ O ₃
C ₃ A	Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado	3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O
C-A/F-H	Aluminoferratos de cálcio hidratado	3CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ .6H ₂ O

C ₄ AF	Aluminoferrato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
C ₂ S	Silicato bicálcico	2CaO.SiO ₂
C ₃ S	Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado	xCaO.SiO ₂ .yH ₂ O
C	Óxido de cálcio	CaO
CH	Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂
H	Água	H ₂ O
S	Sílica	SiO ₂

1 Enquadramento

O planeta encontra-se atualmente sobre explorado. A população mundial, entre os anos 1800 e 2010, cresceu sete vezes, conduzindo a que já tenha sido ultrapassada a capacidade de regeneração do planeta [1]. Tais factos levaram ao desenvolvimento do conceito de sustentabilidade visando a utilização mais racional dos recursos naturais disponíveis.

A construção é uma atividade de extrema importância, no entanto, é um dos maiores consumidores de recursos naturais não renováveis e um dos que emite mais gases poluentes para a atmosfera (secção 2.1). Como tal, atualmente é uma prioridade o desenvolvimento de novos materiais de construção que sejam classificados como mais sustentáveis.

1.1 Justificação do tema

Neste Trabalho Final de Mestrado (TFM) são estudadas as alterações provocadas nas propriedades de argamassas de ancoragem decorrentes da substituição parcial do cimento por um resíduo gerado pela refinaria da Petrogal, em Sines. Em concreto, estas argamassas têm, tipicamente, 35 % (em massa) de cimento na sua constituição - e pretende-se avaliar o efeito nas propriedades de gamas de substituição parcial do cimento entre os 10 % e 30 % pelo resíduo. Desta forma, o presente TFM pretende contribuir para o estudo da viabilidade científica e tecnológica da produção de novas argamassas cimentícias com menor impacte ambiental por apresentarem na sua constituição diferentes percentagens de incorporação de um resíduo pozolânico classificado como adição do Tipo II (secção 2.4.1.4).

As argamassas de ancoragem de armaduras de aço, preparadas neste trabalho, têm como referência a formulação industrial da argamassa da *Saint-Gobain Weber* para o mesmo fim. Desta forma o TFM contém uma componente científica porque inclui argamassas ensaiadas com diferentes percentagens, em massa, de substituição parcial do cimento por um resíduo de FCC (secção 2.4.1.4) e uma componente tecnológica uma vez que contribui para a análise da viabilidade tecnológica das argamassas com FCC na sua constituição confrontando a correspondência das suas propriedades às exigências de mercado e normativas em vigor.

1. Introdução

1.2 Objetivos

A presente dissertação pretende contribuir para o acréscimo de conhecimento de um novo tipo de argamassas cimentícias para ancoragem de armaduras de aço, com a reutilização de um resíduo da indústria petrolífera na sua composição. Em concreto, este trabalho estuda argamassas nas quais o cimento corrente – CEM I 52,5 R – é parcialmente substituído, entre 10 % e 30 % (em massa), por um resíduo gerado na unidade de "cracking" catalítico em leito fluidificado (FCC, do inglês "Fluid Catalytic Cracking") da indústria petrolífera.

Através da realização de uma campanha experimental, decorrida no Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes e dos estados fresco e endurecido das argamassas. A análise dos resultados obtidos permitiu avaliar e comparar os efeitos nas propriedades e no desempenho de argamassas com diferentes percentagens da adição.

Desta forma, este TFM pretende:

- definir a composição das argamassas com incorporação de resíduo da indústria petrolífera
- avaliar o efeito da incorporação do resíduo nas propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido
- avaliar a existência de ganhos adicionais nas novas misturas quando comparadas com a argamassa comercial utilizada como referência
- avaliar a potencial utilização do resíduo de FCC em relação a algumas especificações requeridas pela norma em vigor e pela ficha técnica da argamassa de referência.

1.3 Estrutura do TFM

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos abaixo apresentados de forma resumida.

O capítulo 1 apresenta o enquadramento e justificação do tema desenvolvido no trabalho, bem como os objetivos que se pretendem alcançar e descreve a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma abordagem de sínteses de conhecimentos sobre temas relevantes para o trabalho. Concretamente: (i) abordagem sobre o impacte ambiental do setor da construção, que esteve na origem desta investigação e que justifica a

escolha da incorporação de um resíduo – catalisador exausto de FCC - em argamassas cimentícias (ii) função e constituição de ancoragem (iii) constituintes típicos das argamassas de ancoragem e proporções.

O capítulo 3 apresenta a campanha experimental a desenvolver, identificando quatro fases da mesma. Desta forma, a campanha realizada divide-se na (i) caracterização dos agregados (ii) preparação das argamassas (iii) determinação da quantidade de água, e por fim (iv) realização dos ensaios propriamente ditos. Em cada ensaio são apresentados os materiais e os procedimentos utilizados, com o auxílio de imagens fotográficas.

O capítulo 4 é constituído pela apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental. Os resultados são apresentados com recurso a representações gráficas e tabelas que permitem observar o comportamento das argamassas e assim avaliar o efeito da diferença de percentagem de incorporação de resíduo de FCC. A fim de melhor caracterizar física e mecanicamente as argamassas, ainda se correlacionam alguns dos ensaios entre si. Neste capítulo existe ainda uma análise comparativa dos resultados com os de outros autores.

O capítulo 5 constitui uma síntese das conclusões gerais dos resultados obtidos no capítulo 4, e decorrentes da campanha experimental apresentada no capítulo 3. De seguida são analisadas as contribuições do trabalho realizado com base nos objetivos propostos inicialmente. Por fim, como sugestão surgem algumas propostas de desenvolvimento futuro neste domínio.

Após as referências bibliográficas apresentam-se ainda os anexos com informações complementares.

1. Introdução

2 Síntese de conhecimentos

Este capítulo consiste numa síntese de conhecimentos de suporte à realização do TFM pelo que apresenta uma pesquisa inicial sobre os motivos ambientais que servem de motivação à escolha do tema (secção 2.1). De seguida, descreve-se sucintamente a função das ancoragens em obras de engenharia e as diversas partes que a constituem (secção 2.2), bem como o seu modo de construção (secção 2.3). Estes aspetos determinam a formulação das argamassas usadas em ancoragens de armaduras de aço - em termos de natureza e teor dos seus constituintes - (secção 2.4.1) bem como as propriedades que estas argamassas têm que apresentar (secção 2.5).

2.1 Impacte Ambiental da Construção

A construção é uma atividade essencial ao desenvolvimento económico e social da Humanidade [2]. Contudo, também é dos setores de atividade que mais consome recursos naturais não renováveis bem como, é o setor responsável pela emissão de uma quantidade expressiva de gases poluentes para a atmosfera. Em concreto, a construção quando comparada com qualquer outra atividade económica, a nível mundial, é responsável pelo consumo de cerca de 50 % em massa de recursos naturais [3] como o calcário, as argilas, a energia combustível e elétrica [4].

Atualmente assume-se como objetivo progredir de uma mentalidade onde a importância é atribuída a uma construção rápida, para uma construção mais sustentável que privilegie a conservação de energia e de recursos de materiais não renováveis. Um meio para tentar alcançar estes objetivos passa pela incorporação de resíduos nos materiais de construção. Esta medida é particularmente eficaz se os resíduos substituírem materiais com elevado impacte ambiental como o cimento. Concretizando, a produção de cimento é responsável (i) por cerca de 5 - 8 % das emissões de CO₂ totais no mundo [5][6][7][8][9][10][3] uma vez que cada tonelada de cimento produzida liberta cerca de 1 tonelada de CO₂ [5][7] (ii) pelo consumo de 1,7 toneladas de matérias primas por cada tonelada de cimento portland produzido [8] e (iii) por 2 % do consumo energético primário global e 5 % do consumo energético industrial global [8]. Adicionalmente, uma medida de mitigação do impacte do cimento é a sua substituição parcial por resíduos de outras indústrias com propriedades

2. Síntese de conhecimentos

cimentícias. Como a quantidade de materiais à base de cimento utilizada é significativa, estes materiais de construção têm a capacidade de incorporar volumes significativos de resíduos. Desta forma estes materiais concorrem para o cumprimento da Lei dos Resíduos (Decreto-Lei nº73/2011, de 17 de junho) que prevê, no que se interceta com os objetivos deste trabalho:

- reduzir a produção de resíduos
- incentivar a reutilização e reciclagem de resíduos
- promover o pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos
- definir requisitos que permitam classificar como subprodutos, e não como resíduos, substâncias ou objetos resultantes de processos produtivos.

Esta lei estabelece assim objetivos de preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos, para serem cumpridas até 2020 [11].

Face ao exposto, e sabendo que a indústria da construção produz cerca de 2,6 bilhões de toneladas de cimento a cada ano [7], a minimização da sua utilização – em particular substituindo-o parcialmente por resíduos – representa um contributo significativo para a sustentabilidade na construção. Concretamente, neste trabalho, o resíduo utilizado é um subproduto industrial que tipicamente é conduzido para aterro sanitário [12].

Desta forma vários são os benefícios do seu consumo em argamassas como substituto parcial do cimento:

- redução da extração dos recursos naturais constituintes do cimento
- redução do consumo de energia e das emissões de CO₂ associadas à produção do cimento
- redução dos custos associados à gestão dos resíduos
- aumento do lucro associados à valorização do resíduo, passando a ser considerado um produto.

2.2 Função e constituição das ancoragens

As ancoragens são sistemas cujos constituintes principais são cabos de aço nervurado pré-esforçados – que no domínio da Engenharia Civil, são designadas comumente por armaduras. Estes cabos servem para suportar obras de geotecnia em relação aos impulsos do terreno através da sua fixação no próprio terreno, melhorando a segurança da construção. As ancoragens são assim utilizadas para estabilização de (i)

encostas (ii) barragens (iii) açudes (iv) entivações (v) tuneis e (vi) muros de Berlim. Estas obras são também utilizadas para evitar contrafortes de sapatas [13][14][15].

A Figura 2.1 retrata um sistema de ancoragem de armaduras de aço, para estabilização de uma encosta, constituído por várias ancoragens que concorrem simultaneamente para a estabilização da construção.



Figura 2.1- Sistema de ancoragens [16]

A Figura 2.2 apresenta um esquema de uma ancoragem com a pormenorização das partes que a constituem [13] e que, sucintamente, se descrevem abaixo:

- armadura - são cabos de aço nervurados pré-esforçados colocados no interior de tubos introduzidos nos furos das ancoragens que determinam o comprimento da ancoragem
- cabeça - é o elemento que se encontra situado sobre a face exterior da parede, sempre na posição perpendicular à armadura. Deve suportar as cargas e travar os varões do ferro, assim como suportar qualquer esforço causado pela falha de uma ancoragem vizinha
- bolbo de selagem - é o troço de amarração da ancoragem ao terreno que corresponde a um acréscimo do seu diâmetro, ou seja, a um aumento da área de contacto com o terreno. Resulta da injeção de caldas ou argamassas cimentícias que garantem a transmissão do pré-esforço, previsto para a ancoragem, ao terreno.

A argamassa estudada neste TFM é aplicada nestes bolbos de selagem. Devido à sua função, estas argamassas devem apresentar um bom

2. Síntese de conhecimentos

desempenho no que respeita à aderência e à resistência à tração (secção 2.5). O bolbo assegura ainda a transferência da carga, no entanto, e por consequência, também preenche os vazios existentes no terreno e assim protege a armadura da corrosão

- comprimento livre - corresponde à distância desde a cabeça até ao bolbo de selagem.

O bolbo da selagem deve ser construído sempre numa zona em que o terreno seja considerado firme, em projeto, o que normalmente se regista nos terrenos mais profundos. Esta condição leva a que as ancoragens apresentem um comprimento variável (Figura 2.2).

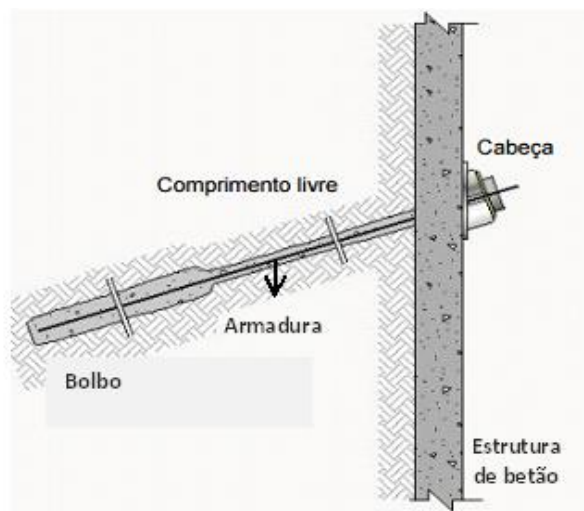


Figura 2.2 – Esquema com um pormenor de uma ancoragem [13]

2.3 Processo de construção de ancoragens

O processo de execução de ancoragens exige equipamento e pessoal especializado devido à sua complexidade.

A execução de uma ancoragem tem início com a perfuração do terreno. Nesta fase, é essencial conhecer (i) a dimensão do comprimento livre da ancoragem (Figura 2.2), especificada em projeto e (ii) as características do solo incluindo a possível presença de água no mesmo. Por forma a evitar deformações excessivas nas armaduras (Figura 2.2) dá-se especial cuidado ao transporte destes cabos de aço até à obra [14].

Posteriormente a armadura é fixa ao terreno através de injeções de argamassas formando o bolbo, conforme representado na Figura 2.2. Este processo designa-se por selagem da ancoragem. Tipicamente são efetuadas duas injeções de argamassa uma para formar o bolbo (secção 2.2), que garante a transmissão do pré-esforço, (Figura 2.2) e a outra para selar todos os espaços [14]. A argamassa utilizada nestas injeções é a estudada neste TFM (secção 2.4).

Ao fim de aproximadamente sete dias desde a segunda injeção de argamassa, recorrendo a um macaco que exerça tensão nas armaduras (Figura 2.2), estas são tracionadas até uma tensão pré-estabelecida pelo projetista. De seguida, a ancoragem é aliviada e é verificada a reação das armaduras à força aplicada, por fim traciona-se novamente. Nesta fase é avaliada a resistência à tração da argamassa, devendo esta resistir às forças de tração aplicadas sem que haja deslocamento da armadura. Após este processo corta-se a armadura em excesso com uma serra ou rebarbadora [14].

Estas argamassas devem cumprir os requisitos especificados pela norma NP EN 1504-6 e apresentados na secção 2.4.

2.4 Argamassas para ancoragem de armaduras de aço

A norma NP EN 1504 parte 1 define os principais constituintes dos produtos e sistemas para a proteção e reparação. Esta norma indica que as argamassas de ancoragem devem (i) promover a ligação entre a armadura e o betão de forma a obter um adequado comportamento estrutural, assim como (ii) preencher as cavidades de forma a assegurar continuidade entre o aço e os elementos de betão. A norma NP EN 1504-1 atribui ainda o termo CC a argamassas hidráulicas, nas quais se inclui a argamassa em estudo, cujo ligante é o cimento. Nestas argamassas tipicamente, é possível adicionar adjuvantes ou adições que permitem melhorar propriedades ou obter propriedades especiais

As argamassas de ancoragem apresentam propriedades específicas [17] quando comparadas com argamassas para outros fins tais como:

- fluidez, no estado fresco, sem segregação, garantindo um bom espalhamento da argamassa e mitigando a hipótese do aparecimento de vazios
- rápido endurecimento
- elevada aderência ao aço e ao betão garantindo um bom comportamento quando sujeito às forças tração
- elevada resistência mecânica

2. Síntese de conhecimentos

- coeficiente de dilatação térmico semelhante ao do betão, por forma a evitar retrações e conseqüente desprendimento futuro
- incluir agentes expansivos para evitar retrações quer na fase plástica como na fase endurecida
- impermeabilidade à água, evitando que a mesma atinja as armaduras.

Os requisitos de identificação e de desempenho destas argamassas são especificados pela norma NP EN 1504 parte 6 e apresentados na secção 2.5.

2.4.1 Constituintes típicos e proporções

A norma NP EN 1504 parte 6 define que as argamassas de ancoragem são um material, com propriedades ligantes e aglutinantes, resultante da mistura de um ligante hidráulico ou de resinas sintéticas ou ainda de misturas destes, agregados e água.

Neste trabalho são estudadas argamassas de ancoragem hidráulicas - cujo ligante hidráulico é o cimento (secção 2.4.1.1) que é parcialmente substituído, entre 10 % e 30 % (em massa) por uma adição pozolânica, em concreto o resíduo do catalisador de FCC (secção 2.4.1.1). A Tabela 2.1 apresenta uma composição típica de argamassas de ancoragens que corresponde à composição da argamassa que será usada como referência neste trabalho.

Tabela 2.1 - Constituição típica de argamassas de ancoragem (em %, de massa)

	Constituinte	%, em massa
Ligante hidráulico (secção 2.4.1.1)	Cimento Cinza CEM I, 52,5R	35
Agregado (secção 2.4.1.2)	Areias ($315 \mu\text{m} < \varnothing < 1,2 \text{ mm}$)	42
	Agregado calcário ($1,5 \text{ mm} < \varnothing < 3 \text{ mm}$)	20
Adição (secção 2.4.1.3)	Fumo de sílica	2
	Superplastificante	0,5
Adjuvantes (secção 2.4.1.4)	Anti-espuma	0,1
	Agente redutor de crómio VI	0,035

2.4.1.1 Ligantes Hidráulicos

Os ligantes hidráulicos são materiais inorgânicos que, por possuírem a capacidade de reagir com a água, podem agregar materiais inertes ou uni-los a superfícies. Em concreto, a reação com a água origina uma série de reações químicas (equações 1 a 4) de hidratação que conduzem a alterações químicas, físicas e mecânicas do sistema conferindo-lhe coesão e resistência [8][18]. Estes materiais

possuem, por estes motivos, elevada importância na construção, sendo o ligante hidráulico mais utilizado o cimento portland [18][19].

O cimento portland é produzido a partir da mistura de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro nos intervalos de percentagens apresentados na Tabela 2.2 [18].

Tabela 2.2 – Composição da matéria prima

C	60 a 68 %
S	17 a 25 %
A	2 a 9 %
F	0,5 a 6 %

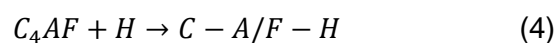
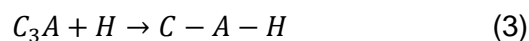
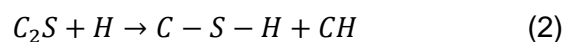
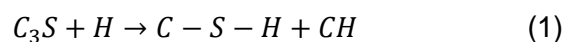
Estes componentes após doseados e aquecidos a 1400 - 1450 °C, reagem entre si formando novos componentes - os componentes principais do cimento - apresentados na Tabela 2.3. Este é o processo que apresenta um significativo impacto ambiental (secção 2.1). A mistura obtida é designada de clínquer [8][18].

Tabela 2.3 - Constituintes principais do cimento portland

C ₃ S	20 a 65%
C ₂ S	10 a 55 %
C ₄ AF	5 a 15 %
C ₃ A	0 a 15 %

Por fim, o cimento resulta da moagem conjunta de clínquer com 3 a 8 %, em massa, de gesso [8][20].

A mistura do cimento com a água desencadeia reações químicas de hidratação dos seus constituintes (Tabela 2.3). Estas reações são essencialmente, as descritas pelas equações 1 a 4 - que ocorrem a velocidades diferentes, influenciando-se mutuamente [8][21].



2. Síntese de conhecimentos

2.4.1.2 Agregados

Os agregados são materiais naturais, artificiais ou reciclados, utilizados em misturas de argamassas e betões para lhes conferir as necessárias propriedades físicas e mecânicas mas que intervêm pouco na reação de endurecimento do ligante hidráulico [22][23].

A sua quantidade, natureza química, estado de limpeza da areia, forma e tamanho das partículas são fatores que podem alterar as propriedades dos materiais à base de cimento tanto no estado fresco como endurecido.

2.4.1.3 Adições

As adições são materiais inorgânicos, adicionados aos materiais à base de cimento, como substitutos do cimento ou dos agregados - que permitem obter ou melhorar propriedades quer no estado fresco (como a trabalhabilidade ou os tempos de presa), quer no estado endurecido (como a resistência e a durabilidade). Estes materiais podem, também, conduzir a soluções mais económicas e sustentáveis [19] uma vez que a utilização de adições não só constitui um reaproveitamento de resíduos de outras indústrias, como permite uma redução das emissões de CO₂ [22]. Os materiais à base de cimento podem assim integrar na sua constituição adições como: escória de alto forno, fumo de sílica, pozolanas naturais, cinzas volante, xisto, calcário, entre outras.

As adições são classificadas em dois tipos:

- Adições do Tipo I: materiais considerados inertes ou semi-inertes, tipicamente *filler* mineral que é obtido através da moagem fina de calcário ou basalto, por exemplo. A sua designação surge como referência à capacidade que este material tem de preencher os poros nos materiais à base de cimento [24].

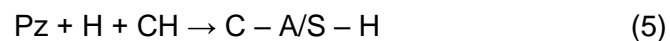
O *filler* contribui para completar a distribuição do tamanho das partículas nos agregados, isto é, atua como corretor granulométrico dos materiais que o incorporam [8]. Assim, a adição de *filler* confere a diminuição da fissuração e da permeabilidade da argamassa permitindo um aumento da durabilidade [21]. Desta forma, a presença deste material na composição das argamassas pode resultar num aumento da resistência mecânica e traduz-se tipicamente, numa menor segregação no estado fresco e menores índices de vazios e absorção de água no estado endurecido. Porém, com o *filler* ocorre também um pequeno aumento na densidade de massa e, principalmente na retração da argamassa.

- Adições do Tipo II: são adições hidráulicas latentes (como a escória de alto-forno) ou adições pozolânicas (como as cinzas volantes e fumo de sílica) [8][22][25].

As adições hidráulicas latentes são compostos constituídos por silicatos e aluminatos de cálcio que endurecem, espontaneamente, por reação com a água. Apesar da ocorrência desta reação em contacto com água, o endurecimento torna-se mais significativo na presença de um ativador alcalino que quebra as ligações químicas existentes na fase amorfa (ou vítrea) do ligante e promove a dissolução de espécies iónicas [8].

As pozolanas ou materiais pozolânicos são materiais constituídos principalmente por sílica ou aluminossilicatos amorfos, sendo possível distinguir pozolanas naturais e artificiais [18][19][20][26][27]. Atualmente, as pozolanas são utilizadas não só pelas razões ambientais, mas também por razões tecnológicas e económicas que se apresentam mais a baixo nesta secção.

Apesar das pozolanas, à partida, poderem não possuir propriedades ligantes hidráulicas [18][28][29], contêm constituintes que na presença de água e à temperatura ambiente, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, CH [19][25][29][30] - produzido durante a reação de hidratação do cimento (equações [1-4] na secção 2.4.1.1). Estas reações formam compostos de aluminossilicato de cálcio hidratados, C – A/S – H, com propriedades ligantes estáveis em água [18] – equação 5. Esta reação designa-se por reação pozolânica.



A substituição parcial de cimento por um material pozolânico dever-se-ia traduzir na diminuição da resistência mecânica do material à base de cimento no estado endurecido, de acordo com o que tipicamente se designa por “efeito de diluição” [31]. No entanto, quando as pozolanas substitutas conduzem à formação de produtos ligantes adicionais - C – A/S – H - pela reação pozolânica (equação 5) com composição químico-mineralógica que conduzem à densificação da matriz cimentícia, o efeito pozolânico pode sobrepor-se ao efeito de diluição. Nestas situações incorporação de materiais pozolânicos nos materiais à base de cimento conduz ao aumento da resistência mecânica e da durabilidade dos produtos finais [27][30].

Neste trabalho, são usadas duas pozolanas, sendo: (i) o fumo de sílica, um dos constituintes da argamassa e (ii) o resíduo de FCC o material em estudo utilizado como substituto parcial do cimento. A incorporação deste resíduo na composição de argamassas provoca, tipicamente, melhorias das suas propriedades, tanto em resistência mecânica como na durabilidade [32][33].

2. Síntese de conhecimentos

As adições do tipo II conferem, às argamassas e betões, melhorias não só do ponto de vista de algumas características como também permite que se retirem benefícios ambientais, económicos, e tecnológicos [18][19][8][27]:

- a nível ambiental reduz as emissões de CO₂ e reutiliza um resíduo quando se incorpora uma pozolana artificial (secção 2.1)
- a nível económico reduz os custos associados à produção de cimento e ao tratamento de transformação do resíduo num produto de valor acrescentado
- a nível tecnológico forma uma quantidade adicional de produtos ligantes que densificam a matriz do ligante, o que conduz a uma melhoria das propriedades mecânicas. Essa densificação da matriz aumenta a inércia à expansão e à fissuração, dificultando a difusão dos reagentes envolvidos nas reações de degradação, o que aumenta a durabilidade da argamassa [8]. Estas adições ainda baixam o calor de hidratação da argamassa sem grandes perdas da tensão de rotura [18] e evitam a formação de sulfoaluminato expansivo, propriedade importante para dotar a argamassa de características ao ataque por sulfatos [29][30].

As duas adições utilizadas neste trabalho – fumo de sílica e catalisador exausto de FCC - são pozolanas artificiais do Tipo II.

Fumo de sílica

O fumo de sílica é um subproduto obtido a partir de indústrias de produção de ligas de silício [34] – onde se reduz o quartzo com carvão a elevadas temperaturas [8][18]. Esta pozolana artificial, que contém cerca de 80 – 85 % de sílica na forma amorfa [35], apresenta também uma elevada superfície específica – 20 000 m²/kg medida por absorção do nitrogénio [34][35] - que lhe confere a sua elevada reatividade pozolânica [8][18][36] i.e, elevada capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio libertado na reação de hidratação do cimento (equações [1 - 4]) produzindo compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Tipicamente, estes C – S – H são mais densos que o C – S – H que se forma na reação de hidratação dos constituintes do cimento (equações [1 - 4]) conferindo, por isso, ao produto final melhores resistência mecânica e durabilidade [26][34][35][37]. Esta adição ao densificar a matriz do cimento contribui também para a diminuição da permeabilidade [35][38][39] aos cloretos e à água [40][41]. O fumo de sílica é reconhecido como sendo das adições mais eficazes como substituto parcial do cimento [38].

No presente trabalho, o fumo de sílica é um dos constituintes das argamassas, contudo, o seu teor mantém-se constante não sendo o efeito da sua presença que se pretende avaliar.

Resíduo do catalisador exausto de FCC

O catalisador exausto de FCC é um resíduo gerado no processo de *cracking* catalítico em meio fluidizado da refinação do petróleo – sendo deste processo que surge a sua abreviatura “FCC” (do inglês, *Fluid Catalytic Cracking*).

Este processo consiste na quebra (*cracking*) e separação das moléculas de hidrocarbonetos do petróleo quando este chega, como matéria-prima, a algumas refinarias. O catalisador exausto de FCC é utilizado como catalisador do processo repetidamente até que este não apresente a atividade catalítica necessária. Nessa fase é substituído e passa a ser considerado resíduo. A fase mais ativa do catalisador de FCC é o zeólito-Y, um aluminossilicato com uma estrutura cristalina porosa [42] de elevada área superficial específica (interna e externa) ~~–150,07 m²/g [43]~~ com elevada afinidade com a água [8][44][45][46][47].

A Tabela 2.4 apresenta as características químicas e físicas do resíduo de FCC gerado na Refinaria de Sines e que é objeto de estudo neste trabalho. A composição química apresentada foi obtida (i) por espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) e (ii) por perda por ignição (LOI) avaliadas de acordo com a norma europeia EN 196-2. A densidade foi determinada por picnometria de hélio e a distribuição de tamanho de partícula (DTP) foi obtida por difração de laser. Por fim a área superficial específica foi determinada pelo método BET por ~~isoterma de adsorção-dessorção de nitrogénio~~ azoto a 77 K [47].

Tabela 2.4 - Características químicas e físicas do resíduo de FCC da Refinaria de Sines [47]

Composição química %												
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	NiO	La ₂ O ₃	LOI
40,30	54,45	0,45	0,06	0,15	0,02	0,43	0,72	0,50	0,33	0,42	0,87	1,05
Propriedades físicas			Densidade (g/m ³)			Superfície específica (m ² /g)			DTP (µm)			
			2,69			150,07			91,65			

Em 2006 foram utilizados aproximadamente 500 000 toneladas deste catalisador em todo o mundo, sendo 20 % das quais foram usadas por refinarias europeias [48].

2. Síntese de conhecimentos

Atualmente sabe-se que são geradas 840 000 toneladas por ano deste resíduo a nível global [49].

Em Portugal são geradas cerca de 1 700 toneladas por ano do resíduo catalítico de FCC. Desta forma, o seu reaproveitamento noutras áreas é uma actividade vantajosa. A Galp Energia é proprietária de uma das maiores refinarias da Europa, implantada em Sines desde 1978 [50], de onde é proveniente o resíduo estudado neste trabalho.

A presente dissertação estuda a introdução deste resíduo na constituição da argamassa cimentícia de ancoragem de armaduras de aço - como substituto parcial do cimento. Esta incorporação resulta (i) numa melhoria na sustentabilidade da construção (secção 1.1) e (ii) em maiores valores da resistência mecânica [20][21][51] - no que respeita às propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

2.4.1.4 Adjuvantes

Adjuvantes são compostos orgânicos ou inorgânicos que se incorporam durante o processo de mistura do cimento em quantidades inferiores a 5 % [24][25][29] da massa do ligante com o objetivo de desenvolver ou modificar propriedades da argamassa no estado fresco ou endurecido [29][23]. Consoante as propriedades que se pretendem alterar utilizam-se diferentes tipos de adjuvantes, existindo por este motivo uma considerável diversidade dos mesmos.

Os adjuvantes podem ser introdutórios de ar, aceleradores e retardadores de presa, redutores de água do tipo plastificantes ou superplastificantes, modeladores de viscosidade, inibidores de corrosão, controladores do desenvolvimento da resistência, hidrófugos, aceleradores e retardadores do endurecimento, por exemplo [24][25].

Tipicamente, em argamassas de ancoragem, são usados como adjuvantes os superplastificantes, redutores de ar (anti espuma) e agentes redutores de crómio.

2.4.1.5 Água

Por fim, mas não menos importante, a água. Uma vez que é responsável, em paralelo com o ligante, por promover as suas capacidades aglutinantes e por conferir a consistência necessária e desejada à aplicação da argamassa. Por isso, a quantidade adequada à formulação das argamassas tem que ser suficiente para a hidratação completa do ligante e dos materiais pozolânicos tendo em consideração a água que será absorvida pelos agregados.

2.5 Propriedades cujos valores são impostos normativamente

A norma NP EN 1504-1 identifica dois tipos de requisitos:

- *requisitos de identificação*: valores que os produtores de argamassas de ancoragem têm que declarar e documentar no que respeita à sua composição e propriedades em termos de consistência da produção
- *requisitos de desempenho*: as propriedades mecânicas, físicas e químicas requeridas dos produtos que garantem estabilidade e durabilidade tanto à argamassa preparada como à estrutura.

Os requisitos de identificação e de desempenho, das argamassas de ancoragem, estão especificados na norma NP EN 1504-6 e encontram-se reproduzidos na **Erro! Auto-referência de marcador inválida.** e Tabela 2.6 respetivamente. Apenas são apresentados os requisitos aplicáveis a argamassas hidráulicas.

Tabela 2.5 - Requisitos de identificação das argamassas de ancoragem impostos pela norma NP EN 1504-6, aplicáveis a argamassas hidráulicas

Propriedade	Método de ensaio	Tolerância sobre os valores fornecidos pelo produtor ^a
Granulometria dos componentes secos	EN 12192-1	Declarados pelo produtor
Resistência à compressão	EN 12190	> 80 % do valor declarado pelo produtor
Tempo de presa	EN 13294	Declarados pelo produtor
Trabalhabilidade – escoamento da argamassa	EN 13395-2	Declarados pelo produtor

^a Elementos a fornecer pelo produtor

Tabela 2.6 - Requisitos de desempenho das argamassas de ancoragem impostos pela norma NP EN 1504-6. Aplicáveis a argamassas hidráulicas.

Caraterística	Método de ensaio	Requisito
Arranque	prEN 1881	Deslocamento ≤ 0,6 mm sob uma força de 75 kN
Teor de cloretos	EN 1015-17	≤ 0,05%

É de referir que, destas propriedades e caraterísticas, foram estudadas no presente TFM a granulometria e a resistência à compressão. No que respeita ao teor dos cloretos, sabe-se que o resíduo não tem cloretos na sua constituição (Tabela 2.4) pelo que se pode aferir que o teor de cloretos não será agravado pela incorporação deste resíduo. Além das propriedades referidas foram adicionadas outras que tecnologicamente também foram consideradas importantes para avaliação do bom desempenho da argamassa (secção 2.4).

2. Síntese de conhecimentos

3 Campanha experimental

O presente trabalho utiliza como referência a argamassa de ancoragem de armaduras de aço comercializada pela empresa *Saint-Gobain Weber* (Anexo A.1). A campanha experimental realizada inclui, para além da preparação da argamassa de referência outras argamassas com três composições distintas decorrentes da substituição parcial de cimento pelo resíduo de FCC, entre 10 % e 30 % (em massa).

A Tabela 3.1 apresenta a designação atribuída às diferentes argamassas preparadas. Estas designações são atribuídas em função da composição do seu ligante i.e, a argamassa produzida pela empresa, sem incorporação de resíduo é designada G_COM (elucidando que se trata de um *Grout* Comercial), e a argamassa com substituição parcial de x % do cimento por resíduo de FCC é designada por G_xFCC.

Tabela 3.1 – Designação atribuída às argamassas em função da composição do ligante

Argamassas	Notação	Composição do ligante (% mássica)	
		Cimento CEM I, 52,5R	Catalisador exausto petroquímico [FCC]
Comercial	G_COM	100%	0%
	G_10FCC	90%	10%
Argamassas com incorporação de FCC	G_20FCC	80%	20%
	G_30FCC	70%	30%

A campanha experimental decorreu no Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, onde foram realizados ensaios de caracterização dos agregados (secção **Erro! origem da referência não foi encontrada.**), bem como ensaios das argamassas no estado fresco (secção 3.4) e no estado endurecido (secção 3.5).

A Tabela 3.2 refere os ensaios, a idade (tempo de hidratação) das argamassas em que os mesmos foram realizados, e as secções deste documento em que o procedimento experimental adotado se encontra descrito.

3. Campanha experimental

Tabela 3.2 - Atividades desenvolvidas na campanha experimental

Atividade		Idade (d)	Secção
	Distribuição do tamanho de partículas	-	Secção Erro! A rigem da referência não foi encontrada.
Caracterização dos agregados	Baridade e volume de vazios	-	Secção 3.1.2
	Equivalente de areia	-	Secção 3.1.3
	Massa volúmica e absorção de água	-	Secção 3.1.4
Preparação das argamassas		-	Secção 3.2
Ensaio no Estado Fresco	Consistência	-	Secção 3.4.1
	Massa volúmica aparente	-	Secção 3.4.2
	Velocidade de propagação dos ultrassons	2, 7, 14, 28, 56 e 91	Secção 3.5.1
	Resistividade elétrica	2, 7, 14, 28, 56 e 91	Secção 3.5.2
	Tração por flexão	7, 14 e 28	Secção 3.5.3.1
Ensaio no Estado Endurecido	Compressão	7, 14 e 28	Secção Erro! A rigem da referência não foi encontrada.
	Varição dimensional	6h, 2, 7, 14, 28, 56 e 91	Secção 3.5.4
	Difusão de Cloretos	28 e 91	Secção 3.5.5
	Aderência	28	Secção 3.5.6

Concretamente, a campanha consistiu na preparação de 15 amostras de cada argamassa em estudo o que conduziu a um total 60 amostras produzidas, para os ensaios no estado endurecido.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais são apresentados, analisados e discutidos na secção 4.

3.1 Constituintes

Na campanha experimental foram utilizados como constituintes da argamassa materiais fornecidos pela *Saint-Gobain Weber*:

- Cimento, CEM I 52,5R – pó de cor cinza, com distribuição do tamanho de partículas (DTP) inferior ou igual a 0,315 µm
- Fumo de sílica – pó de cor cinza, com dimensão de partículas entre 0,1 e 0,5 µm e densidade do pó não compactados entre 0,5 e 0,6 g/ml
- Superplastificante - pó de melamina sulfonada, com perda de massa por calcinação a 500 °C entre 71 % e 78 % em massa
- Anti-espuma (reductor de ar) – pó de cor branca, composto por mistura em sílica (42 % matéria activa), com perda de massa a 500 °C entre 45 e 65 % em massa
- Cem-protector P (reductor de crómio VI) - pó com 10 % de sulfato de estanho

Algumas argamassas ainda incorporaram na sua constituição o resíduo de FCC – pó de cor branca, proveniente da refinaria Petrogal de Sines.

A atividade experimental teve início com a caracterização dos agregados que constituem as argamassas em estudo.

3.1.1 Distribuição do tamanho de partículas dos agregados

Este ensaio pretende determinar a distribuição de tamanho das partículas (DTP) através da separação da amostra, por meio de um conjunto de peneiros. Com este ensaio é possível obter informação sobre a curva granulométrica, a mínima e máxima dimensão do agregado, o módulo de finura e a percentagem de finos dos agregados.

Segundo a norma EN 12192-1 os peneiros são organizados de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas das suas redes. Desta forma, através da agitação dos peneiros, fica retida em cada peneiro a porção da amostra inicial cujas partículas têm dimensão superior à da abertura da rede do peneiro em causa.

A Tabela 3.3 refere os materiais necessários à realização deste ensaio.

Tabela 3.3 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de DTP

Equipamentos e utensílios	Materiais
Balança de precisão ± 0,01g	
Peneiros de ensaios com aberturas especificadas na norma NP EN 933-2	Amostra de agregado

3. Campanha experimental

Tampa e recipiente do fundo
Estufa ventilada
Equipamentos de lavagem
Tabuleiros
Escovas

Procedimento experimental de acordo com a norma EN 12192-1:2002

- Definir e pesar a massa da amostra de sólidos a utilizar neste ensaio. A massa mínima a utilizar em função da dimensão máxima dos agregados é definida pela norma NP EN 933-2, reproduzida na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Massa mínima da amostra de agregado a ensaiar, segundo a norma EN 933-2

Dimensão máxima do agregado (mm)	Massa mínima da amostra (kg)
63	40,0
32	10,0
16	2,6
8	0,6
<4	0,2

Nos agregados em estudo a máxima dimensão das partículas é inferior a 4 mm. Por este motivo as amostras ensaiadas apresentaram aproximadamente 200 g.

- Secar a amostra a 110 ± 5 °C até atingir a massa constante
 - a massa é considerada constante quando pesagens sucessivas – com um intervalo de pelo menos 1 h – não diferirem mais de 0,1 %
- Pesar a massa da amostra seca, registar M_1
- Lavar ambos os lados do peneiro 0,063 mm e colocar por cima um peneiro de proteção - 1 ou 2 mm - para que nele fiquem retidas as partículas de maiores dimensões
- Deitar a amostra sobre o peneiro superior e lavar até a água sair límpida do peneiro de 0,063 mm
- Colocar a amostra retida no peneiro com a abertura da rede igual a 0,063 mm na estufa, a 110 ± 5 °C, até atingir a massa constante
- Deixar arrefecer, pesar e registar o resultado, M_2 .

Nesta fase é iniciada a peneiração propriamente dita. Uma vez que o agregado calcário utilizado neste trabalho interage com a água, as amostras deste material e as misturas preparadas com o mesmo não foram lavadas, conforme indicado pela norma NP EN 933-1, e por esse motivo o procedimento inicia-se depois desse passo.

3. Campanha experimental

- Selecionar os peneiros a serem utilizados
- Formar uma coluna dispondo os peneiros de forma a começar pelo que tenha a abertura de rede imediatamente superior à máxima dimensão do inerte, e incluir o fundo e a tampa (Figura 3.1.a)
- Despejar a amostra lavada e seca na coluna de peneiros (Figura 3.1.b)
- Agitar a coluna de peneiros manualmente
- Retirar os peneiros um a um, agitar cada peneiro, ainda na coluna, de forma a garantir que não existe perda de material

Para evitar a sobrecarga dos peneiros, a massa volúmica normal retida em cada peneiro deve ser inferior a $\frac{A \times \sqrt{d}}{200}$ sendo,

A – área do peneiro, mm²

d – dimensão máxima da abertura da rede do peneiro, mm

- Pesar a amostra retida em cada peneiro e registar a massa (R_i), assim como os finos depositados no fundo (P) (Figura 3.1.c).



Figura 3.1 – Fases do ensaio de análise granulométrica. a) Coluna de peneiros; b) Despejo da amostra nos peneiros; c) Pesagem.

3.1.2 Baridade e volume de vazios dos agregados

A baridade é a massa do volume do agregado que enche um recipiente de volume conhecido [18]. Este conceito relaciona-se com o da massa volúmica. Contudo, a massa volúmica é a relação entre a massa de um corpo e o seu volume. No caso concreto de agregados, este conceito consiste na razão entre a massa das partículas

3. Campanha experimental

individuais e a soma dos volumes dessas partículas não considerando os vazios que existem entre elas, decorrente da impossibilidade física de ajustar as partículas de forma que não existam vazios entre elas.

Tendo, em consideração o exposto a baridade é determinada pelo quociente entre a massa do agregado e o volume que o mesmo ocupa e depende (i) da forma das partículas do agregado, (ii) do arranjo das partículas no recipiente e (iii) do grau de compactação.

Os materiais apresentados na Tabela 3.5 devem estar em conformidade com os valores da prEN 932-5 como define a norma NP EN 1097-3:2002.

Tabela 3.5 - Equipamentos, utensílios e materiais para a determinação da baridade

Equipamentos e utensílios	Materiais
Recipiente com a capacidade mínima definida recorrendo à Tabela 3.6	
Balança de precisão $\pm 0,01$ g	
Colher	Amostra de agregado
Régua	
Termómetro, com resolução 1 °C	
Estufa	
Placa de vidro	

Tabela 3.6 – Capacidade mínima do recipiente em função da máxima dimensão do agregado

Máxima dimensão do agregado (mm)	Capacidade (l)
Até 4	1,0
Até 16,0	5,0
Até 31,5	10
Até 63	20

Todos os agregados em análise têm a máxima dimensão inferior a 4mm, assim foi sempre usado o mesmo recipiente.

Procedimento experimental de acordo com a norma NP EN 1097-3:2002

- Pesar o recipiente vazio, limpo e seco (Figura 3.2.a)
- Registrar M_1
- Pousar o recipiente numa superfície horizontal e enche-lo, com a colher, até transbordar (Figura 3.2.b)
- Rasar o excedente existente no cimo do recipiente, sem compactar nenhuma parte da superfície superior (Figura 3.2.c e Figura 3.2.d)

- Pesar o recipiente e registrar a massa, M_2 (Figura 3.2.e)
- Repetir o ensaio sobre três amostras.

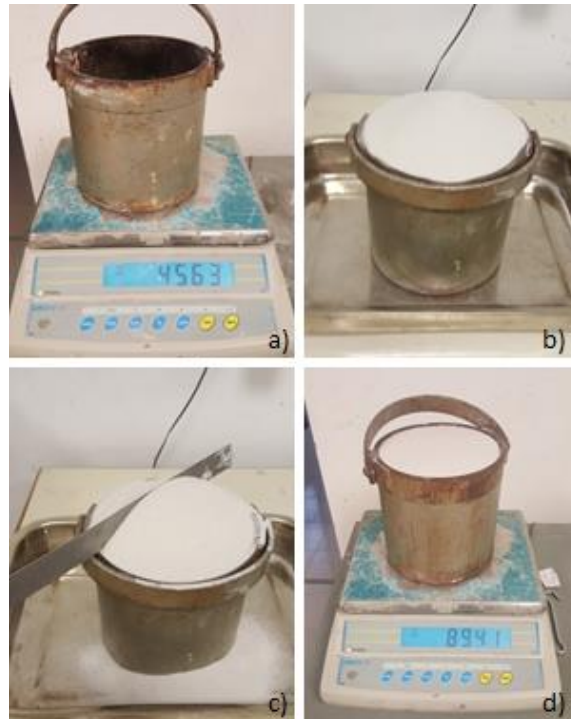


Figura 3.2 – Fases do ensaio de determinação da baridade. a) Determinação de M_1 ; b) Enchimento do recipiente; c) Rasamento do excedente; d) Recipiente pronto para a pesagem; e) Determinação de M_2

3.1.3 Equivalente de areia

O ensaio do equivalente de areia pretende avaliar a quantidade e a qualidade de elementos finos contidos numa amostra.

Na Tabela 3.7 são apresentados os materiais utilizados no ensaio.

Tabela 3.7 – Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio do equivalente de areia

Equipamentos e utensílios	Materiais
Provetas graduadas com duas marcas de referência	Amostras dos agregados
Pistão de ensaio	Cloreto de cálcio cristalino ou cloreto de cálcio anidro
Cronómetro	Glicerina, 99% de glicerol
Régua de 500 mm	Solução de formaldeído, 40% em volume
Peneiros de ensaio de 0,063 mm, de 2 mm e de resguardo	Água destilada ou desmineralizada
Escova de peneiros	
Espátula	

3. Campanha experimental

Tubo de lavagem
Frasco de vidro de 5 L
Tubo de borracha ou plástico
Funil
Máquina de agitação
Termómetro, com resolução 1°C
Balança de precisão $\pm 0,01$ g

Procedimento experimental segundo a norma NP EN 933-8:2014

A realização deste ensaio requer a utilização de uma solução de cloreto de cálcio para lavagem da amostra, sendo por isso necessário começar pela sua preparação.

- Preparar a solução concentrada de cloreto de cálcio
 - Dissolver 219 g de cloreto de cálcio em 350 ml de água destilada
 - Deixar arrefecer até à temperatura ambiente
 - Adicionar 480 g de glicerina e 12,5 g de uma solução de formaldeído
 - Diluir com água destilada até se obter 1 L de solução
- Preparar a solução de lavagem
 - Diluir 125 ml da solução concentrada preparada anteriormente em água destilada até obter 5 L
- Determinar a percentagem de finos – partículas com DTP inferior a 0,063 mm - a fim de calcular a massa total da amostra a ensaiar
 - Através do ensaio granulométrico foi possível calcular que a percentagem de finos é inferior a 10% em massa da amostra. Assim, a massa de cada provete elementar deve ser calculada pela equação:

$$M_T = \frac{120(100+w)}{100} g$$

- Preparar três amostras de 120 g – areias com DTP inferior a 2 mm
- Encher cada proveta com a solução de lavagem até ao traço de referência inferior (Figura 3.3.a)
- Introduzir a amostra de 120 g em cada proveta com a ajuda de um funil (Figura 3.3.b)
- Com a palma da mão dar ligeiras pancadas na base da proveta para soltar as bolhas de ar
- Esperar 10 min para as amostras repousarem
- Tapar a proveta com uma rolha de borracha e fixá-la na máquina de agitação automática (Figura 3.3.c)
- Ligar a máquina - 90 ciclos em 30 s (Figura 3.3.d)
- Pousar a proveta na posição vertical e retirar a rolha de borracha

3. Campanha experimental

- Enxaguar a rolha e as paredes da proveta com a solução de lavagem, garantindo que todo o material cai dentro da proveta
 - Empurrar o tubo de lavagem até ao fundo da proveta e continuar de encher
 - Subir lentamente o tubo com movimentos circulares até retirá-lo de forma a manter a solução no traço de referência superior (Figura 3.3.e)
- Repetir o processo de vibração para as restantes provetas

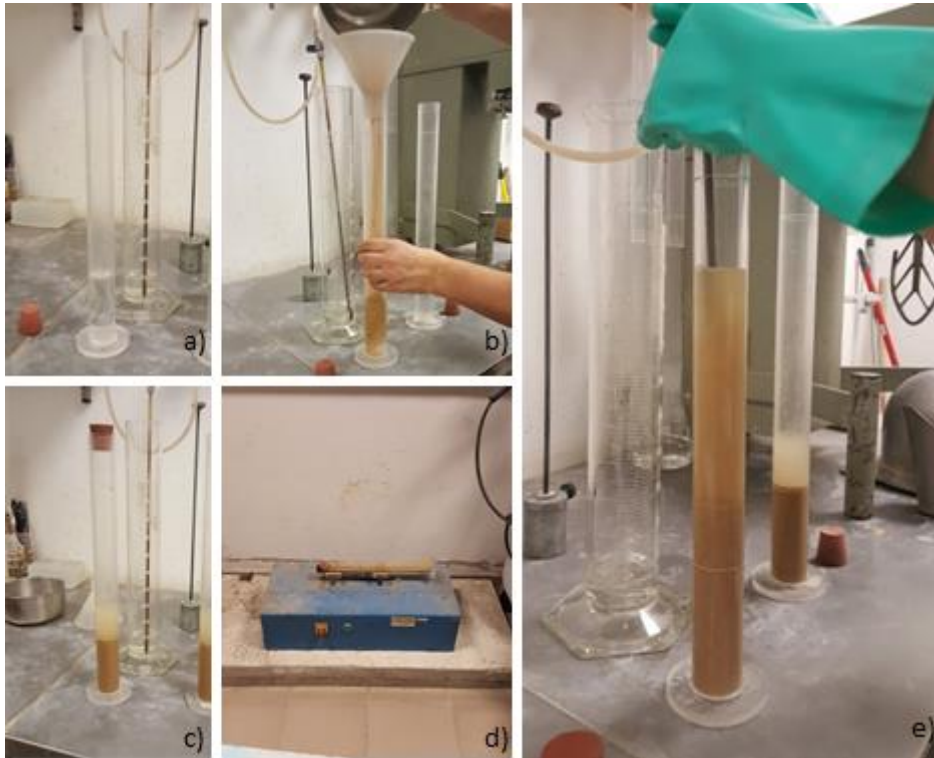


Figura 3.3 - Fases da determinação do ensaio de equivalente de areia. a) Provetas com a solução de lavagem até ao traço de referência inferior; b) Introdução da amostra de areia na proveta; c) Provetas e amostra após os 10 min de repouso; d) Provetas na máquina de agitação; e) Enchimento da proveta com a solução de lavagem.

- Deixar o conjunto assentar durante 20 min (Figura 3.4.a)
- Medir h_1 da camada superior do floculado até à base da proveta (Figura 3.4.b)
 - Baixar cuidadosamente o conjunto mergulhador na proveta, até que a ponta assente sobre o sedimento
 - Localizar o anel no topo do cilindro e bloqueá-lo no varão do mergulhador
- Determinar a altura de sedimento h_2 (Figura 3.4.c) medindo a distância entre a face inferior da cabeça do mergulhador e a face superior do anel, utilizando a régua graduada inserida na ranhura do anel
- Registar as alturas h_1 e h_2 (arredondadas ao mm).

3. Campanha experimental



Figura 3.4 – Continuação do ensaio Fases da determinação de equivalente de areia. a) Proveta após o repouso de 20 min; b) Medição de h_1 ; c) Medição de h_2 .

3.1.4 Massa volúmica e absorção de água dos agregados

Tal como redigido na secção 3.1.2, a massa volúmica é a razão entre a massa de um corpo e o seu volume, no caso concreto de agregados consiste na razão entre a massa das partículas individuais que os constituem e a soma dos volumes dessas partículas não considerando os vazios que existem entre elas.

Segunda a norma NP EN 1097-6, a massa é determinada pela pesagem da amostra saturada com a superfície seca e outra pesagem com a amostra seca em estufa. O volume é determinado pela massa de água deslocada por pesagens consecutivas no método do picnómetro [52]. Na Tabela 3.8 são referidos os materiais necessários para a sua realização.

Tabela 3.8 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de determinação da massa volúmica e absorção de água dos agregados

Equipamentos e utensílios	Materiais
Balança de precisão $\pm 0,01$ g	
Peneiro 4 mm e 0,063 mm	
Picnómetro	
Funil	Amostra de agregados
Banho Maria	Água
Termómetro, com exactidão 0,1 °C	
Tabuleiro	
Pano seco	

Equipamento de lavagem
Molde metálico
Pilão metálico
Estufa ventilada
Cronómetro

Procedimento baseado a norma NP EN 1097-6:2003

Preparação da amostra

- Pesar uma amostra mínima de 1 kg
- Lavar a amostra sobre o peneiro 4 mm e 0,063 mm
 - Remover todas as partículas finas
 - Rejeitar as partículas retidas no peneiro superior

Procedimento do ensaio

- Colocar água (22 ± 3 °C) no picnómetro e imergir a amostra
- Agitar e rodar o picnómetro em posição inclinada de forma a eliminar o ar (Figura 3.5.a)
- Deixar o picnómetro em banho Maria e manter a amostra a 22 ± 3 °C, durante $24 \pm 0,5$ h (Figura 3.5.b)
- Decorridas as 24 h, agitar e rodar o picnómetro para retirar o ar
- Encher o picnómetro por adição de água até transbordar (Figura 3.5.c)
- Tapar sem deixar entrar ar e limpar o picnómetro por fora
- Pesar o picnómetro cheio, registar M_2
- Registrar a temperatura da água
- Decantar e esvaziar o picnómetro sobre um tabuleiro
- Encher o picnómetro com água e tapar novamente
- Secar e pesar de novo o picnómetro, registar M_3 (Figura 3.5.d)
- Registrar a temperatura da água
 - As diferenças da temperatura da água quando se determina M_2 e M_3 não podem ser superiores a 2 °C
- Espalhar a amostra numa camada uniforme sobre o tabuleiro
- Expor o agregado a uma corrente de ar morno até que não seja visível humidade superficial e as partículas não adiram umas às outras
- Deixar arrefecer, remexendo a amostra
- Verificar que a superfície se encontra seca
 - Colocar o molde troncocónico com a maior abertura para baixo sobre o tabuleiro (Figura 3.5.e)
 - Encher o molde, com a amostra em processo de secagem

3. Campanha experimental

- Apiloar levemente a superfície com 25 pancadas (Figura 3.5.f)
 - Levantar o molde
 - Verificar se a amostra mantém a forma do molde (Figura 3.5.g)
 - Repetir o processo de secagem até a amostra de desmoldar após a remoção do molde troncocónico (Figura 3.5.h)
- Pesar a amostra saturada com a superfície seca, registrar M_1
 - Secar a amostra na estufa a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até à massa constante
 - Pesar o agregado seco, registrar M_4 .



Figura 3.5 - Fases do ensaio de determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados. a) Rotação do picnómetro; b) Amostras em banho Maria; c) Enchimento do picnómetro com água; d) Pesagem do picnómetro cheio de água; e) Molde cheio com a amostra de areia; f) Apiloamento da amostra; g) Amostra em processo de secagem; h) Amostra pronta para a pesagem

Registrar todas as massas com exactidão igual ou superior a 0,1% da massa M_4 .

A norma NP EN 1097-6 refere que este ensaio deve ser realizado em duplicado, no entanto, a fim de obter uma maior precisão dos resultados são utilizadas três provetas e não duas.

3.2 Preparação das argamassas

O procedimento experimental utilizado na preparação das argamassas é o utilizado pela empresa *Saint-Gobain Weber* na preparação da “argamassa comercial de ancoragem” com o objetivo de reproduzir a argamassa que comercializa.

A argamassa de ancoragem que a empresa comercializa, e que neste trabalho se reproduz para usar como referência, é uma argamassa monocomponente, i.e, é comercializada como uma mistura homogénea dos seus constituintes sólidos (Tabela 3.9) à qual o utilizador apenas tem que adicionar água. Por este motivo, também nas argamassas preparadas neste trabalho se começou por preparar a mistura homogénea dos seus constituintes sólidos.

Tabela 3.9 - Composição das argamassas

Constituintes	Quantidade %			
	G_COM	G_10FCC	G_20FCC	G_30FCC
Ligante:				
Cimento Cinza CEM I, 52,5R	35	31,5	28	24,5
Resíduo FCC	0	3,5	7	10,5
Fumo de sílica	2	2	2	2
Areia 0,315 ($\emptyset < 0,315 \mu\text{m}$)	10	10	10	10
Sólidos				
Areia 0,63 ($\emptyset < 0,5 \text{ mm}$)	17	17	17	17
Areia 1,25 ($\emptyset < 1,2 \text{ mm}$)	15	15	15	15
Agregado calcário ($\emptyset 1,5 \text{ a } 3 \text{ mm}$)	20	20	20	20
Superplastificante	0,5	0,5	0,5	0,5
Anti-espuma	0,1	0,1	0,1	0,1
Agente redutor de crómio VI	0,035	0,035	0,035	0,035
Água	13,00	13,50 (*)	14,25 (*)	15,40 (*)

(*) O Teor em água foi determinado de forma a assegurar igual diâmetro de espalhamento das argamassas (secção 3.3) com incorporação de resíduo e da argamassa de referência que é $218,1 \pm 2,0 \text{ mm}$.

3. Campanha experimental

Procedimento de preparação das argamassas

Como já foi referido as argamassas foram preparadas seguindo o procedimento interno usado na empresa *Saint-Gobain Weber*.

A

Tabela 3.10 refere todos os materiais necessários à preparação das argamassas.

Tabela 3.10 - Equipamentos, utensílios e materiais utilizados para a preparação das argamassas

Equipamentos e utensílios	Materiais
Balança com precisão $\pm 0.01g$	
Misturadora <i>Petra</i>	Constituintes sólidos
Cronómetro	Água
Colher	

A misturadora utilizada é da marca *Perta* com uma capacidade máxima de 2 litros e é normalizada de acordo com a norma NP EN 196-1.

O procedimento experimental adotado na preparação das argamassas é o seguinte:

- pesar os sólidos por ordem decrescente de finura, ou seja, agregado calcário, areia chorreiro, areia 0,63 e areia 0,315 (Tabela 3.9) - só depois os restantes sólidos
- misturar os sólidos (Tabela 3.9), com a colher, até se obter um produto homogéneo
- pesar a quantidade de água (Figura 3.6.a) conforme apresentada na Tabela 3.9
- colocar a água no copo da misturadora e só depois adicionar o monocomponente (Figura 3.6.b)
- ligar a misturadora por 30 segundos a 140 ± 5 rotações por minuto (Figura 3.6.c)
- desligar o equipamento e retirar a argamassa pronta para ser utilizada (Figura 3.6.d), quer para a realização dos ensaios no estado fresco quer para moldar as amostras para os ensaios no estado endurecido.



Figura 3.6 - Fases do processo de amassadura. a) Pesagem dos constituintes; b) Adição do monocomponente à água previamente colocada no copo de mistura; c) Mistura; d) Argamassa no estado fresco.

3.3 Determinação da quantidade de água das argamassas

O resíduo de FCC utilizado neste trabalho apresenta uma elevada área superficial específica que lhe confere uma elevada afinidade com a água (secção 2.4.1.3) pelo que a sua incorporação em materiais à base de cimento conduz tipicamente à necessidade do aumento da quantidade de água [20][21][43][53][54] da mistura para o mesmo valor de trabalhabilidade (secção 4.2.1). Uma vez que as argamassas G_10FCC, G_20FCC e G_30FCC têm o resíduo incorporado na sua composição (Tabela 3.9) surge a necessidade de redefinir a quantidade de água para cada uma.

Nas argamassas de ancoragem é importante manter a sua consistência inalterada. De forma a garantir a mesma trabalhabilidade em todas as argamassas, realizam-se os ensaios de consistência com recurso à mesa de espalhamento (secção 3.4.1). Este ensaio é realizado inicialmente para a argamassa G_COM, uma vez que a quantidade de água desta argamassa é previamente definida pela *Saint-Gobain Weber* como sendo 13 % da massa total de argamassa produzida (Tabela 3.9).

O valor do diâmetro obtido no ensaio (secção 3.4.1) foi registado - $218,1 \pm 2,0$ mm – e assumido como o diâmetro de espalhamento, de referência, obtido na mesa.

3. Campanha experimental

Nas outras argamassas com incorporação de resíduo de FCC repetiu-se o procedimento, i.e, após a sua preparação foram realizados ensaios de consistência por espalhamento (secção 3.4.1). Desta vez foram utilizados diferentes teores de água para que desta forma se pudesse alcançar os mesmos valores de espalhamento. Quando se acertou a quantidade de água, foram registadas as percentagens de água a utilizar em cada argamassa (Tabela 3.9).

3.4 Ensaios das argamassas no estado fresco

Os ensaios efetuados para a caracterização das argamassas, no estado fresco consistiram na determinação das seguintes propriedades: consistência por espalhamento e massa volúmica, conforme apresentado na Tabela 3.2.

3.4.1 Consistência (pela mesa de espalhamento)

O ensaio de consistência é realizado para determinar a consistência das argamassas no estado fresco recorrendo à avaliação do diâmetro de espalhamento de acordo com o procedimento descrito na norma EN 1015-3:1999. Desta forma é possível analisar a influência da quantidade de água e o efeito da incorporação de resíduos na composição do ligante [55]. A Tabela 3.11 indica os materiais que são utilizados.

Tabela 3.11 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de espalhamento

Equipamentos e utensílios	Materiais
Molde troncocónico	
Pano húmido	
Mesa de espalhamento	Argamassa formulada
Colher	
Cronómetro	
Régua metálica de 500 mm	

Procedimento baseado na norma EN 1015-3:1999

- Preparar a mesa e o molde troncocónico (Figura 3.7.a)
 - Humedecer a superfície interna do molde troncocónico assim como a superfície da mesa de espalhamento com um pano húmido
 - Colocar o molde troncocónico centrado na mesa de espalhamento
- Recuperar o copo da misturadora com a argamassa acabada de preparar (secção 3.2)

- Mexer suavemente a argamassa no estado fresco durante 5 a 10 segundos
- Preencher o molde troncocónico, com a argamassa (Figura 3.7.b)
- Rasar o excesso com a régua (Figura 3.7.c)
- Retirar o molde e rodar o manípulo por forma a dar quinze pancadas - uma por segundo (Figura 3.7.d e Figura 3.7.e)
- Medir o diâmetro de espalhamento em duas direções ortogonais (Figura 3.7.f)
- Registrar os valores.

Para reproduzir o procedimento de mistura utilizado na preparação da argamassa comercial da *Saint-Gobain Weber* implementaram-se as seguintes alterações ao procedimento da norma: (i) o molde é cheio por duas vezes e (ii) em cada camada de enchimento a argamassa é compactada com 10 pancadas. Desta forma o procedimento realizado difere do definido pela norma.



Figura 3.7 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento. a) Preparação do equipamento; b) Enchimento do molde; c) Rasamento da argamassa excedente; d) Argamassa pronta para o ensaio; e) Remoção do molde e batimentos f) Medições

3.4.2 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco é determinada pelo quociente da sua massa e pelo volume que ele ocupa quando é apenas introduzido,

3. Campanha experimental

ou introduzido e compactado num recipiente de volume conhecido. Este ensaio é realizado com base na norma EN 1015-6:1998, que define a utilização dos materiais (Tabela 3.12) e o procedimento a baixo descritos.

Tabela 3.12 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio da massa volúmica

Equipamentos e utensílios	Materiais
Panos	
Recipiente de volume conhecido	
Balança de precisão $\pm 0,1$ g	Argamassa acabada de preparar
Colher	
Régua de 500 mm	

Procedimento segundo a norma EN 1015-6:1998

- Limpar o recipiente com um pano seco

Pesar a massa do recipiente (M_1) (

- Figura 3.8.a)
- Recuperar o copo da misturadora com a argamassa acabada de preparar (secção 3.2)

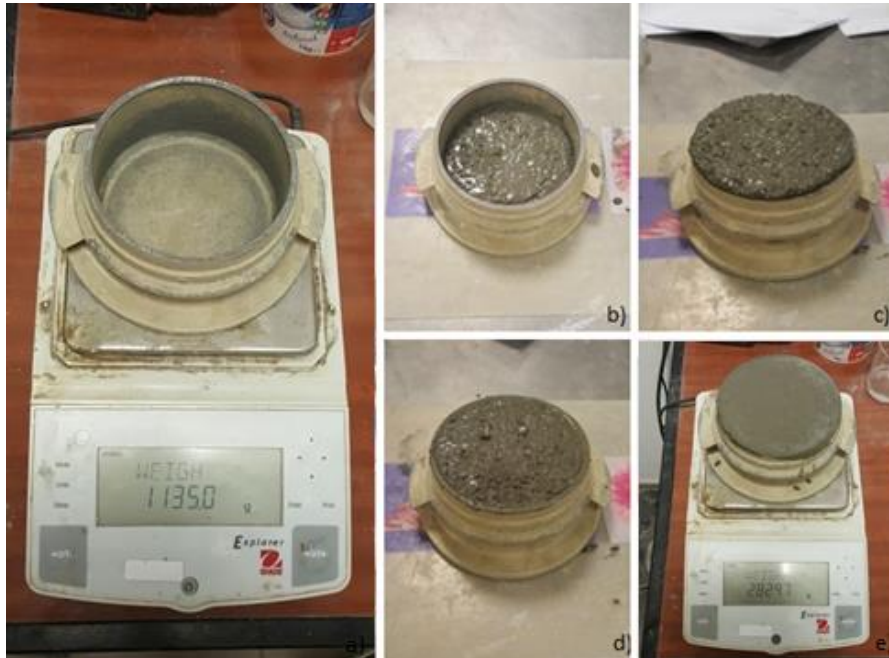


Figura 3.8 – Fases do ensaio de determinação da massa volúmica. a) Determinação de M_1 ; b) Enchimento de metade da capacidade e compactação; c) Enchimento da totalidade do recipiente; d) Molde após a compactação e rasamento; e) Determinação de M_2

- Mexer a argamassa, com a colher, por 5/10 s

Colocar a argamassa acabada de preparar até meio do recipiente (

- Figura 3.8.b)
- Levantar alternadamente os lados do recipiente cerca de 30 mm, deixando cair o bordo suspenso por forma a compactar a argamassa
- Repetir até perfazer dez batimentos

Completar até ao limite o recipiente com a argamassa e repetir os batimentos (

- Figura 3.8.c)

Rasar o excesso com a régua (

- Figura 3.8.d)

Determinar a massa, desta vez com o recipiente cheio (

- Figura 3.8.e).

3.5 Ensaios das argamassas no estado endurecido

Após a realização dos ensaios no estado fresco (secção 3.4) as argamassas são colocadas em moldes com formas e dimensões diferentes em função dos ensaios no estado endurecido que se pretende posteriormente realizar.

A Tabela 3.13 apresenta os moldes utilizados para cada ensaio.

Tabela 3.13 – Forma e dimensão dos moldes utilizados para moldar a argamassa para os ensaios no estado endurecido

Ensaio	Molde	
	Forma	Dimensões (mm)
Ultrassons		
Resistividade elétrica	Prismático	40 x 40 x 160
Resistência mecânica		
Varição dimensional	Prismático	100 x 100 x 400
Difusão de cloretos	Cilíndrico	∅ 100 L = 250
Aderência	Prismático	15 x 230 x 230

Os ensaios realizados no estado endurecido podem ser classificados em destrutivos - e não destrutivos. Neste trabalho os ensaios não destrutivos – ultrassons, resistividade elétrica, difusão de cloretos e variação dimensional (Tabela 3.2) - são realizados para o maior número de idades possível, não coincidindo sempre as mesmas idades para todas as amostras, com exceção das idades correspondentes aos 2, 7, 14, 28, 56 e

3. Campanha experimental

91 dias, referidas na Tabela 3.2. Desta forma é possível aumentar a precisão dos resultados.

3.5.1 Velocidade da propagação de ultrassons

O ensaio para determinação da velocidade de propagação de ultrassons é classificado como ensaio não destrutivo. Na engenharia civil, os ensaios não destrutivos são bastante utilizados (i) por não causarem danos na estrutura em análise e (ii) devido à sua simplicidade [56].

Este ensaio consiste na emissão de ondas no interior de uma amostra de forma a percorrerem uma distância conhecida, sendo registado o tempo. Em amostras porosas as ondas emitidas no seu interior são propagadas a menor velocidade [9], assim quanto maior for o valor da velocidade mais compacta é a amostra [57].

Desta forma o ensaio pretende avaliar a compactação, ou presença de vazios, no interior de uma amostra através das tendências obtidas nos resultados ao longo do período do ensaio.

A determinação da velocidade de propagação dos ultrassons permite ainda calcular o módulo de elasticidade dinâmico. A norma NBR 15630 define um método de ensaio não-destrutivo para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação das ondas ultrassónicas numa amostra.

As amostras utilizadas neste ensaio são as prismáticas (Tabela 3.13) moldadas conforme descrito no ensaio de resistência mecânica, na secção 3.5.3 apresentada mais à frente. Os materiais utilizados encontram-se indicados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de propagação de ultrassons

Equipamentos e utensílios	Materiais
Equipamento PROCEQ Tico test	
Barra de calibração	
2 transdutores (de 54 kHz)	
Superfície não condutora	Amostras prismáticas
Espátula	Vaselina
Panos	
Balança de precisão $\pm 0,01g$	

Procedimento de acordo com a norma EN 12504-4:2007

Antes de se iniciar o ensaio, o equipamento foi calibrado, utilizando a barra disponibilizada pelo fabricante do equipamento para esse mesmo efeito. Para a calibração foi necessário:

- impor, no equipamento, a dimensão da amostra para a dimensão da barra de calibração - 0,13 m
- aplicar vaselina sólida, com a espátula, nas extremidades da barra de referência
- colocar os transdutor-emissor e transdutor-recetor das ondas ultrassónicas nos topos mais distantes da barra (Figura 3.9.a)
- iniciar a calibração - verificar o tempo percorrido pelo impulso elétrico de frequência ultra-sónica 54 kHz, entre o emissor e o recetor
- repetir até obter o tempo igual a 20,1 μs (valor definido pelo fabricante do aparelho) (Figura 3.9.b)
- voltar a alterar a dimensão no equipamento para 0,16 m – dimensão das amostras a ensaiar.



Figura 3.9 – Calibração do equipamento. a) Utilização da barra de calibração; b) Equipamento após atingir os 20,1 μs

Após a calibração do equipamento iniciar o ensaio propriamente dito, respeitando os seguintes passos:

- retirar a amostra da água no momento do ensaio, e limpar o excesso de água (Figura 3.10.a)
- determinar a massa de amostra (Figura 3.10.b)
- colocar a amostra sobre a superfície não condutora, entre os transdutores previamente untados com vaselina (Figura 3.10.c)
- induzir movimentos circulares para que os transdutores alcancem um melhor contacto com a amostra

3. Campanha experimental

Tentar fazer sempre a mesma pressão com as mãos nos transdutores. Contudo evitar o contacto das mãos diretamente com os transdutores interpondo uma superfície não condutora.

- Acionar o botão para o equipamento emitir um impulso elétrico de frequência ultra-sónica 54 kHz (Figura 3.10.d)
- Registrar o tempo, em μs , medido pelo equipamento (Figura 3.10.e)
- Repetir a leitura, de forma a registar dois valores de tempo decorrido
 - entre as leituras da mesma amostra, afastar os transdutores dos pontos de medição e voltar a juntar para garantir um melhor contacto
- Retirar o excesso de vaselina das amostras para que estas possam ser usadas nos restantes ensaios e/ou noutras idades.



Figura 3.10 – Fases do ensaio de determinação dos ultrassons. a) Limpeza do excesso de água superficial da amostra; b) Determinação da massa da amostra; c) Untar com vaselina os topos da amostra; d) Emissão das ondas pelos transdutores, no interior da amostra; e) Registo do tempo medido.

Expressão de resultados

A velocidade da propagação dos ultrassons é determinada pela equação (6).

$$v = \frac{L(m)}{t(s)} \quad (6)$$

sendo,

v – velocidade da propagação dos ultrassons (m/s)

L – distância entre os transdutores que corresponde ao percurso percorrido pelo ultrassom (m)

t – tempo de propagação do ultrassom entre os transdutores (s)

O tempo é medido electronicamente e são registados os dois valores para que nos cálculos se possa utilizar um valor médio, arredondado à unidade.

Com os resultados obtidos neste ensaio ainda se calculou o Módulo de Elasticidade Dinâmico das argamassas, para tal recorreu-se à equação (7):

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (7)$$

Onde,

E_d – módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

v – velocidade de propagação da onda ultrassónica (mm/ μ s)

ρ – densidade da massa aparente do corpo-prova (kg/m³)

μ – coeficiente de Poisson, para o qual se assumiu o valor típico de 0,2.

3.5.2 Resistividade elétrica

À semelhança do ensaio de propagação dos ultrassons, os valores obtidos no ensaio da resistividade elétrica permitem concluir sobre o interior da argamassa, como por exemplo se o material se encontra compacto ou poroso uma vez que quanto mais compacto for o material, maior será a resistividade elétrica do mesmo. Consequentemente a compacidade do material permite concluir sobre a sua resistência mecânica e durabilidade. Também é possível concluir acerca do estado de endurecimento do mesmo, pois a resistividade elétrica aumenta à medida que esse processo progride [58] devido à densificação da matriz cimentícia que ocorre com o passar do tempo de hidratação.

As amostras utilizadas foram as moldadas para o ensaio de resistência mecânica (Tabela 3.13), tal como no ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons (secção 3.5.1).

A Tabela 3.15 apresenta os materiais necessários à realização deste ensaio.

Tabela 3.15 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio para determinação da resistividade elétrica

Equipamentos e utensílios	Materiais
---------------------------	-----------

3. Campanha experimental

Pano	
Fonte de alimentação	Amostras prismáticas
2 elétrodos	
Multímetro	

Procedimento experimental

- Ligar o multímetro à fonte de alimentação (Figura 3.11.a)
- Retirar as amostras da cura no momento do ensaio
- Limpar com um pano o excesso de água (Figura 3.11.b)
- Colocar os elétrodos, um em cada topo das amostras (Figura 3.11.c)
 - colocar um peso de 2 kg (Figura 3.11.d), no topo superior, de forma a garantir um contacto uniforme do elétrodo com a amostra
- Ligar a fonte de alimentação
- Registrar o valor da intensidade de corrente, mA, lido através do multímetro.



Figura 3.11 - Fases do ensaio de resistividade elétrica. a) Amostra seca superficialmente; b) Equipamento ligado, pronto para o ensaio; c) Registo do valor da resistividade elétrica; d) Peso de 2kg utilizado na realização do ensaio

Expressão de resultados

O cálculo da resistividade faz-se através da aplicação da equação (8)

$$R = \frac{T}{I} \times \frac{A}{L} \quad (8)$$

sendo,

R – resistividade elétrica ($\Omega.m$)

T – tensão aplicada (V)

I – intensidade de corrente elétrica (A)

A – área da secção transversal da amostra (m^2)

L – comprimento da amostra ou distância entre elétrodos (m)

3.5.3 Resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica realizados nesta campanha experimental são o ensaio de tração por flexão e o ensaio de compressão. Os moldes utilizados são os previamente indicados na Tabela 3.13 e apresentam-se na Figura 3.12.

Nestes ensaios são utilizadas nove amostras para cada argamassa - três amostras para cada uma das três idades dos ensaios uma vez que estes são destrutivos (Tabela 3.2).



Figura 3.12 - Moldes prismáticos com 40 x 40 x 160 mm

O processo de moldagem segue o procedimento indicado pela *Saint-Gobain Weber*.

- Untar os moldes com óleo desmoldante de forma a, no final, facilitar a desmoldagem das amostras

3. Campanha experimental

- Preencher cada um dos três moldes com argamassa, até metade da sua capacidade, e compactar (Figura 3.13.a) – 15 batidas levantando alternadamente cada um dos topos
- Acabar de encher os moldes e repetir, de igual forma, a compactação (Figura 3.13.b)
- Remover a argamassa em excesso num movimento a partir do meio do molde para o seu exterior com o auxílio de uma régua metálica que permitiu ainda nivelar a superfície (Figura 3.13.c)
- Terminar a moldagem das amostras - as amostras foram limpas e identificadas minimizando assim as hipóteses de trocas futuras
- Deixar os moldes a curar durante 20 a 24 h
- Desmoldar e identificar as amostras (Figura 3.13.d) com o nome da argamassa conforme apresentado na Tabela 3.1
- Manter as amostras a curar em água até às idades de ensaio.

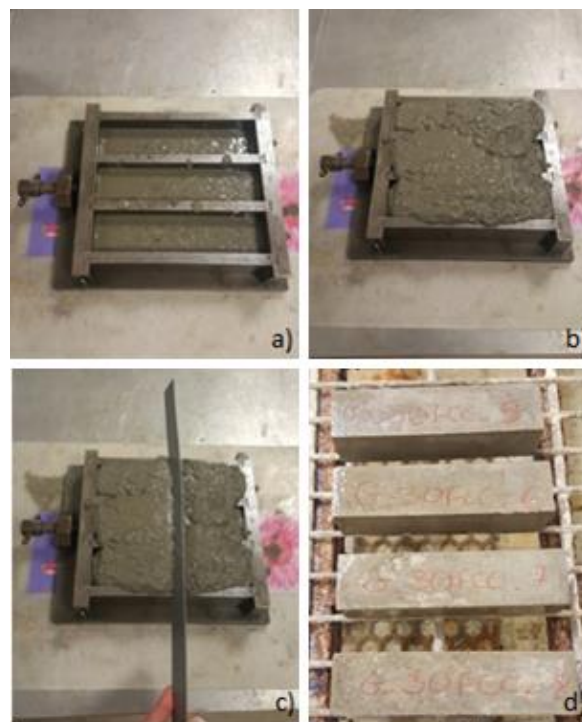


Figura 3.13 - Moldagem. a) Argamassa compactada em metade da capacidade do molde; b) Enchimento do molde; c) Remoção dos excessos nivelando a superfície; d) Amostras desmoldadas e identificadas

O ensaio de determinação da resistência mecânica à flexão e à compressão realizam-se segundo a mesma metodologia: submeter as amostras a cargas graduais e crescentes até ao momento em que estas atingem a rotura. Os valores das forças

3. Campanha experimental

exercidas são registados imediatamente antes das roturas e considerados como as máximas forças aplicadas.

O ensaio de resistência à flexão consiste em submeter as amostras a cargas a meio vão. Deste ensaio resultam duas metades sensivelmente iguais. O ensaio de resistência à compressão é realizado em cada uma das semi-amostras resultantes do ensaio de flexão submetendo-as a forças de compressão.

Os ensaios de resistência mecânica das argamassas previamente preparadas no LMC do ISEL foram realizados no Laboratório de Materiais do Polo operacional da Teixeira Duarte no Montijo (acreditado pelo Instituto Português de Acreditação IPAC [59]) uma vez que a prensa para a realização destes ensaios no ISEL se avariou na altura em que esta campanha experimental se iniciou.

A Tabela 3.16 refere os materiais a utilizar na realização destes ensaios.

Tabela 3.16 - Equipamentos, utensílios e materiais para os ensaios de resistência mecânica

Equipamentos e utensílios	Materiais
Prensa hidráulica (PETRA) (Figura 3.14)	
Pincel	Amostras prismáticas
Pano de limpeza	

A prensa hidráulica (Figura 3.14) utilizada realiza os ensaios de flexão com uma velocidade de carga de 50 ± 10 N/s e os ensaios de compressão com uma velocidade de carga de 2400 ± 200 N/s, conforme se encontra definido na norma NP EN 196-1.



Figura 3.14 - Prensa hidráulica PETRA utilizada

3. Campanha experimental

3.5.3.1 Tração por flexão

Procedimento segundo a norma NP EN 196-1:2006

- Limpar as amostras a ensaiar
- Limpar a prensa com recurso a um pincel
- Posicionar as amostras (Figura 3.15.a)
 - centrados e perpendiculares aos apoios cilíndricos metálicos
 - evitar colocar a face de enchimento em contacto com os pratos do equipamento
- Ligar a prensa para que ambos os pratos da prensa entrem em contacto com a amostra e se inicie a implementação da força a uma velocidade de 50 N/s até atingir a rotura (Figura 3.15.b)
- Registar o valor da força que fica registado no visor da prensa (Figura 3.15.c)
- Limpar todos os fragmentos espalhados na prensa
- Repetir o procedimento para as restantes amostras.



Figura 3.15 - Fases do ensaio de resistência mecânica à tração por flexão. a) Posicionamento da amostra; b) Rotura da amostra; c) Valor registado pela prensa

Expressão de resultados

Sendo que a prensa regista a carga aplicada, em kN, o valor da resistência à tração por flexão é obtido posteriormente, através da equação (9):

$$R_f = 1.5 \times \frac{F_f \times l}{A \times b} \quad (9)$$

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

F_f – força de rotura à flexão (N)

l – distância entre apoios (mm)

A – área da secção transversal (mm^2)

d – espessura do prisma (mm).

O valor da resistência à tração por flexão, para cada idade, é a média aritmética dos valores obtidos para cada uma das três amostras de cada argamassa ensaiada. Sendo o valor de cada amostra arredondado a $0,05 \text{ N/mm}^2$ e a média dos valores arredondada a $0,1 \text{ N/mm}^2$.

3.5.3.2 Compressão

Procedimento segundo a norma EN 12190:1998

- Limpar as amostras a ensaiar
- Limpar a prensa com recurso a um pincel
- Colocar a amostra na prensa (Figura 3.16.a)
 - centrar relativamente à plataforma inferior da prensa
 - evitar colocar a face de enchimento da amostra em contacto com os pratos do equipamento
- Ligar a prensa para que ambos os pratos da prensa entrem em contacto com a amostra e se inicie a implementação da força a uma velocidade de 2400 N/s até atingir a rotura (Figura 3.16.b)
- Registrar o valor da força que fica registado no visor da prensa (Figura 3.16.c)
- Limpar todos os fragmentos espalhados na prensa
- Repetir o procedimento para as restantes amostras.

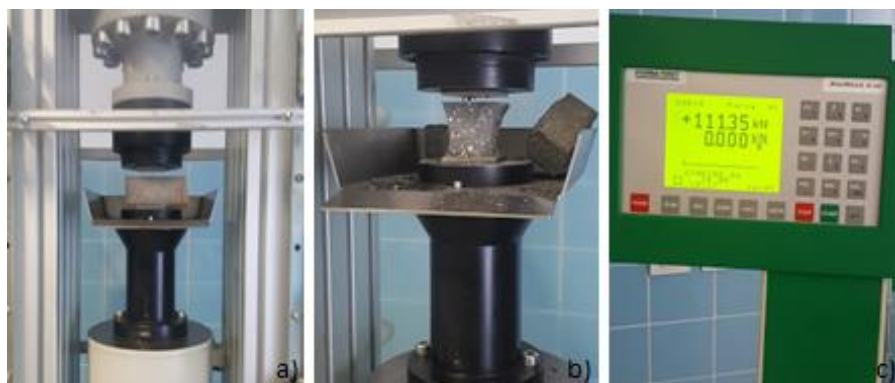


Figura 3.16 - Fases do ensaio de resistência mecânica à compressão. a) Posicionamento da amostra; b) Rotura da amostra; c) Valor registado pela prensa

Os equipamentos encontram-se programados de acordo com a norma EN 196-1, tal como está definido pela norma EN 12190 aplicada a este ensaio.

3. Campanha experimental

Expressão de resultados

Tal como para a obter a resistência à tração por flexão (Secção 3.5.3.1), os valores obtidos pela prensa têm que ser tratados, desta vez através da equação (10):

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (10)$$

R_c – resistência à compressão (MPa ou N/mm²)

F_c – força de rotura à compressão (N)

Novamente o valor da resistência à compressão, para cada idade, é a média aritmética dos valores obtidos para cada uma das três amostras de cada argamassa ensaiada.

3.5.4 Variação dimensional

O ensaio para determinar a variação dimensional é utilizado para avaliar as possíveis retrações ou expansões dos materiais à base de cimento em condições de cura com temperatura constante e na ausência de tensões aplicadas.

As amostras, a utilizar neste ensaio, são preparadas nos moldes prismáticos (Tabela 3.13) apresentados na Figura 3.17, e moldadas da mesma forma que as amostras dos ensaios de resistência mecânica (secção 3.5.3).



Figura 3.17 - Molde prismático com 100 x 100 x 400 mm

Os materiais utilizados encontram-se na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de variação dimensional

Equipamentos e utensílios	Materiais
Deflectómetro comparador da marca F.F. Metzger & Son de 30 cm	Amostras prismáticas
Bucha química	Super-cola
Pastilhas metálicas	Massa-cola

Procedimento experimental

- Desmoldar e identificar as amostras
- Colar duas peças metálicas em três faces da mesma (Figura 3.18.a)
 - as peças devem ficar à distância de 30 cm (d_i) uma da outra e centradas em relação às arestas de menor dimensão da amostra
 - imobilizar e acondicionar as peças metálicas, aplicando uma massa cola no contorno das mesmas (Figura 3.18.b)
 - repetir o processo nas outras duas faces
- Após 6h da colagem das peças metálicas determinar a distância entre as pastilhas
 - antes da realização das leituras, proceder à calibração do equipamento
- manter as amostras nas condições de 20 ± 2 °C de temperatura e 50 ± 5 % de humidade relativa
- repetir as leituras das distâncias das peças metálicas nas idades indicadas na Tabela 3.2.



Figura 3.18 – Preparação das amostras para o ensaio da variação dimensional. a) Processo de colagem das peças metálicas numa face da amostra; b) Pormenor da pastilha revestida com a massa cola

Expressão de resultados

A equação (11) traduz a variação dimensional (retração ou extensão):

$$\varepsilon = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (11)$$

sendo,

ε – valor da variação dimensional (m/m)

d_i – distância inicial entre centro das pastilhas metálicas (300 mm)

d_f – distância medida entre as pastilhas metálicas no decorrer do ensaio (mm).

3. Campanha experimental

3.5.5 Difusão de cloretos

Neste ensaio são moldadas amostras da mesma forma que no ensaio de resistência mecânica, apresentada na secção 3.5.3. Os moldes utilizados são os apresentados na Figura 3.19 e previamente referido na Tabela 3.13.



Figura 3.19 - Molde cilíndrico \varnothing 100 mm x 250 mm

O ensaio de determinação da difusão dos cloretos avalia a resistência à penetração de iões cloretos através da aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre duas superfícies opostas de uma amostra [60]. Este ensaio, baseado na norma NT BUILD 492, é um método rápido e frequentemente utilizado.

A Tabela 3.18 refere os materiais utilizados na realização deste ensaio.

Tabela 3.18 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de determinação da difusão dos cloretos

Equipamentos e utensílios	Materiais
Tabuleiro	
Exsicador	
Manga de borracha	
Braçadeiras de aço inoxidável	Amostras cilíndricas
Termómetro, com resolução 1°C	Água destilada
Fonte de alimentação Tenma	Hidróxido de cálcio
Reservatório catódico Engels	Cloreto de sódio
Ânodo (chapas metálicas, Figura 3.20)	Hidróxido de sódio
Panos	Nitrato de prata
Borrifador	
Paquímetro	
Escopro	
Martelo	

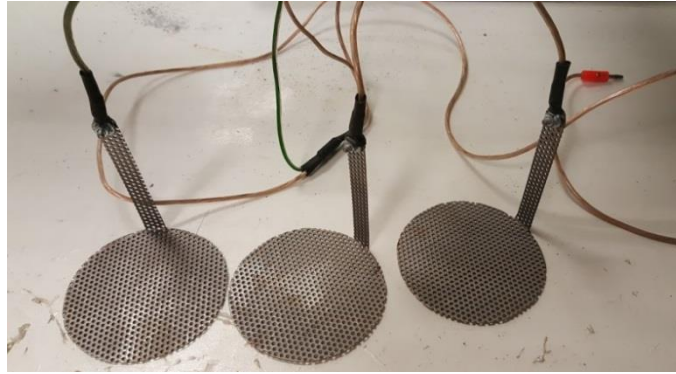


Figura 3.20 - Ânodos utilizados no ensaio.

Procedimento com base na norma NT BUILD 492

Este ensaio requer a preparação prévia das seguintes soluções aquosas:

- solução saturada de Ca(OH)_2 (1.85 g de Ca(OH)_2 em 1 L de água desionizada)
- solução catódica - solução aquosa 10 % de NaCl (100 g NaCl para 900 g de água da torneira)
- solução anódica - solução aquosa de 1,2 % em massa de hidróxido de sódio (12 g NaOH em 1 L de água desionizada)
- solução AgNO_3 (4.25 g de AgNO_3 em 205 mL de água desionizada).

Iniciar ensaio – 21º dia

- Cortar cada amostra cilíndrica em três amostras de 50 mm de espessura, desprezando 25 mm em ambos os topos
- Deixar as amostras secar ao ar durante 7 dias (Figura 3.21.a)
- Encher o exsiccador com a solução de hidróxido de cálcio e imergir as amostras durante 7 dias (Figura 3.21.b).

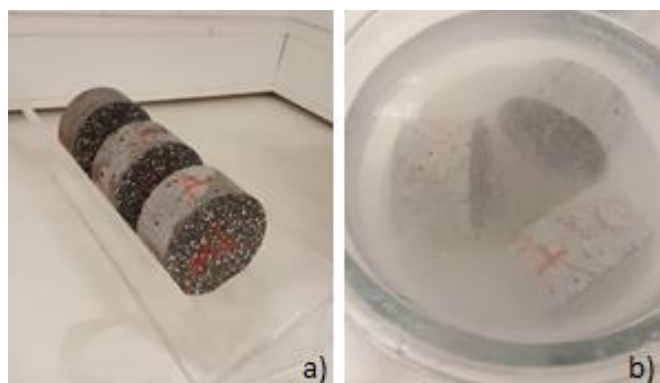


Figura 3.21 - Fases da preparação das amostras. a) Amostras a secar ao ar; b) Amostras imersas na solução de cloreto de sódio.

3. Campanha experimental

Iniciar o ensaio – 27º dia

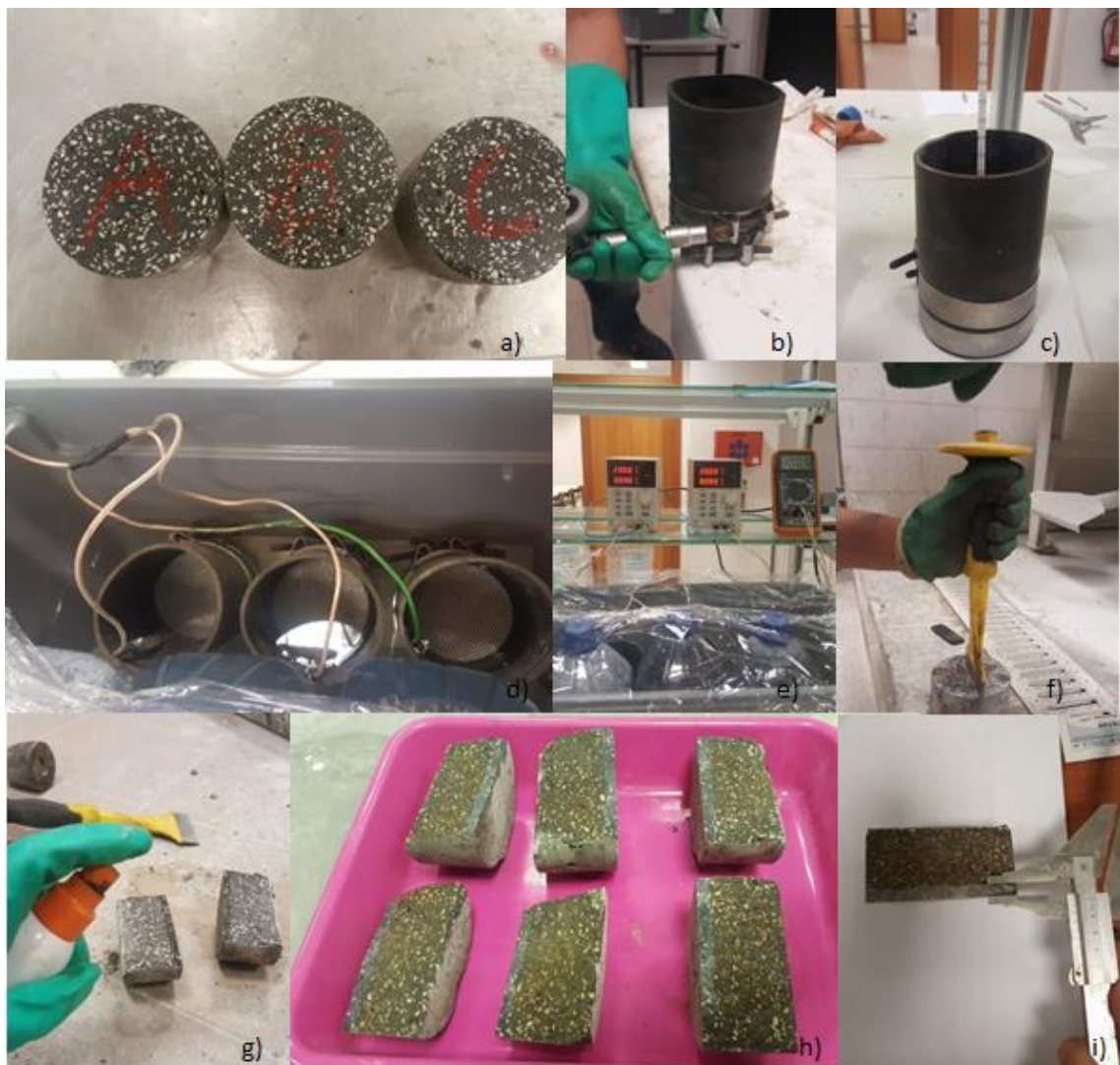
- Retirar as amostras saturadas do exsiccador (Figura 3.22.a)
- Colocar cada amostra numa manga de borracha e apertar com duas braçadeiras de aço inoxidável (Figura 3.22.b)
- Colocar 300 mL de solução anódica no interior da manga
- Deitar no reservatório a solução catódica (o reservatório usado requer cerca 12 L de solução de forma a que as bases das amostras fiquem em contacto com a mesma)
- Registrar as temperaturas das soluções (Figura 3.22.c)
- Colocar as mangas - com as bolachas e a solução anódica - no reservatório (Figura 3.22.d)
- Submergir os ânodos (Figura 3.20) na solução anódica existente em cada manga
- Ligar a fonte de alimentação (30 V)
- Registrar a intensidade de corrente total e em cada amostra
- Ajustar a diferença de potencial, da fonte de alimentação, segundo a
- Registrar a intensidade da corrente total e para cada amostra (Figura 3.22.e)
- Deixar o ensaio de difusão dos cloretos através das amostras a decorrer 24h.
- Tabela 3.19 que reproduz a tabela apresentada na NT BUILD 492
- Registrar a intensidade da corrente total e para cada amostra (Figura 3.22.e)
- Deixar o ensaio de difusão dos cloretos através das amostras a decorrer 24h.

Tabela 3.19 - Tensão e duração do ensaio de difusão de cloretos

Corrente inicial (I_{30V}) (mA)	Voltagem a aplicar	Corrente inicial (I_0) (mA)	Duração do ensaio, t (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Continuação do ensaio – 28º dia

- Voltar a registar as temperaturas das soluções e a intensidade de corrente total e em cada amostra
- Desligar a fonte de alimentação
- Remover as mangas do reservatório
- Retirar a solução anódica do interior da manga
- Desapertar as braçadeiras e remover a amostra
- Limpar o excesso de soluções anódica e catódica da amostra com dois panos (não trocar os panos para não haver contaminação de cloretos nas faces das amostras)



- Figura 3.22 - Fases do ensaio de difusão de cloretos. a) Bolachas saturadas; b) Preparação da manga com a bolacha no seu interior; c) Medição da temperatura de cada solução anódica, antes do início do ensaio; d) Conjuntos

3. Campanha experimental

das três mangas com as bolachas, a solução anódica e o ânodo, no reservatório; e) Medição das intensidades de corrente após o ajuste pela

- Registrar a intensidade da corrente total e para cada amostra (Figura 3.22.e)
- Deixar o ensaio de difusão dos cloretos através das amostras a decorrer 24h.

Tabela 3.19; f) Abertura da bolacha após 24h; g) Pulverização a superfície fraturada da bolacha com nitrato de prata; h) Período de espera após pulverização das superfícies; i) Leitura da profundidade de penetração dos cloretos.

- Com o auxílio do escopro e do martelo, partir as amostras a meio (Figura 3.22.f)
- Pulverizar a superfície fraturada da bolacha com a solução de nitrato de prata (Figura 3.22.g)
- Esperar cerca de 15 minutos (Figura 3.22.h)
- Medir a profundidade de penetração dos cloretos com recurso ao paquímetro
 - A penetração dos cloretos é avaliada pelas diferenças de contraste nas superfícies das metade das amostras pulverizadas com AgNO₃ em sete pontos distintos espaçados de 10 mm, (Figura 3.22.i).

A norma NT BUILD 492 define que na preparação das amostras estas são secas em vácuo durante 3h. De seguida devem ser imersas na solução de cloreto de sódio e mantidas em vácuo por mais 1h. Decorrido este tempo, deve-se deixar entrar o ar e aguardar 18±2 horas até ao início do ensaio.

Expressão de resultados

A profundidade de penetração de cloretos é calculada como sendo a média das leituras realizadas, em mm.

A fim de determinar o coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário utiliza-se a equação (12).

$$D = \frac{0,0239 \times (273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times X_d}{U-2}} \right) \quad (12)$$

Onde:

D – Coeficiente de difusão no estado não estacionário (10⁻¹² m²/s)

U – Valor da voltagem aplicada (V)

T – O valor médio de variação da temperatura inicial e final na solução anódica (°C)

L – Espessura da amostra (mm)

X_d – Valor médio da profundidade de penetração (mm)

T – Duração do ensaio (h).

3.5.6 Aderência

No ensaio para determinação da aderência da argamassa são avaliadas (i) a força de tração com que as chapas metálicas coladas na argamassa são destacadas e (ii) os tipos de rotura obtidos (Anexo A.2).

A Tabela 3.20 refere os materiais utilizados na realização deste ensaio.

Tabela 3.20 - Equipamentos, utensílios e materiais para o ensaio de aderência

Equipamentos e utensílios	Materiais
Molde	
Lajetas	
Espátula	Argamassa formulada
Chapas metálicos	Álcool/ acetona
Lixa	Cola Epoxy
Rebarbadora	

Procedimento experimental

- Limpar a parte rugosa das lajetas para tirar o pó (usar escova e ar comprimido)
- Pousar o molde em cima da placa (Figura 3.23.a)
- Preencher o molde com a argamassa previamente formulada - com a espátula garantir que a argamassa adere bem à placa (Figura 3.23.b)
- Agitar para acomodar (Figura 3.23.c)
- Deixar as amostras identificadas, a curar durante 5 dias a 23 °C e HR = 95%
 - A fim de garantir a humidade relativa elevada, as amostras foram tapadas com um vidro (Figura 3.23.d)

3. Campanha experimental



Figura 3.23 – Fases do ensaio de aderência. a) Lajeta e molde preparados; b) Enchimento do molde garantindo que a argamassa adere bem à placa; c) Amostra preparada, após acomodar a argamassa; d) Amostras identificadas, a curar a temperatura e humidade controlada.

- Depois de curar as amostras até aos 28 dias a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ e $\text{HR} = 55\%$
- Com a rebarbadora fazer cortes com a mesma dimensão das chapas metálicas (Figura 3.24.a)
- Lixar as chapas metálicas e limpá-las com acetona ou álcool
- 24 ou 48h antes do ensaio - colar 5 chapas com cola epoxy (4 cantos e meio) (Figura 3.24.b)
 - Aplicar a cola na chapa e na superfície da argamassa
 - Apertar manualmente até que saia excesso por todos os lados
 - Limpar o excesso
- Enroscar nas chapas metálicas o parafuso que serve de ligação para o dinamómetro (Figura 3.24.c)
- Encaixar o dinamómetro no parafuso e tracionar até à separação da base (Figura 3.24.d)
- Registrar a força aplicada no momento em que a chapa descola.



Figura 3.24 – Continuação do ensaio de aderência. a) Argamassa cortada, pronta para a colagem das chapas metálicas; b) Amostras preparadas para o ensaio, com as chapas coladas; c) Parafuso enroscado na chapa metálica; d) Dinamômetro a tracionar a chapa metálica.

Este ensaio foi realizado utilizando como suporte lajetas de betão para reproduzir o método de ensaio usado na empresa *Saint-Gobain Weber*.

Expressão de resultados

Método interno da *Saint-Gobain Weber* prevê resultados superiores a 1 MPa.

3. Campanha experimental

4 Apresentação, análise e discussão de resultados

Este capítulo apresenta os resultados experimentais do estudo desenvolvido para avaliar os efeitos da substituição parcial do cimento por resíduo de FCC nas propriedades das argamassas de ancoragem de armaduras de aço. Este estudo inclui:

- a caracterização dos materiais constituintes das argamassas
- a preparação de argamassas de ancoragem com incorporação entre 10 a 30% de resíduo de FCC bem como, da argamassa comercial de ancoragem (Anexo A.1) da empresa *Saint-Gobain Weber* e que, neste trabalho, é utilizada como material de referência (G_COM) (Tabela 3.1)
- a avaliação de propriedades das argamassas, tanto no estado fresco como endurecido (Tabela 3.2).

Este capítulo também apresenta uma análise crítica dos resultados experimentais obtidos comparando-os com (i) os resultados da argamassa de referência preparada durante a campanha experimental, G_COM (ii) os resultados de outros trabalhos científicos em argamassas cimentícias com incorporação de pozolanas e (iii) a ficha técnica da argamassa comercial de ancoragem (Anexo A.1).

Os resultados são também apresentados sob a forma de representações gráficas e tabelas sendo que, para cada argamassa, os gráficos apresentam sempre a mesma cor, formato e designação, de forma a serem coerentes para o leitor. Desta forma, é possível obter para todas as argamassas uma apreciação do seu comportamento face à característica avaliada. Os resultados são também tratados estatisticamente, o que permite avaliar a sua precisão e analisar criticamente a dispersão dos valores obtidos.

O registo detalhado dos resultados obtidos para cada ensaio é apresentado no Anexo B.

4.1 Caracterização dos agregados

As argamassas em estudo (Tabela 3.9) apresentam na sua composição um agregado calcário cuja dimensão das partículas é 1,5 – 3,0 mm e três areias: (i) areia 1,25 (ii) areia 0,63 e (iii) areia 0,315. Uma vez que a máxima dimensão destas partículas é inferior a 4 mm, são considerados agregados finos.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

4.1.1 Determinação do tamanho de partículas

O ensaio DTP é realizado segundo o procedimento apresentado na secção **Erro! A rigem da referência não foi encontrada.** Os resultados deste ensaio estão apresentados em conjunto – agregado calcário, areia 1,25, areia 0,63 e areia 0,315 - na Tabela 4.1 e representados na Figura 4.1. A Figura 4.1 também inclui a curva global teórica dos agregados, calculada através dos resultados obtidos para cada um dos agregados e utilizando a percentagem de cada um na mistura final [18].

Este ensaio permite atribuir uma classificação com base na dimensão das partículas. A classificação baseia-se (i) na sua máxima dimensão – D - que corresponde à menor abertura das malhas dos peneiros através da qual passa 90 % ou mais do agregado (ii) e mínima dimensão - d - que corresponde à maior abertura das malhas dos peneiros através da qual passa 5 % ou menos de agregado. Os agregados são então classificados utilizando dois valores separados por um traço – D/d [18] – e apresentados também na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 -Análise granulométrica dos agregados, peneiros utilizados de acordo com a NP EN 933 - 2, percentagem do material retido no fundo (%finos)

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	% Acumulada do material passado			
	Areia 0,315	Areia 0,63	Areia 1,25	Calcário
8	-	-	-	100.0
4	-	-	-	97.7
2	-	-	100.0	27.6
1	100.0	100.0	87.7	2.9
0.500	99.9	97.1	22.9	2.6
0.250	79.8	38.1	1.7	2.3
0.125	13.3	4.8	0.1	1.8
0.063	0.5	0.2	0.0	1.0
% f	0.022	0.010	0.005	0.010
Classificação	0,5/0,063	0,5/0,125	2/0,250	4/1

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

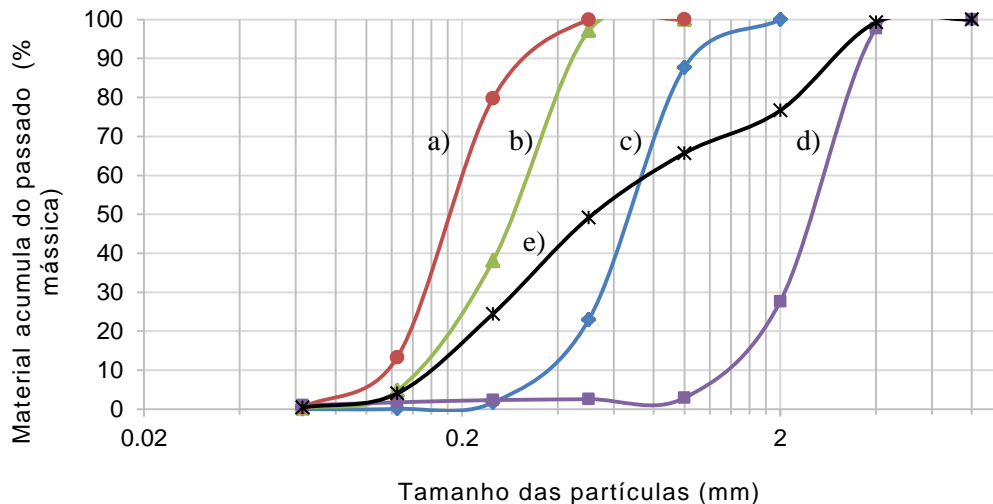


Figura 4.1 - Distribuição de tamanho de partículas dos agregados. a) Areia 0,315; (b) Areia 0,63; (c) Areia 1,25; (d) Calcário; e) Curva global dos agregados

Analisando a Tabela 4.1 e a Figura 4.1 é possível ainda identificar o diâmetro médio das partículas de cada agregado. Assim:

- na areia 0,315 (Figura 4.1.a) o diâmetro ao qual corresponde 50 % (d_{50}) ou mais de material passado é 0,250 mm
- a areia 0,63 (Figura 4.1.b) - $d_{50} = 0,5$ mm
- a areia 1,25 (Figura 4.1.c) - $d_{50} = 1$ mm
- o agregado calcário (Figura 4.1.d) - $d_{50} = 4$ mm.

A curva global teórica (Figura 4.1.e) permite verificar que os agregados em estudo apresentam uma granulometria contínua, ou seja, as partículas existentes abrangem uniformemente as granulometrias desde a maior até à mais pequena. Esta situação permite, tipicamente, que se obtenha uma argamassa compacta diminuindo o risco de segregação da mesma.

Além dos agregados, também foram ensaiadas misturas correspondentes às quatro argamassas em estudo (G_COM, G_10FCC, G_20FCC e G_30FCC). Desta forma pretende-se (i) comparar a curva granulométrica da mistura preparada correspondente à argamassa G_COM com os limites máximos e mínimos definidos na ficha técnica e (ii) verificar o efeito da incorporação do resíduo de FCC na mistura.

A Figura 4.2 apresenta (i) as curvas granulométricas obtidas para as quatro misturas - que correspondem à mistura de todos os constituintes das quatro argamassas preparadas na campanha experimental e (ii) as curvas granulométricas traçadas com os valores de referência apresentados na ficha técnica para a mesma argamassa.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

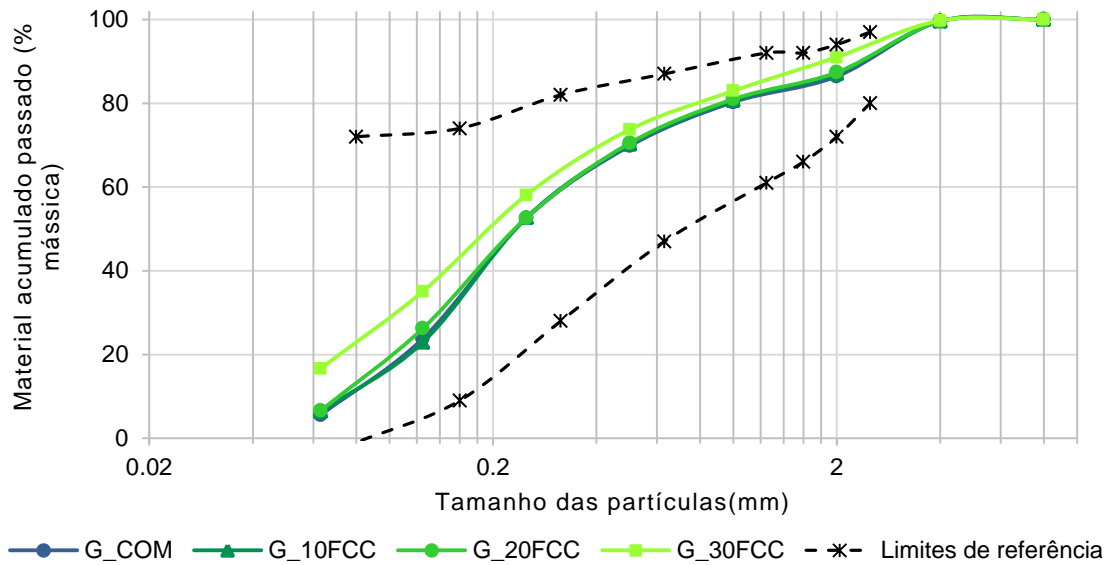


Figura 4.2 – Curvas granulométricas das misturas preparadas e limites de referência definidos pela Saint-Gobain Weber

A análise da Figura 4.2 permite verificar que as argamassas preparadas na campanha experimental, com e sem incorporação do resíduo, cumprem os limites impostos pela empresa.

4.1.2 Baridade e volume de vazios

A baridade e o volume de vazios foram determinados de acordo com o procedimento descrito na secção 3.1.2. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Figura 4.3.

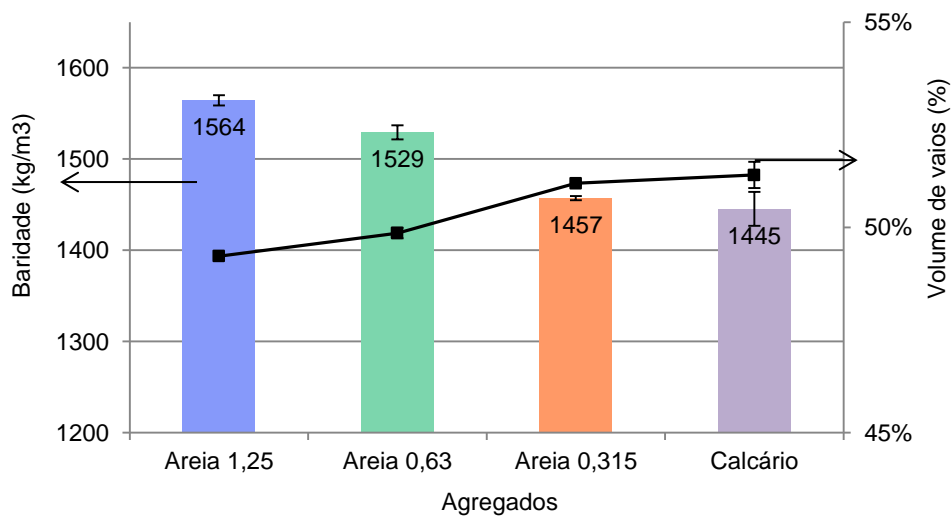


Figura 4.3 – Baridade com correspondente desvios padrão e volume de vazios dos agregados

Analisando a Figura 4.3, constata-se que:

- quanto menor é a máxima dimensão da areia menor é a baridade
 - a areia 0,315 é a que apresenta menor baridade (1457 kg/m^3), seguida da areia 0,63 (1529 kg/m^3) e por fim a areia de 1,25 (1564 kg/m^3)
- quanto menor a baridade maior o volume de vazios
 - as areias, sendo mais finas que o agregado calcário, apresentam menor volume de vazios
- o agregado calcário
 - embora apresente o valor de baridade mais baixo, o valor do seu desvio padrão reflete que estatisticamente é igual à baridade da areia 0,315
 - a maior percentagem de volume de vazios pode ser justificada com a maior dimensão (4 mm) das partículas deste agregado e com a forma mais achatada das suas partículas.

Os resultados obtidos revelam que os agregados utilizados nesta campanha experimental são classificados como densos (normal) [61], uma vez que apresentam baridades entre 1200 a 1600 kg/m^3 .

4.1.3 Equivalente de areia

O ensaio para determinação do equivalente de areia (SE(10)) foi realizado de acordo com o procedimento descrito secção 3.1.3. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de equivalente de areia (SE(10) é o equivalente de areia e % a quantidade de areia presente na amostra, em percentagem mássica)

Areias	SE(10)	Quantidade de areia na amostra, %
Areia 1,25	108	90
Areia 0,63	102	85
Areia 0,315	104	87

Através dos resultados é possível concluir que, em 120 g de amostra inicial de areia 1,25, 90% corresponde efectivamente a areia, enquanto na mesma massa de areia 0,63, são 85% e na areia 90/10 são 87%, sendo o restante material os ultrafinos. Desta forma, dado que a percentagem de areia se encontra entre 85% e 90% as areias usadas na preparação das argamassas são consideradas de boa qualidade por conterem uma reduzida quantidade de finos e impurezas.

4.1.4 Massa volúmica e absorção de água dos agregados

O ensaio para determinação da massa volúmica e absorção de água dos agregados é realizado de acordo com o procedimento descrito secção 3.1.4. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Figura 4.4.

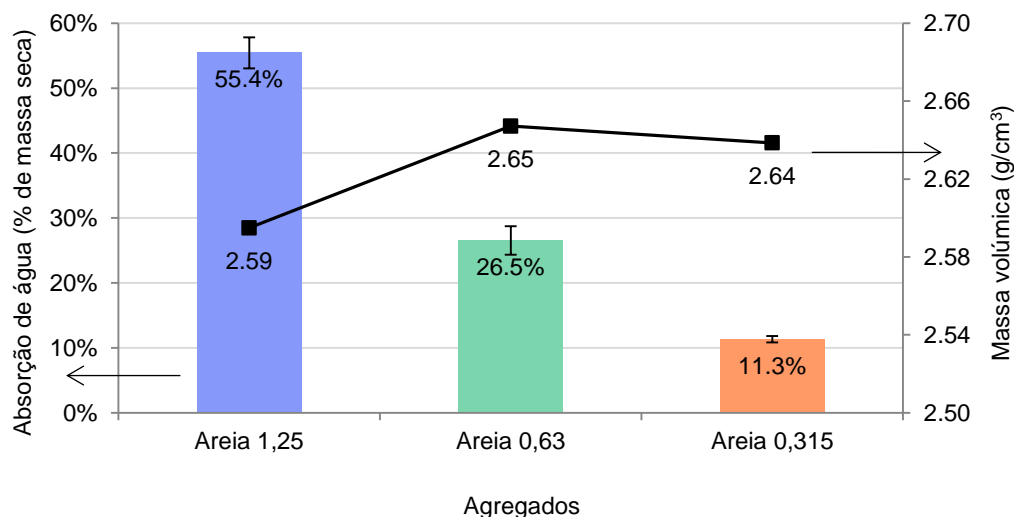


Figura 4.4 - Absorção de água em percentagem de massa seca

Através dos resultados é possível concluir que:

- a absorção de água das areias diminui à medida que a máxima dimensão das partículas das areias também diminui
- os resultados da massa volúmica apresentam valores típicos para estes agregados.

4.1.5 Resumo das características dos agregados

Tabela 4.3 - Tabela resumo das características dos agregados

		Calcário	Areia 1,25	Areia 0,63	Areia 0,315
DTP	dmáx (mm)	4,00	2,00	0,50	0,50
	d50 (mm)	4,00	1,00	0,50	0,25
Massa volúmica das partículas saturadas (g/cm3)		-	2,595	2,649	2,639
Baridade (g/cm3)		1,445	1,564	1,529	1,457
Absorção Água (%)		-	55,4	26,5	11,3
Volume Vazios (%)		51,3	49,3	49,9	51,1
Equivalente. Areia (%)		-	90	85	87

4.2 Argamassas no estado fresco

4.2.1 Consistência

Conforme apresentado na secção 2.4.1.3, a incorporação do resíduo de FCC em argamassas contribui para a perda da sua consistência no estado fresco devido à elevada afinidade, das partículas deste resíduo, com a água. Tipicamente, esta perda de consistência é proporcional ao teor de incorporação [62]. Desta forma, para manter a consistência das argamassas inalteradas em relação à argamassa de referência, i.e, com o valor de $218,1 \pm 2,0$ mm, é necessário adicionar mais água durante a sua preparação de modo a colmatar estas alterações. A quantidade de água a adicionar é determinada iterativamente como apresentado na secção 3.3.

A Tabela 3.9 apresenta, além da composição dos constituintes sólidos, a percentagem de água a utilizar nas argamassas produzidas na campanha experimental. Através da sua análise é possível afirmar que as argamassas com alterações na composição do ligante apresentam aumentos progressivos da quantidade de água na sua composição. Após a determinação da quantidade de água (Tabela 3.9), para cada argamassa, foram determinados experimentalmente os valores médios dos diâmetros de espalhamento. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Figura 4.5.

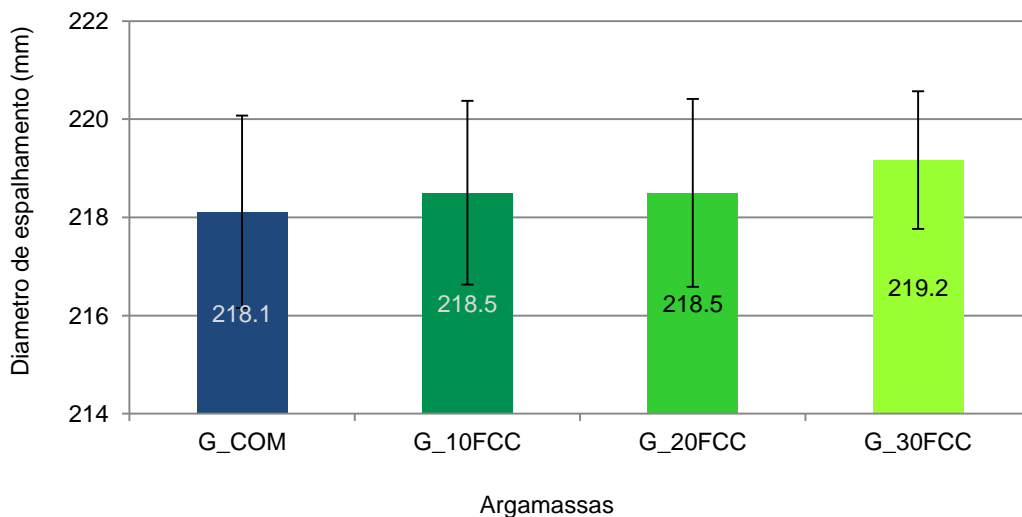


Figura 4.5 – Representação gráfica da consistência obtida por espalhamento (mm) da argamassa de referência e das argamassas com diferentes incorporações do resíduo FCC. As linhas apresentadas representam os respetivos desvios padrão.

Apesar da diferença dos valores obtidos, é possível concluir que estatisticamente os diâmetros são iguais, uma vez que os valores dos desvios padrão correspondentes refletem que as suas diferenças não são estatisticamente representativas.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

4.2.2 Massa volúmica aparente

Na Figura 4.6 são apresentados tanto os resultados do ensaio da massa volúmica como os valores da quantidade de água utilizada na preparação das argamassas em estudo (Tabela 3.1). A determinação da massa volúmica foi realizada de acordo com o procedimento referido na secção 3.4.2.

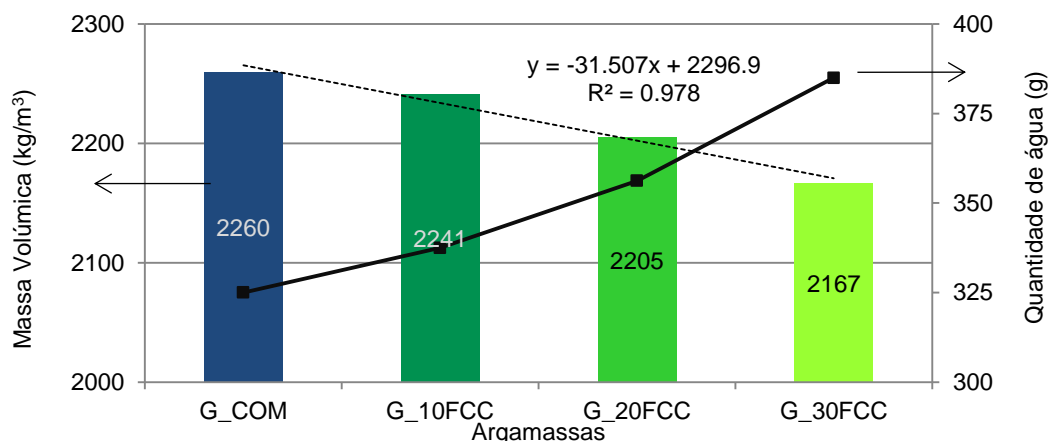


Figura 4.6 – Relação entre a massa volúmica (kg/m^3) e a quantidade de água das argamassas em estudo. R^2 corresponde ao fator de correlação obtido para os resultados da massa volúmica.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que:

- a argamassa de referência (G_COM) é a que apresenta maior massa volúmica ($2259,6 \text{ kg/m}^3$)
- à medida que se aumenta a percentagem de resíduo de FCC nas argamassas, a massa volúmica diminui de forma linear. Desta forma verifica-se uma correlação linear entre a massa volúmica das argamassas e a percentagem mássica de resíduo no ligante cuja expressão se indica na Figura 4.6 com um fator de correlação muito próximo da unidade ($R^2=0,978$). Esta tendência é também verificada noutros trabalhos de argamassas cimentícias onde se utiliza o mesmo resíduo em percentagens entre 5 % e 15 % [20][51] ou noutros com percentagens de substituição mais abrangentes (entre 5 % e 30 %) [63], ou também em betões onde se substituiu parcialmente o cimento pelo resíduo com incorporações a variar entre os 10 % e os 30 % [24].

A Figura 4.6 confirma ainda os efeitos da incorporação do resíduo de FCC na massa volúmica e na quantidade de água das argamassas – provocando a diminuição da massa volúmica e o acréscimo da quantidade de água. Esta relação é atribuída à estrutura interna porosa do resíduo de FCC responsável pela elevada área superficial

que é responsável por uma maior absorção de água, como é referido na secção 2.4.1.3.

4.3 Argamassas no estado endurecido

4.3.1 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas realiza-se aos 2, 7, 14, 28, 56 e 91 dias (Tabela 3.2). Conforme referido na secção 3.5 além destas idades, sempre que possível são realizadas leituras adicionais, que por isso não correspondem sempre à mesma idade em todas as amostras. Os valores médios da velocidade de propagação dos ultrassons (m/s) obtidos durante a realização do ensaio são apresentados na Figura 4.7. A Tabela 4.4 apresenta os valores médios da velocidade das ondas ultra-sónicas obtidas apenas nas idades definidas para o ensaio. Cada valor apresentado corresponde à média de três amostras de cada argamassa ensaiada, por idade.

Tabela 4.4 – Valores médios da velocidade de propagação dos ultrassons (m/s) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas

Argamassa	Dias					
	2d	7d	14d	28d	56d	91d
G_COM	4220	4501	4529	4635	4722	4708
G_10FCC	4147	4474	4565	4611	4666	4696
G_20FCC	3865	4338	4510	4576	4615	4667
G_30FCC	3684	4140	4254	4325	4384	4459

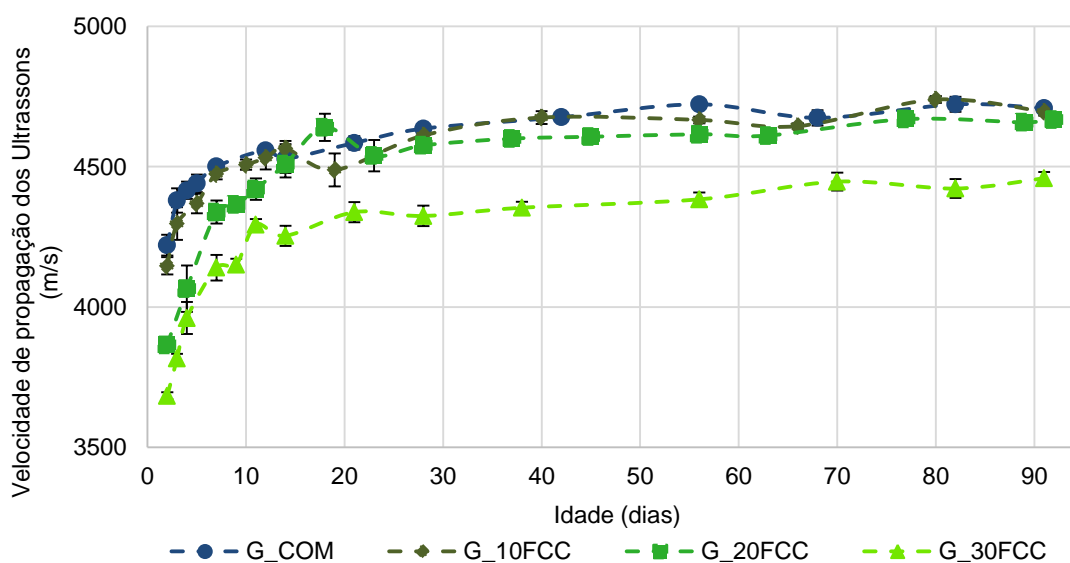


Figura 4.7 – Representação gráfica dos valores médios da velocidade de propagação dos ultrassons (m/s) obtidos nas argamassas ensaiadas ao longo do tempo.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

Os resultados obtidos na campanha experimental permitirão analisar as tendências dos seus comportamentos. Na sua análise são considerados alguns fatores como: (i) o reduzido número de amostras (ii) a sua heterogeneidade (iii) possíveis alterações ambientais durante os períodos de ensaio ou (iv) possíveis erros do operador. De forma a tornar as conclusões mais assertivas, nos resultados apresentados na Figura 4.7 não são analisados individualmente.

Analisando a Figura 4.7 é possível concluir que:

- a velocidade de propagação dos ultrassons aumenta com a idade das argamassas e, conseqüentemente, diminui o tempo de propagação das ondas ultra-sónicas - tal como era esperado [47]. A velocidade das ondas está diretamente relacionada com o aumento do tempo de hidratação da amostra - é um conhecimento já consolidado e amplamente divulgado que a velocidade de propagação das ondas é mais rápida em meios mais densos [64]
- à medida que se aumenta a incorporação do resíduo de FCC nas argamassas ocorre a diminuição da velocidade de propagação das ondas - comportamento já verificado noutros estudos [20][21]
- tipicamente, a velocidade de propagação dos ultrassons das argamassas preparadas aumenta mais significativamente até aos 14 dias de idade
- o comportamento obtido com os resultados deste ensaio para cada argamassa (Anexo B.1), é descrito por funções logarítmicas com correlações próximas da unidade. A maior variação da velocidade de propagação das ondas obtidas no início do ensaio e a pequena variação dos resultados a partir dos 56 dias de idade podem estar associados ao aumento das resistências mecânicas das amostras (secção 4.3.3)
- a velocidade de propagação dos ultrassons nas amostras é influenciada pelo teor de incorporação do resíduo na sua composição, ou seja, o resultado obtido na argamassa G_COM aos 7 dias de idade (4501 m/s) só é atingido pelas argamassas G_10FCC e G_20FCC próximo dos 14 dias de idade (4565 m/s e 4510 m/s respetivamente). A argamassa G_30FCC, durante o ensaio, não chega a atingir tal velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas
- nas argamassas G_10FCC os resultados obtidos ao longo de todo o ensaio, apesar de estatisticamente diferentes, aproximam-se dos resultados da argamassa de referência, chegando a igualá-los entre os 7 e os 14 dias de idade, mais tarde entre os 28 e os 42 dias de idade e novamente aos 68 dias de idade até ao final do ensaio

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

- ao longo de todo o ensaio, a argamassa G_30FCC apresenta velocidades de propagação das ondas mais baixas que a argamassa de referência (G_COM), 7,4 % em média
- dos 7 aos 28 dias de idade verifica-se que os resultados são instáveis para as argamassas preparadas, podendo esta situação estar associada a erros aleatórios experimentais como erros de leitura pelo operador ou alterações ambientais
- todas as argamassas, a partir dos 40 dias de idade, aproximadamente, apresentam menores variações nos valores das velocidades dos ultrassons passando a convergir assintoticamente [47] para um valor que (i) no caso da argamassa sem resíduo na sua composição e nas argamassas até 20% de substituição parcial de cimento por resíduo é de 4740 m/s e (ii) na argamassa G_30FCC é de 4460 m/s

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico.

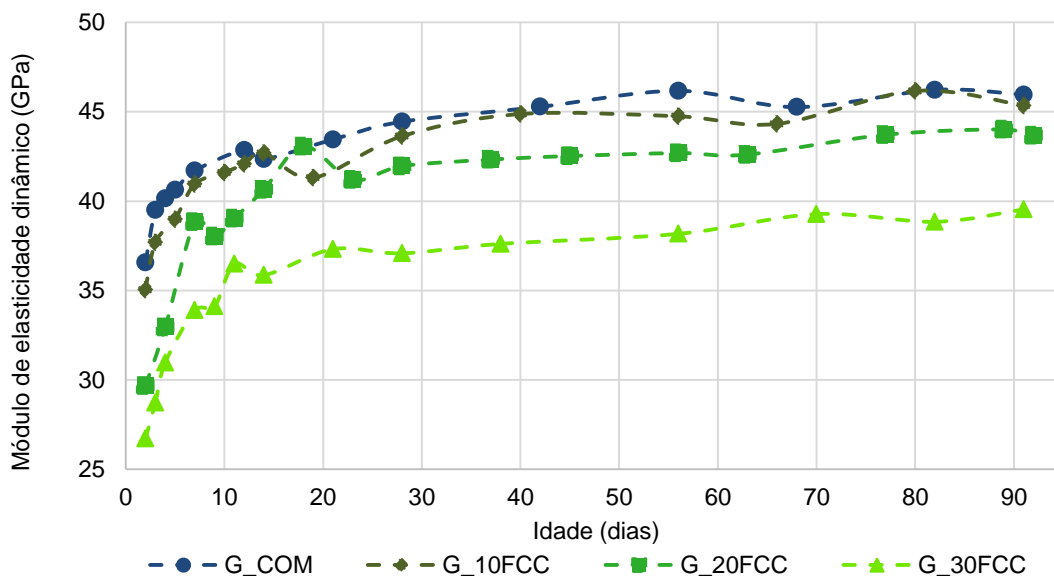


Figura 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico

Na análise das Figura 4.7 e Figura 4.8 verifica-se a existência de um comportamento semelhante: a adição do resíduo de FCC tende a baixar a velocidade de propagação dos ultrassons o que corresponde à redução do módulo de elasticidade dinâmico.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

4.3.2 Resistividade elétrica

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica (secção 3.5.2) ao fim de 2, 7, 14, 28, 56 e 91 dias de idade (Tabela 3.2) são apresentados na Tabela 4.5. À semelhança do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons (secção 4.3.1) são realizadas leituras adicionais sempre que possível, pelo que os resultados obtidos não correspondem sempre à mesma idade em todas as amostras. Todos os resultados são apresentados na

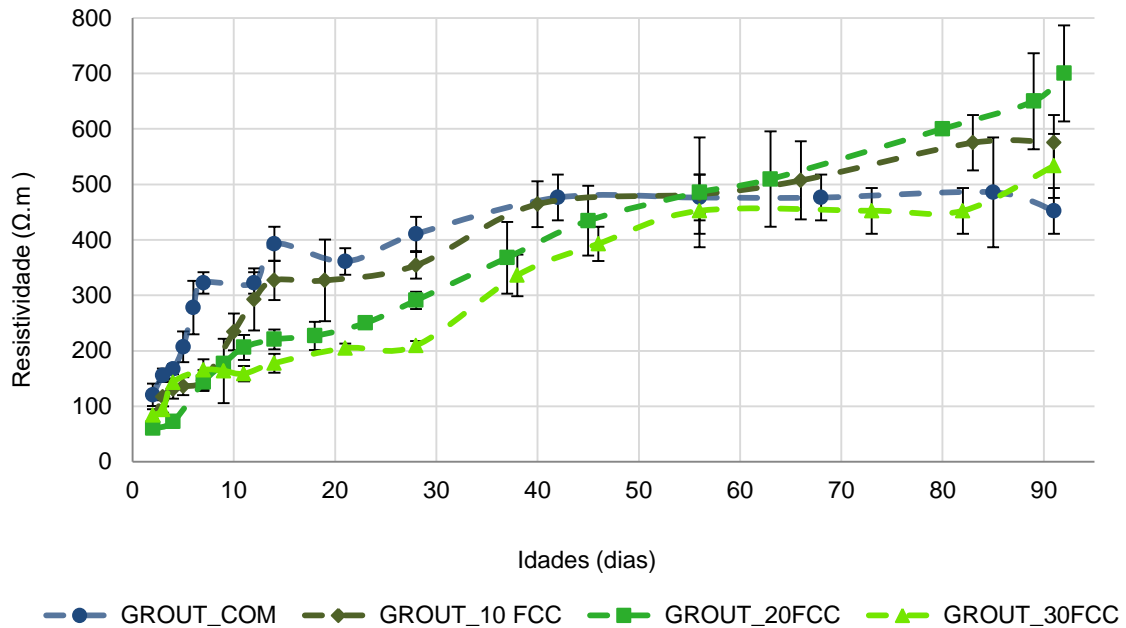


Figura 4.9 sendo que a Tabela 4.5 apenas apresenta os valores obtidos nas idades estabelecidas na Tabela 3.2. Cada valor apresentado corresponde à média de três amostras, de cada argamassa ensaiada, por idade.

Tabela 4.5 - Valores médios da resistividade elétrica (ohm.m) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas

Argamassa	Dias					
	2d	7d	14d	28d	56d	91d
G_COM	121	322	393	411	476	452
G_10FCC	71	146	327	354	482	575
G_20FCC	61	144	221	291	486	700
G_30FCC	84	165	178	210	452	533

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

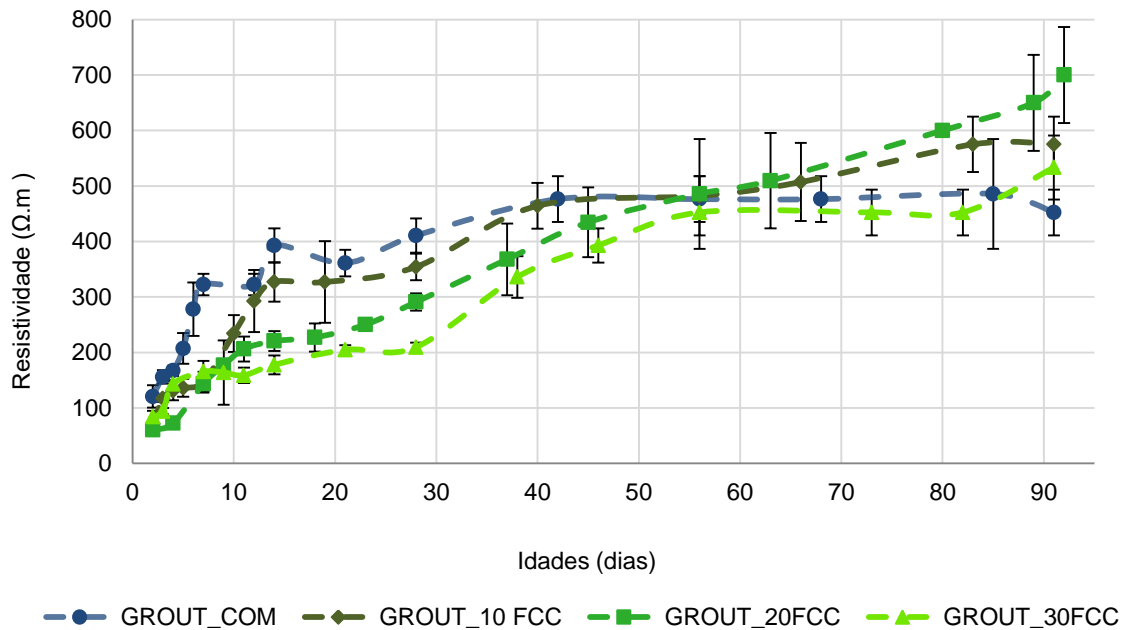


Figura 4.9 – Representação gráfica dos valores médios da resistividade elétrica ($\Omega.m$) obtidos para as diferentes idades e argamassas ensaiadas

À semelhança dos resultados obtidos no ensaio de propagação dos ultrassons (secção 4.3.1), neste ensaio foram analisados os comportamentos registados para cada argamassa e não o resultado de cada idade individualmente.

Analisando a Figura 4.9 é possível verificar que:

- a resistividade elétrica das argamassas aumenta com o tempo de hidratação das amostras, tal como já foi constatado noutros trabalhos com incorporação de resíduo de FCC [47][65]. Esta tendência era expectável uma vez que a resistividade elétrica, tal como a velocidade de propagação dos ultrassons - conforme já apresentado na secção 4.3.1 - aumenta com a densificação da matriz cimentícia
- a velocidade de crescimento da resistividade nas argamassas G_COM e G_10FCC seguem um comportamento logarítmico enquanto nas argamassas G_20FCC e G_30FCC seguem um comportamento polinomial com correlações muito próximas da unidade, conforme apresentadas no Anexo B.2
- até cerca dos 56 dias:
 - a resistividade das argamassas diminui com o aumento da incorporação de resíduo

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

- a argamassa G_COM apresenta os valores da resistividade elétrica mais altos, iniciando a partir dessa idade um comportamento assintótico para $490 \Omega \cdot m$
- aproximadamente entre os 40 e os 70 dias de idade, as argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC apresentam valores estatisticamente iguais, considerando os desvio padrão correspondentes
- na argamassa G_30FCC verifica-se uma maior velocidade de crescimento da resistividade ao fim de 28 dias de idade, esta situação pode ser atribuída à atividade pozolânica do resíduo de FCC
- este ensaio reforça a conclusão da influência do resíduo de FCC na velocidade de compactação das amostras, uma vez que o valor da resistividade da argamassa G_COM (sem resíduo de FCC na sua composição) aos 7 dias de idade ($322 \Omega \cdot m$) só é alcançado pela argamassa G_10FCC aos 14 dias de idade ($327 \Omega \cdot m$) e pelas argamassas G_20FCC e G_30FCC perto dos 37 dias de idade ($368 \Omega \cdot m$ e $336 \Omega \cdot m$ respectivamente)
- o maior valor da resistividade elétrica corresponde à argamassa G_20FCC aos 92 dias ($700 \Omega \cdot m$).

4.3.3 Resistência mecânica

No estudo das argamassas no estado endurecido são avaliadas as resistências mecânicas à tração por flexão (secção 3.5.3.1) e à compressão (secção **Erro! A rigem da referência não foi encontrada.**).

4.3.3.1 Tração por flexão

A Figura 4.10 apresenta (i) os resultados, (ii) os respectivos desvios padrão obtidos e (iii) os valores impostos pela ficha técnica da argamassa de referência para o ensaio de resistência à tração por flexão (secção 3.5.3.1) correspondentes a diferentes idades (7, 28 e 91 dias) para cada argamassa preparada (Tabela 3.1).

Cada valor apresentado corresponde à média de três amostras, de cada argamassa ensaiada, por idade.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

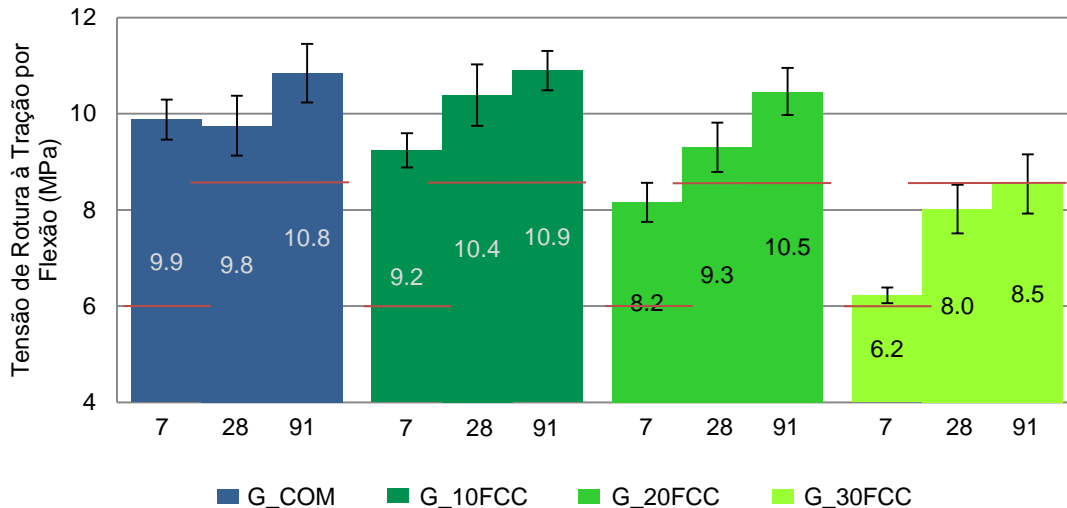


Figura 4.10 - Representação gráfica da tensão média de rotura à tração por flexão (MPa) das argamassas preparadas para as diferentes idades. As linhas verticais correspondem aos respetivos desvios padrão e as linhas horizontais aos valores impostos pela ficha técnica da argamassa de referência (Tabela 4.6).

Analisando a Figura 4.10 é possível verificar que:

- na argamassa G_COM para as mesmas idades, a tensão média de rotura à tração por flexão é tipicamente superior à tensão das outras argamassas preparadas, com exceção da argamassa G_10FCC aos 28 dias que apresenta uma tensão média de rotura à tração por flexão 7% superior à da argamassa G_COM
- tipicamente, a tensão média de rotura à tração por flexão diminui com o aumento da percentagem de substituição parcial do cimento pelo resíduo de FCC (Anexo B.3)
 - aos 7 dias de idade essa diminuição segue com uma correlação polinomial cujo fator de correlação é próximo da unidade, $R^2=0,9989$
 - aos 28 dias de idade a correlação polinomial obtida surge com fator de correlação $R^2=0,9615$
 - aos 91 dias de idade a correlação polinomial volta a ser caracterizada por um fator de correlação mais próximo da unidade, $R^2=0,9866$
- entre os 7 e os 28 dias de idade:
 - na argamassa G_COM a tensão de rotura à tração por flexão diminui 1 %
 - nas argamassas com incorporação do resíduo, regista-se um acréscimo da tensão média de rotura à tração por flexão de cerca de 18 % – destaca-se a argamassa G_30FCC que regista um aumento das

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

tensões de 29 %, o que poderá ser atribuído à atividade pozolânica do resíduo, sendo que as argamassas G_10FCC e G_20FCC aumentam cerca de 13 %.

- entre os 28 e os 91 dias de idade:
 - a argamassa G_COM regista um aumento de 9 %
 - as argamassa G_10FCC, G_20FCC e G_30FCC aumentam cerca de 8 %, e desta vez de forma semelhante para as três argamassas
- aos 91 dias, as tensões médias de rotura para as argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC são estatisticamente iguais
- a maior tensão média de rotura à tração por flexão corresponde à argamassa G_10FCC, aos 91 dias de idade (10,9 MPa)

A Tabela 4.6 apresenta os valores de tensão de rotura à tração por flexão definidos pela *Saint-Gobain Weber* (Anexo A.1) para a argamassa de ancoragem e que estão representados na Figura 4.10 pelas linhas horizontais encarnadas.

Tabela 4.6 - Tensão de rotura à tração por flexão, que a argamassa em estudo deve cumprir, segundo ensaios realizados pela *Saint-Gobain Weber*

7 dias	28 dias	90 dias
6,0 MPa	8,5 MPa	8,5 MPa

Analisando, comparativamente a Figura 4.10 e a Tabela 4.6 é possível concluir que:

- as argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC cumprem os valores de referência da *Saint-Gobain Weber* para qualquer idade
- a argamassa G_30FCC cumpre aos 7 dias e aos 91 dias de idade. Uma vez que esta argamassa apresenta a maior percentagem de resíduo na sua composição, o facto de não cumprir os valores aos 28 dias de idade, pode estar relacionado com a atividade pozolânica do resíduo. Esta permite que a argamassa atinja os valores definidos pela *Saint-Gobain Weber*, no entanto, num período mais tardio.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica permitem determinar o Índice de Atividade (IA) – método para avaliar a atividade pozolânica de materiais i.e, a sua reatividade com o hidróxido de cálcio formado nas reações de hidratação do cimento (equação 5 referida na secção 2.4.1.4). Assim quanto maior for o valor de hidróxido de cálcio consumido na reação pozolânica, maior é o seu índice de atividade.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

O IA, segundo a ASTM C311, 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, o IA é determinado pela razão entre a resistência mecânica das argamassas com incorporação do resíduo e a resistência da argamassa de referência (G_COM), com a mesma idade e sujeita às mesmas condições, conforme apresenta a equação 6.

$$IA = \frac{A}{B} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

A – Valor médio da resistência mecânica (à tração por flexão ou à compressão) da argamassa produzida com uma dada mistura

B – Valor médio da resistência mecânica (à tração por flexão ou à compressão) da argamassa de referência que não inclui na sua composição o material pozolânico que se pretende avaliar, neste caso a G_COM.

Extrapolando este conceito de avaliação da atividade pozolânica para outras percentagens de incorporação do resíduo e outros tempos de hidratação considera-se que quando o IA é superior à percentagem de cimento que está no ligante da composição da argamassa, a resistência mecânica avaliada supera o valor de resistência decorrente da hidratação do cimento e que esse facto se deve à atividade pozolânica do material cuja reatividade pozolânica se está a analisar [62][66].

Na Tabela 4.7 são apresentados os IA calculados para a resistência à flexão das argamassas com substituição parcial do cimento pelo resíduo FCC.

Tabela 4.7 - Índice de atividade determinado a partir da tensão média de rotura à tração por flexão

Argamassa	% (mássica) no ligante		Dias		
	Cimento	Resíduo FCC	7d	28d	91d
G_10FCC	90	10	93.51%	106.55%	100.48%
G_20FCC	80	20	82.56%	95.41%	96.47%
G_30FCC	70	30	62.99%	82.21%	78.75%

A partir da análise da Tabela 4.7 verifica-se que o resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica:

- para todas as idades de ensaio, nas argamassas G_10FCC e G_20FCC
- a partir dos 28 dias de idade na argamassa G_30FCC

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

Desta forma, conclui-se que na argamassa G_30FCC ocorre um desenvolvimento mais lento da atividade pozolânica, tal como se concluiu na análise da Tabela 4.6.

4.3.3.2 Compressão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão (secção 3.5.3.2) são apresentados na Figura 4.11.

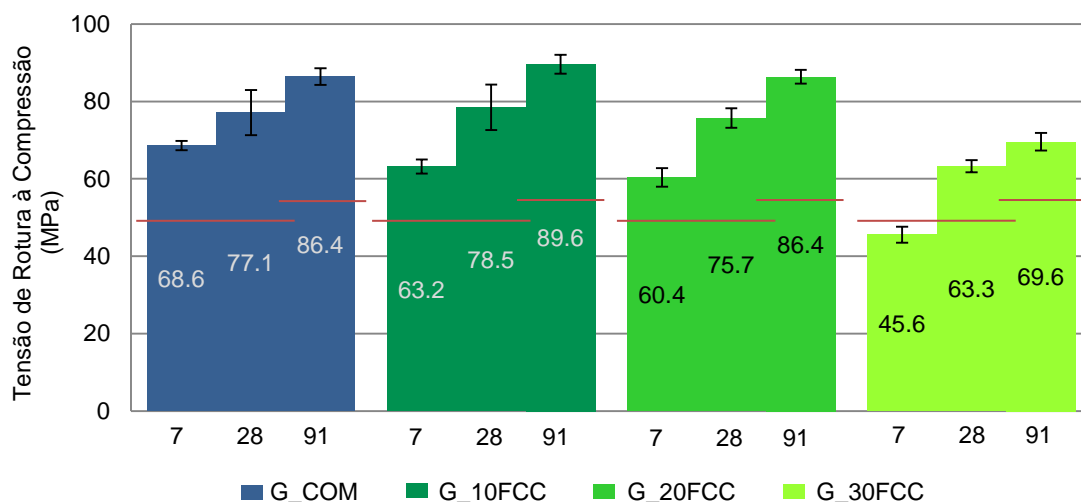


Figura 4.11 - Representação gráfica da tensão média de rotura à compressão (MPa) das argamassas preparadas para as diferentes idades. As linhas verticais correspondem aos respectivos desvios padrão e as linhas horizontais a 80 % dos valores impostos pela ficha técnica da argamassa de referência.

Neste ensaio é possível concluir que:

- a tensão média de rotura à compressão, à semelhança dos resultados registados no ensaio de resistência mecânica à tração por flexão, diminui com o aumento da percentagem de substituição parcial do cimento (Anexo B.4)
 - aos 7 dias essa diminuição segue uma correlação polinomial com fator $R^2=0,9631$
 - aos 28 dias a correlação polinomial obtida surge com o valor muito próximo da unidade, $R^2=0,99$
 - aos 91 dias de idade o fator de correlação é $R^2=0,9896$
- entre os 7 e os 28 dias de idade:
 - a argamassa G_COM regista um crescimento da tensão média de rotura à compressão de cerca de 12 %
 - as argamassas com incorporação do resíduo, registam um aumento médio mais significativo, de cerca de 29 % da tensão média de rotura à

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

compressão, que pode ser atribuído à atividade pozolânica – à semelhança das tensões médias de rotura à tração por flexão, destaca-se a argamassa G_30FCC com um aumento de 39 % dos 7 para os 28 dias de idade, enquanto nas argamassa G_10FCC e G_20FCC as tensões médias de rotura à compressão aumentam 25 %.

- entre os 28 e os 91 dias de idade
 - a argamassa G_COM mantem o crescimento da tensão média de rotura à compressão nos 12 %
 - as argamassas com incorporação do resíduo registam um aumento da tensão média de rotura à compressão de 13 %
- aos 91 dias, as tensões médias de rotura à compressão para as argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC são estatisticamente iguais
- a maior tensão média de rotura à compressão corresponde à argamassa G_10FCC, aos 91 dias de idade (89,6 MPa).

A norma NP EN 1504-6 define que no ensaio de resistência à compressão se deve considerar que os resultados estão em conformidade com a norma quando são superiores a 80 % do valor declarado pelo produtor. Desta forma, a Tabela 4.8 apresenta (i) os valores obtidos pela *Saint-Gobain Weber* para a tensão média de rotura à compressão da argamassa de referência e (ii) 80 % desses mesmos valores, para serem considerados como valores limites das argamassas preparadas.

Tabela 4.8 – Tensão média de rotura à compressão, que a argamassa em estudo deve cumprir, segundo ensaios realizados pela *Saint-Gobain Weber*

	7 dias	28 dias	90 dias
Ficha técnica	62 MPa	62 MPa	67 MPa
80 % do valor da ficha técnica – valor de referência	49,6 MPa	49,6 MPa	53,6 MPa

Desta forma, analisando a Figura 4.11 à luz dos valores de referência apresentados na Tabela 4.8, verifica-se que:

- as argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC cumprem os valores de referência para todas as idades
- a argamassa G_30FCC cumpre os valores de referência a partir dos 28 dias de idade. Novamente, se verifica que é a argamassa com maior percentagem de incorporação do resíduo que não atinge o valor de referência aos 7 dias de

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

idade. Este comportamento pode estar relacionado com a atividade pozolânica do resíduo.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados dos cálculos do índice de atividade (equação 6) com base nos valores da tensão média de rotura à compressão.

Tabela 4.9 - Índice de atividade da tensão média de rotura à compressão

Argamassa	% (mássica) no ligante		Dias		
	Cimento	Resíduo FCC	7d	28d	91d
G_10FCC	90	10	92.06%	101.84%	103.68%
G_20FCC	80	20	87.99%	98.20%	99.94%
G_30FCC	70	30	66.45%	82.08%	80.50%

Nesta análise é possível tirar as mesmas conclusões que no ensaio de resistência mecânica à flexão (secção 4.3.3.1). Desta forma, é possível afirmar que resíduo de FCC apresenta atividade pozolânica:

- nas argamassas G_10FCC e G_20FCC, existe atividade pozolânica em todas as idades de ensaio
- na argamassa G_30FCC, apresenta atividade pozolânica a partir dos 28 dias de idade.

Com a determinação das tensões de rotura à tração por flexão e à compressão das argamassas é ainda possível analisar a capacidade de deformação das misturas sob solicitações mecânicas, ou seja, a ductilidade das argamassas preparadas. O coeficiente de ductilidade é quantificado pela relação R_f/R_c sendo que quanto maior for este quociente, maior é a ductilidade do material. A Tabela 4.10 apresenta os valores de ductilidade das argamassas, nas idades ensaiadas.

Tabela 4.10 - Coeficientes de ductilidade para as argamassas produzidas na campanha experimental

Argamassas	7d	28d	91d
G_COM	0.14	0.13	0.13
G_10FCC	0.15	0.13	0.12
G_20FCC	0.14	0.12	0.12
G_30FCC	0.14	0.13	0.12

Com a análise dos coeficientes de ductilidade (Tabela 4.10), é possível verificar que:

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

- as argamassas estudadas apresentam reduzida ductilidade, o que é expectável porque a tensão média de rotura à tração por flexão é bastante inferior à tensão média de rotura à compressão
- a argamassa G_COM
 - entre os 7 e os 28 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 14 %
 - entre os 28 e os 91 dias de idade o valor do coeficiente de ductilidade apresenta uma diminuição insignificante, 1 %
- a argamassa G_10FCC
 - entre os 7 e os 28 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 11 %
 - entre os 28 e os 91 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 9 %
- a argamassa G_20FCC
 - entre os 7 e os 28 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 10 %
 - entre os 28 e os 91 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 2 %
- a argamassa G_30FCC
 - entre os 7 e os 28 dias de idade o coeficiente de ductilidade diminui 8 %
 - entre os 28 e os 91 dias de idade, o coeficiente de ductilidade, diminui 3 %
- ao longo do tempo do ensaio, as argamassas preparadas sofrem perda média da ductilidade cerca de 14%. Este comportamento é expectável tendo em conta que, as tensões médias de rotura à compressão aumentam, em média, mais 18 %, que as tensões médias de rotura à tração por flexão.

A Tabela 4.11 apresenta as percentagens de crescimento das tensões médias (tração por flexão e compressão) para cada uma das argamassas.

Tabela 4.11 – Percentagens de crescimento das tensões (tração por flexão e compressão) entre as idades de ensaio para as argamassas produzidas

	7d - 28d		28d - 91d	
	Flexão	Compressão	Flexão	Compressão
G_COM	0 %	12 %	11 %	12 %
G_10FCC	12 %	24 %	5 %	14 %
G_20FCC	14 %	25 %	12 %	14 %
G_30FCC	29 %	39 %	7 %	10 %

4.3.3.3 Relação entre a velocidade de propagação de ultrassons, resistividade elétrica e resistência mecânica

Ao longo do tempo de hidratação, verifica-se que (i) a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, (ii) a resistividade elétrica e (iii) as resistências mecânicas

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

aumentam, tal como era expectável, devido à densificação da matriz cimentícia, conforme já tinha sido concluído noutros trabalhos [47][64][57].

A Tabela 4.12 apresenta uma sistematização dos resultados apresentados anteriormente obtidos nos ensaios de velocidade de propagação dos ultrassons, de resistividade elétrica e de resistência mecânica à tração por flexão e à compressão, aos 7, 28 e 91 dias de idade (secções 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3), para as argamassas preparadas.

Tabela 4.12 - Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de velocidade de propagação dos ultrassons, de resistividade elétrica e de resistência mecânica à tração e à flexão para as argamassas preparadas, aos 7, 28 e 91 dias de idade

		7	28	91
G_COM	Ultra-sons	4219	4346	4414
	Resistividade	322	411	452
	Flexão	9.9	9.8	10.8
	Compressão	68.6	77.1	86.4
G_10FCC	Ultra-sons	4194	4323	4402
	Resistividade	146	354	575
	Flexão	9.2	10.4	10.9
	Compressão	63.2	78.5	89.6
G_20FCC	Ultra-sons	4067	4290	4375
	Resistividade	144	291	700
	Flexão	8.2	9.3	10.5
	Compressão	60.4	75.7	86.4
G_30FCC	Ultra-sons	3881	4054	4180
	Resistividade	165	210	533
	Flexão	6.2	8.0	8.5
	Compressão	45.6	63.3	69.6

A Tabela 4.12 permite verificar a semelhança de comportamentos que existe entre os ensaios apresentados. Tipicamente os resultados aumentam ao longo do tempo de hidratação. Assim confirma-se que os ensaios não destrutivos – velocidade de propagação dos ultrassons e resistividade elétrica – estão diretamente relacionados com as resistências mecânicas estudadas e, conseqüentemente permitem ainda aferir sobre a durabilidade das amostras a longo prazo.

4.3.4 Variação dimensional

No ensaio de variação dimensional (secção 3.5.4), a primeira leitura da variação dimensional é registada 6h após a colagem das pastilhas na amostra, que corresponde às 6h de idade das argamassas, sendo que a partir desse registo são realizadas as restantes leituras.

Os resultados deste ensaio, apresentados na Figura 4.12, resultam do cálculo da média aritmética de 12 valores correspondentes a leituras realizadas em duas amostras da mesma argamassa sendo que em cada amostra existem três faces em estudo e que em cada face se realizam duas leituras – uma com início na peça metálica colada mais à esquerda e outra iniciada pela peça da direita, de forma a minimizar os erros de leitura - nas quais se avalia a variação dimensional.

A Figura 4.12 apresenta assim os valores da retração das amostras ao longo dos 91 dias de idade. Neste ensaio, à semelhança do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons (secção 3.5.1) e da resistividade elétrica (secção 3.5.2), são realizadas leituras sempre que possível acabando por se obter resultados para diferentes idades. No entanto, foram sempre respeitadas as idades de ensaio estabelecidas 6h, 2, 7, 14, 28, 56 e 91 dias (Tabela 3.2).

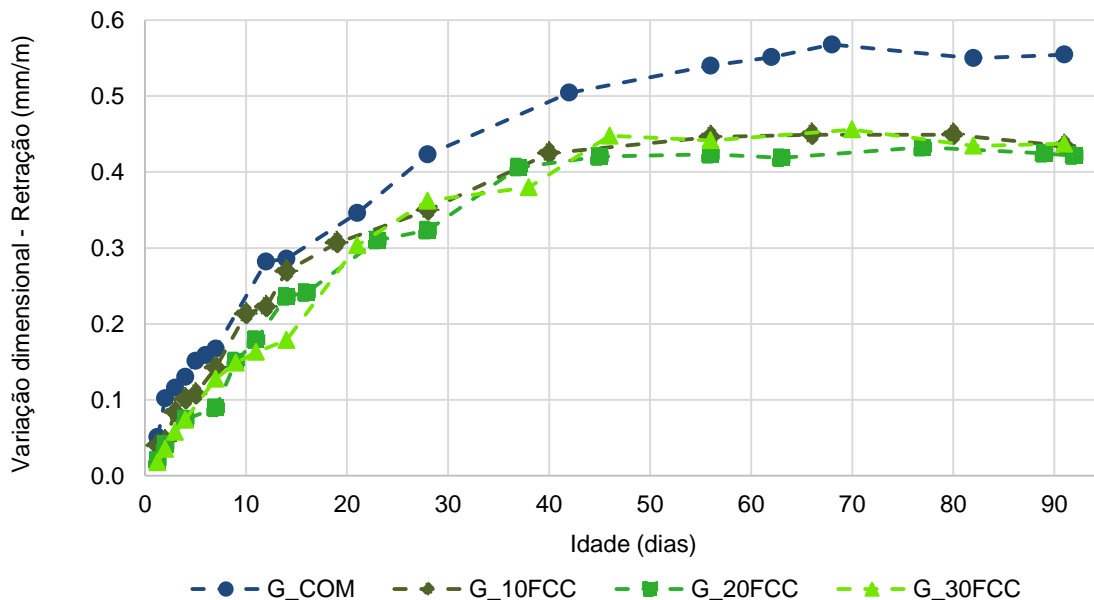


Figura 4.12- Retração das quatro argamassas em estudo (mm/m)

Analisando a Figura 4.12, é possível concluir que:

- as argamassas retraem ao longo do tempo de hidratação sendo que essa retração é mais significativa nas primeiras idades – até cerca dos 56 dias de

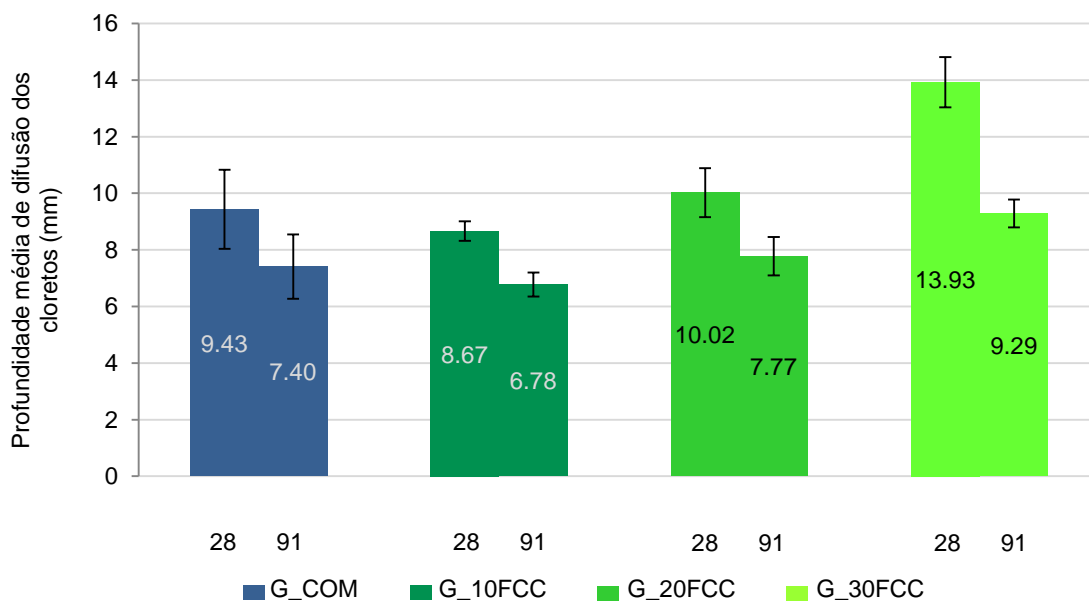
4. Apresentação, análise e discussão de resultados

idade para a argamassa G_COM e dos 45 dias de idade para as argamassas com incorporação de resíduo de FCC. A partir destas idades a retração das argamassas preparadas tende a estabilizar

- a argamassa G_COM é a que apresenta sempre maior retração ao longo de todo o tempo do ensaio (atingindo a maior retração do ensaio 0,57 mm/m, aos 68 dias de idade), e é a argamassa cuja dimensão tende a estabilizar mais tarde - a incorporação do resíduo de FCC contribui para a estabilidade dimensional das argamassas
- independentemente do teor de substituição parcial do cimento, qualquer das argamassas preparadas com incorporação de resíduo de FCC, apresenta um comportamento assintótico para 0,46 mm/m
- todas as argamassas cumprem os valores impostos pela ficha técnica da argamassa comercial de ancoragem (Anexo A.1) - retrações inferiores a 2,5 mm/m.

4.3.5 Difusão de cloretos

A Figura 4.13 apresenta os resultados das profundidades médias de difusão dos cloretos e a Figura 4.14 os seus coeficientes de migração - ambos em estado não-estacionário. Conforme apresentado na Tabela 3.2 o ensaio realiza-se aos 28 dias e aos 91 dias de idade, para as argamassas preparadas. Cada resultado corresponde à média de 14 leituras – 7 leituras em cada metade da amostra – com as quais também foi possível calcular os desvios padrão representados nas figuras.



4. Apresentação, análise e discussão de resultados

Figura 4.13 - Profundidades de difusão dos cloretos (mm) e respectivos desvios padrão (representados pelas linhas), em estado não-estacionário, nas argamassas preparadas aos 28 e 91 dias de idade

Na análise da Figura 4.13:

- embora os valores de profundidade média de difusão dos cloretos nas argamassas G_COM, G_10FCC e G_20FCC, para ambas as idades de ensaio, sejam diferentes e pareçam indicar que a incorporação de resíduo de FCC tende a dificultar a migração deste íon na matriz cimentícia esta conclusão não é muito assertiva dado que os valores dos correspondentes desvios padrão que o sobrepõem refletem que as suas diferenças não são estatisticamente representativas. No entanto, noutro trabalho realizado com o mesmo cimento – CEM I 52,5R - e com percentagens de substituição parcial do cimento entre 0 e 20 % [67] concluiu-se que a difusão dos cloretos é dificultada, desta forma pode-se também concluir que até aos 20 % de substituição parcial de cimento por resíduo de FCC a difusão de cloretos pode ser dificultada e seguramente não é favorecida
- a profundidade média de difusão dos cloretos tendencialmente diminui com o tempo de hidratação para todas as argamassas, apesar da argamassa G_COM apresentar estatisticamente o mesmo valor para as duas idades de ensaio
- a incorporação de 20 % e 30 % de resíduo de FCC na composição do ligante, permite concluir que à medida que o teor de resíduo aumenta, aumenta a profundidade média de difusão, assim o maior resultado corresponde à argamassa G_30FCC, aos 28 dias (13,93 mm).

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

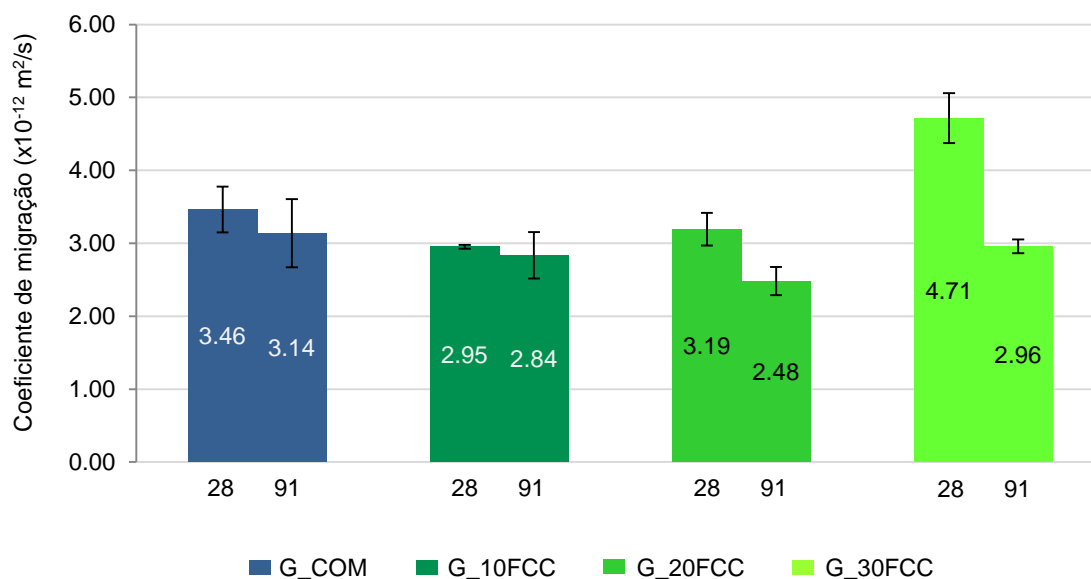


Figura 4.14 - Coeficientes de migração ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) e respectivos desvios padrão (representados pelas linhas), em estado não-estacionário, nas argamassas preparadas, aos 28 e 91 dias de idade

Analisando a Figura 4.14:

- tal como na profundidade média de difusão, os coeficientes de migração dos cloretos, tendencialmente, diminuem com o tempo de hidratação, apesar de estatisticamente a argamassa G_COM e G_10FCC apresentarem o mesmo valor para as duas idades de ensaio
- à semelhança dos resultados da profundidade média de difusão dos cloretos, o maior coeficiente de migração corresponde à argamassa G_30FCC, aos 28 dias de idade ($4,71 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

O Anexo B.5 apresenta a representação gráfica, para cada idade de ensaio, dos resultados obtidos para a difusão dos cloretos e para os coeficientes de migração em simultâneo. A análise simultânea permite verificar que tanto aos 28 dias como aos 91 dias de idade os 10 % de incorporação de resíduo fazem diminuir a profundidade de penetração dos cloretos, bem como o coeficiente de migração. No entanto à medida que o teor de incorporação do resíduo de FCC aumenta, aumentam também os resultados obtidos.

O Anexo B.6 apresenta as fotografias das amostras utilizadas neste ensaio. Através da observação das amostras deste ensaio constata-se a existência de cloretos dispersos pela argamassa sem incorporação do resíduo de FCC – G_COM – para ambas as idades de ensaio. A presença dos cloretos diminui significativamente nas argamassas com incorporação do resíduo, sendo inexistentes visualmente aos 28 dias

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

de idade. Aos 91 dias de idade os cloretos são visíveis apenas na amostra com 10 % de incorporação do resíduo de FCC.

4.3.6 Aderência

O ensaio de aderência é realizado com as argamassas com duas idades diferentes, 28 e 51 dias. Esta idade em concreto decorreu dos limites temporais para a realização deste TFM e a necessidade de articular a data da realização do ensaio com a disponibilidade do dinamómetro da empresa *Saint-Gobain Weber*. De qualquer forma, com resultados nestas duas idades foi possível analisar o comportamento no que respeita às aderências das argamassas, ao longo do tempo de hidratação das mesmas.

A Figura 4.15 apresenta as tensões médias, e os respetivos desvios padrão, obtidos no ensaio de aderência das argamassas preparadas. A linha encarnada horizontal representa o valor mínimo imposto pela ficha técnica da argamassa comercial. Cada valor representado corresponde à média de cinco resultados. Os resultados, tal como se observa a partir dos valores dos desvios padrão (representados com linhas na Figura 4.15), têm associados uma dispersão significativa que é típica deste ensaio. Desta forma, a análise rigorosa das tensões de aderência das argamassas exigiria a realização do ensaio com um número superior de amostras. Estes resultados permitem, contudo, a avaliação das tendências do comportamento das aderências das argamassas à medida que se substitui parcialmente, entre 10 % e 30%, cimento por FCC bem como ao longo do tempo.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

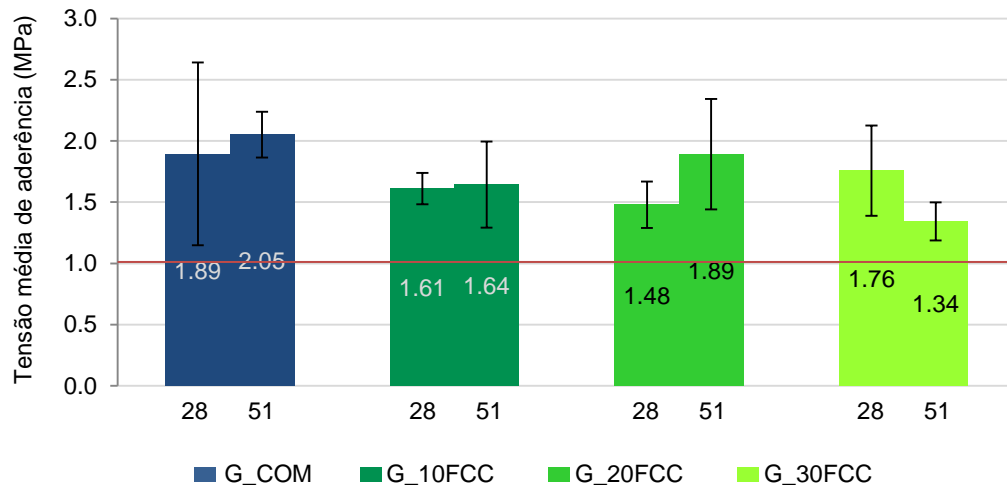


Figura 4.15 – Tensões médias de aderência (MPa) e respectivos desvios padrão (representados nas linhas)

A análise dos resultados da Figura 4.15 revela as seguintes tendências:

- a argamassa sem incorporação de FCC - G_COM - apresenta tensão média de aderência superior às argamassas com incorporação de FCC tanto aos 28 como aos 51 dias de idade
- todas as argamassas preparadas apresentam tensão de aderência superior ao valor requerido tecnologicamente - 1 MPa - pelo que todas as argamassas têm viabilidade no que se refere a esta propriedade
- as tensões de aderência tendencialmente ainda sofrem incremento ao longo do tempo de hidratação (sendo que a diminuição que se verifica na argamassa G_30FCC carece de estudo adicional para ser interpretável uma vez, que como referido acima, o número de amostras avaliadas pode não ter sido suficiente).

A realização deste ensaio permite também analisar o tipo de rotura ocorrido para cada amostra. As designações utilizadas para as diferentes roturas ocorridas são definidas pela norma EN 12004:2007+A1 e apresentadas esquematicamente no Anexo A.2.

A Tabela 4.13 apresenta a distribuição, em percentagem, dos tipos de rotura obtidos para cada idade de cada argamassa.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

Tabela 4.13 - Tipos de rotura obtidos durante o ensaio, conforme apresentadas no Anexo A.2

		Tipo de rotura			
		Coesiva no substrato (CF-S)	Coesiva na argamassa (CF-A)	Adesiva entre a argamassa e a chapa metálica (BS)	Adesiva entre a argamassa e o substrato (AF-S)
28 dias	G_COM	80 %	20 %	-	-
	G_10FCC	100 %	-	-	-
	G_20FCC	100 %	-	-	-
	G_30FCC	80 %	20 %	-	-
51 dias	G_COM	80 %	-	20 %	-
	G_10FCC	80 %	-	-	20 %
	G_20FCC	100 %	-	-	-
	G_30FCC	100 %	-	-	-

A ocorrência de falhas coesivas significa que a tensão de aderência da argamassa é superior à da lajeta betão. A análise da Tabela 4.13 permite verificar que para todas as argamassas preparadas a expressiva maioria das roturas são falhas coesivas no substrato.

Por fim, e apesar de não ser o objetivo deste ensaio, através da análise visual das amostras, concluiu-se ainda que:

- a argamassa com 30 % de incorporação do resíduo de FCC apresenta a superfície porosa quando comparada a qualquer outra argamassa preparada
- a argamassa de referência encontra-se fissurada, sendo que a fissuração diminui com a incorporação do resíduo sendo inexistente na argamassa com 30 % de incorporação do resíduo de FCC.

O Anexo B.7 apresenta as fotografias das amostras obtidas com o ensaio para cada argamassa.

4.4 Convergência das propriedades das argamassas com os requisitos tecnológicos

Os resultados obtidos na campanha experimental para as argamassas preparadas devem obedecer a valores impostos, para algumas propriedades, que são especificados (i) pela norma NP EN 1504-6 ou (ii) pela ficha técnica da argamassa comercial de ancoragem disponibilizada pela empresa *Saint-Gobain Weber* (Anexo A.1).

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

A Tabela 4.14 apresenta, para as propriedades avaliadas neste trabalho, a comparação entre os requisitos impostos e os resultados obtidos na campanha experimental.

Tabela 4.14 – Comparação das propriedades das argamassas estudadas e os requisitos impostos pela norma NP EN 1504-6 e pela ficha técnica da argamassa comercial de ancoragem (Anexo A.1)

Documento que especifica o valor	Propriedade		Argamassas				
			G_COM	G_10FCC	G_20FCC	G_30FCC	
Norma NP EN 1504-6	Teor de Cloretos (%)	≤ 0,05	*	*	*	*	
Ficha técnica da empresa	Massa volúmica aparente (g/cm ³)	2,1 - 2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	
	Resistência à tração por flexão (MPa)	7	> 6,0	9,9	9,2	8,2	6,2
		28	> 8,5	9,8	10,4	9,3	8,0
		91	> 8,5	10,8	10,9	10,5	8,5
	Resistência à compressão (MPa)	7	> 49,6	68,6	63,2	60,4	45,6
		28	> 49,6	77,1	78,5	75,7	63,6
		91	> 53,6	86,4	89,6	86,4	69,6
	Retração (mm/m)	< 2,5	0,6	0,5	0,4	0,4	
Aderência (N/mm ²)	> 1	1,89	1,61	1,48	1,76		

Nota: * - teor de cloretos, propriedade não avaliada neste trabalho

Apesar do teor de cloretos nas argamassas não ter sido estudada neste trabalho, sabe-se que o resíduo do FCC não tem cloretos na sua composição (Tabela 2.4). Desta forma é possível afirmar que este material não irá contribuir para o seu aumento nas argamassas e, uma vez que, a argamassa comercial cumpre este requisito, pode-se inferir que também este requisito deverá ser respeitado pelas argamassas com incorporação de resíduo de FCC.

Através da análise da Tabela 4.14 verifica-se que as argamassas preparadas durante este trabalho cumprem os requisitos tecnológicos impostos, exceto o caso de 30% de introdução de FCC. Com efeito, a resistência à tração por flexão aos 28 dias não atinge o valor estabelecido na ficha técnica da argamassa de referência. Assim como o valor mínimo para a resistência à compressão da argamassa comercial é definido, segundo a norma, como 80% do valor experimental obtido; neste caso, o valor relativo a 30% FCC aos 7 dias de idade está abaixo deste limite. Desta forma, conclui-se que é possível substituir parcialmente até 20%, em massa de cimento, pelo resíduo de FCC na produção de argamassas de ancoragem de armaduras de aço.

4. Apresentação, análise e discussão de resultados

5 Conclusões

A utilização do cimento na indústria da construção é uma realidade incontornável tanto no presente como no futuro, no entanto os impactes ambientais associados à sua produção são significativos (secção 2.1). Desta forma surge a necessidade de o substituir parcialmente na composição de materiais. O trabalho desenvolvido durante a campanha experimental (secção 3) pretende provar a viabilidade da utilização de argamassas com incorporação do resíduo de FCC como um substituto parcial do cimento corrente. Este estudo baseia-se na análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados comparando-os com (i) os valores da ficha técnica da argamassa cimentícia de referência (Anexo A.1), (ii) a argamassa produzida na campanha experimental e considerada de referência (G_COM) e (iii) as normas em vigor. Caso as propriedades dessas argamassas melhorem com a incorporação do resíduo de FCC (entre 10 e 30 %) a possibilidade do produto se tornar viável, num futuro próximo, aumenta.

Mais concretamente, os resultados dos ensaios realizados na campanha experimental para as argamassas no estado fresco permitem obter as seguintes conclusões:

- a introdução do resíduo de FCC, como substituto parcial do cimento, aumenta de forma linear a necessidade de incorporação de água, como revelou o ensaio de consistência por espalhamento (secção 3.3). Com este ensaio definiram-se as novas composições das argamassas com substituição parcial do cimento
- à medida que se aumenta a percentagem de incorporação do resíduo de FCC a massa volúmica das argamassas preparadas diminui (secção 4.2.2).

A análise dos resultados, dos ensaios realizados para as argamassas no estado endurecido, permite obter as seguintes conclusões:

- no ensaio de velocidade de propagação de ultrassons (secção 4.3.1) verifica-se que:
 - ao longo do tempo de hidratação ocorre um incremento da velocidade de propagação das ondas associado ao decorrer do tempo de hidratação das argamassas, o que significa que estas se vão tornando cada vez mais compactas
 - a velocidade de propagação das ondas é inferior nas argamassas com incorporação de resíduos do que na argamassa de

- referência, sugerindo argamassas com módulos de elasticidade menores
- a incorporação do resíduo de FCC retarda o processo de densificação da matriz cimentícia, no entanto, as argamassas com 10 % e 20 % de incorporação do resíduo estabilizam no mesmo valor da argamassa de referência
 - no ensaio de resistividade elétrica (secção 4.3.2), à semelhança do ensaio da velocidade dos ultrassons, verifica-se que:
 - à medida que aumenta o tempo de hidratação das amostras, aumenta a resistividade elétrica - este comportamento está associado à densificação da matriz cimentícia das amostras
 - as amostras com incorporação do resíduo apresentam tipicamente resistividades elétricas inferiores à argamassa de referência
 - a resistividade aumenta ao longo do tempo de hidratação, sendo que as argamassas incorporação do resíduo demoram mais tempo a atingir o mesmo valor da argamassa de referência - desta forma reforça-se a conclusão de que a incorporação do resíduo de FCC atrasa o processo de densificação da matriz cimentícia
 - as argamassas com 10 % e 20 % de incorporação do resíduo do FCC, a partir de cerca dos 60 dias de idade, ultrapassam os resultados da argamassa de referência – esse comportamento é associado à atividade pozolânica do resíduo
 - no ensaio de resistência mecânica de tração por flexão (secção 4.3.3.1) verifica-se que:
 - as tensões de rotura à tração por flexão são tipicamente inferiores à da argamassa de referência, com exceção da argamassa com 10 % de incorporação do resíduo que, em média, apresenta as mesmas tensões da argamassa de referência. A argamassa com 20 % de incorporação do resíduo, em média apresenta tensões 9 % mais baixas e a argamassa com 30 % de incorporação do resíduo 34 %
 - o aumento progressivo do teor de incorporação do resíduo de FCC na argamassa, provoca a diminuição da tensão de rotura à tração por flexão. A título de exceção, a incorporação de 10% do resíduo de FCC resulta num aumento da tensão em comparação com a argamassa de referência

5. Conclusões

- aos 90 dias, as argamassas preparadas (10, 20 e 30 % de incorporação do resíduo) cumprem os valores impostos pela ficha técnica da empresa (Anexo A.1)
- no ensaio de resistência mecânica à compressão (secção 4.3.3.2), os resultados obtidos apresentam um comportamento semelhante aos do ensaio de tração por flexão:
 - as tensões de rotura à compressão são tipicamente inferiores à da argamassa de referência - com exceção da argamassa com 10 % de incorporação do resíduo, em média, apresenta tensões iguais às da argamassa de referência. A argamassa com 20 % de incorporação do resíduo, em média apresenta tensões de rotura à compressão 4 % mais baixas e a argamassa com 30 % de incorporação do resíduo 30 %, apresenta tensões médias de rotura 30 % mais baixas
 - o aumento progressivo do teor de incorporação do resíduo de FCC na argamassa, provoca a diminuição da tensão à compressão. A título de exceção, a incorporação de 10% do resíduo de FCC resulta num aumento da tensão em comparação com a argamassa de referência
 - aos 90 dias, as argamassas preparadas (10 %, 20 % e 30 % de incorporação do resíduo) cumprem os valores impostos pela ficha técnica da empresa
- os resultados do ensaio de variação dimensional (secção 4.3.4) permitem concluir que:
 - a retração da argamassa com a incorporação do resíduo de FCC, aos 91 dias de idade, é inferior à da argamassa de referência, em média cerca de 29 %
 - o progressivo aumento do teor de incorporação do resíduo de FCC não se revela significativo nos resultados, é possível verificar que para basta a incorporação do resíduo (10 %, 20 % ou 30 %) para as retrações se manterem estatisticamente iguais
- o ensaio de difusão dos cloretos (secção 4.3.5) permite obter resultados sobre a profundidade média de difusão dos cloretos e sobre o seu coeficiente de migração. Através da sua análise é possível concluir:
 - as argamassas com 10 % e 20 % de incorporação do resíduo de FCC apresentam os resultados da profundidade média de difusão e dos coeficientes de migração dos cloretos estatisticamente

iguais aos da argamassa de referência, enquanto a argamassa com 30 % de incorporação apresenta os resultados superiores aos da argamassa de referência

- as argamassas com incorporação do resíduo de FCC permitem concluir que a profundidade média de difusão e os coeficientes de migração dos cloretos aumentam com o aumento do teor de incorporação
- visualmente verificou-se ainda a existência de cloretos dispersos na amostra da argamassa de referência, em ambas as idades. A análise visual das argamassas com incorporação do resíduo permitiu verificar a diminuição significativa da presença dos cloretos com o aumento do teor de incorporação
- o ensaio de aderência (secção 4.3.6) permite concluir que:
 - todas as argamassas cumprem o valor de referência da ficha técnica da argamassa de referência (Anexo A.1) que garante que as argamassas de ancoragem devem resistir a tensão de 1 MPa
 - a incorporação do resíduo de FCC fez diminuir as tensões médias de aderência das argamassas cerca de 17 % - a argamassa de referência apresenta a tensão média de aderência de 1,97 MPa enquanto as argamassas com incorporação do resíduo de FCC apresentam em média 1,62 MPa de tensão média de aderência

Na perspetiva tecnológica, para as propriedades estudadas neste trabalho, as argamassas preparadas satisfazem (i) os requisitos de identificação e de desempenho da norma NP EN 1504-6 para argamassas de ancoragem de armaduras de aço e (ii) os valores impostos pela ficha técnica da empresa *Saint-Gobain Weber* com incorporação até 20 %.

5.1 Perspetivas de trabalho futuro

Após o estudo realizado nesta dissertação, existem ainda questões que ficam por esclarecer e que podem ser analisadas em futuros trabalhos. Desta forma, propõem-se os seguintes estudos complementares:

- avaliar se as argamassas com incorporação de resíduo na composição do ligante cumprem os restantes requisitos da norma NP EN 1504-6, que não foram estudados neste trabalho

5. Conclusões

- aplicar um plano de experiências fatorial (DoE – *design of experiments*) que permita identificar as composições ideais das argamassas cimentícias preparadas
- avaliar a influência do resíduo de FCC noutras argamassas cimentícias produzidas pela *Saint-Gobain Weber* visando avaliar a viabilidade da comercialização de novos produtos com resíduo de FCC na sua composição
- avaliar os custos associados à reutilização de resíduos (transporte, deposição de subprodutos, licenças, entre outros) por forma a determinar a competitividade comercial desta nova argamassa
- avaliar o ciclo de vida e os ganhos respetivos pela substituição de cimento Portland por FCC.

Referências bibliográficas

- [1] J. E. D. Alves, “A terra no limite,” *Veja*, pp. 24–27, 2010.
- [2] E. Commission, “Cement and Lime,” 2017. [Online]. Disponível: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/industries/non-metals/cement-lime_en. [Visitado: 05-Nov-2017].
- [3] F. Pacheco-Torgal e S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 512–519, Apr. 2012.
- [4] Comissão Mundial das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento, “Rumo a uma Indústria Cimenteira Sustentável,” 2002.
- [5] J. Davidovits, “Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries,” *World Resour. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278, 1994.
- [6] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, e L. O. Meida, “Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry *,” *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 26, pp. 303–329, 2001.
- [7] C. Hall, “Fundamentals of Materials Science,” em *Craig’s Restorative Dental Materials*, Edinburgh: ICE Manual of Construction Materials, 2009, pp. 33–81.
- [8] C. Costa, *Ligantes Hidráulicos*. Lisboa: ISTPress, 2012.
- [9] S. Maalej, Z. Lafhaj, e M. Bouassida, “Micromechanical modelling of dry and saturated cement paste: Porosity assessment using ultrasonic waves,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 51, pp. 8–14, 2013.
- [10] J. H. Sharp, E. M. Gartner, e D. E. Macphee, “Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium,” em *Advances in Cement Research*, vol. 22, no. 4, Thomas Telford Ltd, 2010, pp. 195–202.
- [11] Agencia Portuguesa do Ambiente, “Políticas e Resíduos,” 2017. [Online]. Disponível: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84>.
- [12] M. S. Lemos, “Solidificação e estabilização da fração de finos de catalisador gasto de uma unidade de FCC,” Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola de Química, 2012.
- [13] A. M. D. Bejinha, “Estruturas de contenção ancoradas sujeitas a acção sísmica.

- Análise do comportamento.,” Instituto Superior Técnico, 2009.
- [14] J. Mascarenhas, *Sistemas de Construção*, 8º. 2012.
- [15] A. Peixoto, “Ancoragens,” 2017. [Online]. Disponível: <http://www.apgeotecnia.pt/geotechnics/anchors.html>. [Visitado: 21-Abr-2017].
- [16] Ancorportgroup - Geotechnical and Foundation Engineering, “Ancoragens,” 2015. [Online]. Disponível: http://www.ancorportgroup.com/services/ancoragens_6. [Visitado: 06-Set-2017].
- [17] Mapei, “Argamassa fluída expansiva para ancoragens,” 2016.
- [18] A. Sousa Coutinho, “Cimentos,” em *Fabrico e Propriedades do Betão - Volume I*, 2ª., LNEC, Ed. Lisboa, 1988, pp. 125–283.
- [19] A. Gomes, A. Pinto, e J. B. Pinto, “Cimento Portland e Adições,” 2013.
- [20] M. I. de A. L. da Conceição, “Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [21] D. A. P. Afonso, “Efeito da Moagem do Catalisador Exausto de Cracking Catalítico nas Propriedades de Argamassas de Cimento,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [22] J. L. do S. António, “Estudo de viabilidade da produção de Betões AutoCompactáveis com incorporação de Catalisador exausto da industria petroquimica,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [23] A. P. F. Pinto, A. Gomes, e J. B. Pinto, “Materiais de Construção - Argamassas,” Lisboa, 2006.
- [24] M. Antunes, “Eco-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera,” Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [25] P. Fragateiro, “Influência do Ligante no Desempenho do Betão,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [26] R. G. Blezard *et al.*, *LEA'S - Chemistry of cement and concrete*, Fourth. Elsevier Ltd., 1988.
- [27] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, e V. M. John, *Eco-efficient concrete*. Woodhead Publishing, 2013.

Referências bibliográficas

- [28] M. G. Margalha, “Argamassas - Conservação e Recuperação do Património,” Évora, 2007.
- [29] V. A. M. Henriques, “Impacte Ambiental de Estruturas de Edifícios - A Produção de CO₂,” Instituto Superior Técnico, 2011.
- [30] K. H. Obla *et al.*, “Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete,” Farmington Hills, USA, 2012.
- [31] M. Cyr, P. Lawrence, e E. Ringot, “Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 264–277, Feb. 2006.
- [32] J. Payá, J. M. Monzó, M. . Borrachero, e S. Velázquez, “Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 603–609, 2003.
- [33] J.-H. Wu, W.-L. Wu, e K.-C. Hsu, “The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 245–253, 2003.
- [34] J. M. Aldred *et al.*, “Guide for the Use of Silica Fume in Concrete,” 234R, 2012.
- [35] Z. Bajja, W. Dridi, A. Darquennes, R. Bennacer, P. Le Bescop, e M. Rahim, “Influence of slurried silica fume on microstructure and tritiated water diffusivity of cement pastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 85–93, Feb. 2017.
- [36] G. İnan Sezer, “Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 613–618, Jan. 2012.
- [37] S. M. Motahari Karein, A. A. Ramezani pour, T. Ebadi, S. Isapour, e M. Karakouzian, “A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 573–581, Dec. 2017.
- [38] Z. Zhang, B. Zhang, e P. Yan, “Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 82–93, Feb. 2016.
- [39] D. Pedro, J. de Brito, e L. Evangelista, “Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 803–814, Aug. 2017.

- [40] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, pp. 923–932, 2011.
- [41] D. D. L. Chung, "Review Improving cement-based materials by using silica fume," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, pp. 673–682, 2002.
- [42] J. G. Yates e P. Lettieri, *Fluidized-Bed Reactors: Processes and Operating Conditions*, 26th ed. Switzerland: Springer, 2016.
- [43] J. L. António, P. Silva, e C. Costa, "Fresh Properties e Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Containing Waste Fluid Catalytic Cracking Catalyst," Lisboa, 2014.
- [44] J. Payá, J. M. Monzó, M. V. Borrachero, e S. Velázquez, "Pozzolan reaction rate of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in cement pastes," *Adv. Cem. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 112–118, Apr. 2013.
- [45] C. Costa, C. Ferreira, M. F. Ribeiro, e A. Fernandes, "Alkali-Activated Binders Produced from Petrochemical Fluid Catalytic Cracking Catalyst Waste," *IJRET Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 13, pp. 114–122, 2014.
- [46] S. U. Khan, M. F. Nuruddin, T. Ayub, e N. Shafiq, "Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete.," *ScientificWorldJournal.*, vol. 2014, p. 986567, 2014.
- [47] S. Nunes e C. Costa, "Numerical optimization of self-compacting mortar mixture containing spent equilibrium catalyst from oil refinery," *J. Clean. Prod.*, vol. 158, pp. 109–121, 2017.
- [48] ECCPA, "FCC Equilibrium Catalyst (including FCC catalyst fines) finds safe reuse / rework outlets in Europe," no. January, pp. 1–3, 2006.
- [49] F. Ferella, V. Innocenzi, e F. Maggiore, "Oil refining spent catalysts: A review of possible recycling technologies," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 108, pp. 10–20, 2016.
- [50] "Refinaria de Sines - Galp," 2016. [Online]. Disponível: <http://www.galpennergia.com/PT/agalpennergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/RefinariaSines/Paginas/Refinaria-de-Sines.aspx>. [Visitado: 01-Nov-2017].
- [51] N. J. P. de Brito, "Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão," Instituto de Engenharia de Lisboa, 2013.

Referências bibliográficas

- [52] IPQ, “NP EN 1097-6 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água,” 2003.
- [53] I. Laginha, P. Silva, e C. Costa, “Self-Compacting Concrete Containing Limestone and a Waste Oil Refinery Catalyst,” *Proc. 1st Concr. Innov. Conf. - CIC 2014*, 2014.
- [54] J. Payá, J. M. Monzó, M. V. Borrachero, e S. Velázquez, “Cement equivalence factor evaluations for fluid catalytic cracking catalyst residue,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 39, pp. 12–17, May 2013.
- [55] N. T. C. C. Cruz, “Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico,” Instituto Superior Técnico, 2008.
- [56] V. G. Haach, R. Carrazedo, e L. M. F. Oliveira, “Resonant acoustic evaluation of mechanical properties of masonry mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 494–505, Oct. 2017.
- [57] P. K. Metha e P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Third. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
- [58] H. J. Yim, H. Lee, e J. H. Kim, “Evaluation of mortar setting time by using electrical resistivity measurements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 679–686, Aug. 2017.
- [59] “IPAC,” 1996. [Online]. Disponível: http://www.ipac.pt/pesquisa/ficha_lae.asp?ID=L0201. [Visitado: 17-Out-2017].
- [60] G. Jen, N. Stompinis, e R. Jones, “Chloride ingress in a belite-calcium sulfoaluminate cement matrix,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 98, pp. 130–135, 2017.
- [61] J. de S. Coutinho, “Materiais de Construção 1,” 1999.
- [62] C. Costa e P. Marques, “Low-carbon cement with waste oil-cracking catalyst incorporation,” em *2012 IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*, 2012, pp. 1–9.
- [63] R. G. Faustino, “Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo,” Instituto de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [64] I. Tekin, M. Yasin Durgun, O. Gencil, T. Bilir, W. Brostow, e H. E. Hagg Lobland, “Concretes with synthetic aggregates for sustainability,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 425–432, Feb. 2017.
- [65] M. D. de F. Prata, “Aplicação do plano fatorial para o estudo de betão auto-

compactável com incorporação de resíduo da Indústria Petrolífera,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.

- [66] C. Costa, P. A. Carvalho, e P. Marques, “Relationship between microstructure and mechanical properties of binary blended cement mortars containing waste oil cracking catalysts,” Lisboa, 2012.
- [67] E. Zornoza, P. Garcés, J. Payá, e M. A. Climent, “Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 126–139, 2009.

Anexos

Anexo A – Documentos de apoio

Anexo B – Análises de resultados

Anexo A

Anexo A.1 – Ficha técnica da argamassa comercial da *Saint-Gobain Weber*

Anexo A.2 – Tipos de rotura do ensaio de aderência



weber.tec grout – Pág 1/3

weber.tec grout

Argamassa fluida para selagens de altas prestações.
Presa rápida. Retração controlada.

1. UTILIZAÇÕES

- Ancoragens de elevadas prestações de elementos metálicos em betão: postes, barras e varões, chumbadouros, pilares, bancadas de maquinaria, etc.
- Selagem de atravessamentos de tubagem em paredes de betão.
- Selagem de uniões rígidas entre elementos pré-fabricados de betão.
- Enchimento de zonas com cofragem e reforço de estruturas.
- Preenchimento de gretas e cavidades no interior de estruturas de betão.

2. LIMITES DE UTILIZAÇÃO

- Temperatura de utilização: +5°C a 35°C.
- Devido à sua fluidez, **weber.tec grout** deve ser aplicado com recurso a cofragens estanques.
- Caso seja necessário execução de enchimentos de maior espessura (até 100cm), deverão ser adicionados agregados com até 4cm, na proporção máxima de 10% em volume. Nestas condições, as novas prestações mecânicas serão:

Água de amassadura	Retração	Resistência a compressão	Resistência a flexão
13,5%	1,2 mm/m	40,0 MPa	6,0 MPa

3. COMPOSIÇÃO

- Cimento, areias calcárias, aditivos orgânicos e inorgânicos.
- Granulometria máxima: 3 mm.

4. CONSUMO

- Cerca de 2200kg/m³; 22kg/m²/cm de espessura

5. RECOMENDAÇÕES

- Não aplicar com chuva, risco de gelo, em pleno sol ou com suporte quente.
- Em caso de temperaturas baixas, usar água aquecida; em caso de temperaturas elevadas, usar água fria.
- Não acrescentar água à argamassa que tenha perdido a sua fluidez.
- Realizar as amassaduras o mais próximo possível do local de aplicação.
- Manter a cofragem no sítio pelo menos durante 24 horas.
- Lavar as ferramentas com água, enquanto o produto está fresco. Depois de endurecido, só limpando mecanicamente.

MOD.FT.072 /06
05-05-2014




Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. • NIF 502 208 546 • Zona Industrial de Taboeira, 3800-055 Aveiro
telf. : +351 234 10 10 10 • fax : +351 234 30 11 48 • www.weber.com.pt



6. CARACTERÍSTICAS DE UTILIZAÇÃO

- Espessura de aplicação: 1 a 30 cm (para espessuras superiores ver campo 2.)
- Tempo de trabalhabilidade: 15 minutos
- Início de presa: aprox. 4 horas
- Fim de presa: aprox. 5 horas

Os tempos indicados, obtidos em condições ambientais normalizadas (+20°C), poderão ser alongados a baixas temperaturas e encurtados a temperaturas mais elevadas.

7. PRESTAÇÕES (*)

- Densidade endurecido: aprox. 2,3
- Teor de cloretos: $\leq 0,05\%$ (massa)
- Reacção ao fogo: Classe A1
- Resistência ao arranque (deslocamento sob força de 75kN): $\leq 0,6$ mm
- Retracção: $\leq 2,5$ mm/m
- Aderência a betão: $\geq 1,0$ N/mm² (1 MPa)
- Absorção de água por capilaridade: $< 0,06$ kg/(m².min^{1/2})
- Resistências mecânicas(adição de 13,5% água) :

COMPRESSÃO (MPa)			
24 horas	7 dias	28 dias	90 dias
34,0	62,0	62,0	67,0

FLEXÃO (MPa)			
24 horas	7 dias	28 dias	90 dias
5,0	6,0	8,5	8,5

(*) Os resultados foram obtidos em ensaios realizados em condições normalizadas, e podem variar em função das condições de aplicação.

8. PREPARAÇÃO DO SUPORTE

- O suporte deve estar absolutamente limpo, isento de partículas soltas, óleos e gorduras.
- Eliminar por picagem todas as partes soltas, deixar arestas vivas no contorno da zona a encher e garantir uma superfície rugosa para o contacto com a argamassa.
- No caso de utilização de cofragens, limpá-las cuidadosamente, garantir a sua estanquidade e prever locais para verter a argamassa e para saída do ar em ponto oposto.
- Humedecer abundantemente o suporte de betão e deixar que este absorva a água; na altura da aplicação, o suporte deve estar húmido, não devendo no entanto existir charcos de água na superfície.

9. APLICAÇÃO

- Amassar **weber.tec grout** com 3 a 3,5 litros de água por saco (idealmente 13,5% água), em betoneira ou com misturador eléctrico lento. Adicionar inicialmente cerca de 2/3 da água e juntar lentamente o pó. Acrescentar o resto da água e misturar até obter uma pasta fluida, homogénea e sem grumos.
- Aplicar a mistura de imediato, vertendo no local previsto, para aproveitar ao máximo o seu efeito expansivo e o seu estado de fluidez. **weber.tec grout** irá espalhar-se, devido à sua consistência, no interior do espaço a preencher.
- Em enchimentos por baixo de placas horizontais, encher até um nível superior ao da face inferior da placa, para garantir que foi expulso o ar por baixo da mesma e que **weber.tec grout** preencheu perfeitamente o volume pretendido. Realizar cura húmida da superfície exposta, durante 48 horas.

MOD.FT.072 /06
05-05-2014



10. RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO

- Pela presença de cimento na composição, o produto é considerado irritante para os olhos, vias respiratórias e mucosas.
- Como medida de proteção individual devem usar-se luvas não absorventes e vestuário de trabalho que evite o contacto do produto com o utilizador.
- O uso de máscara de proteção de poeiras será necessário caso se formem nuvens de poeira significativas.

Para mais informação consultar Ficha de Dados de Segurança.

APRESENTAÇÃO

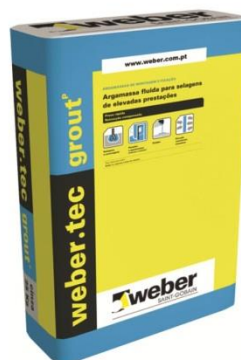
Saco de 25 kg

COR

Cinza

CONSERVAÇÃO

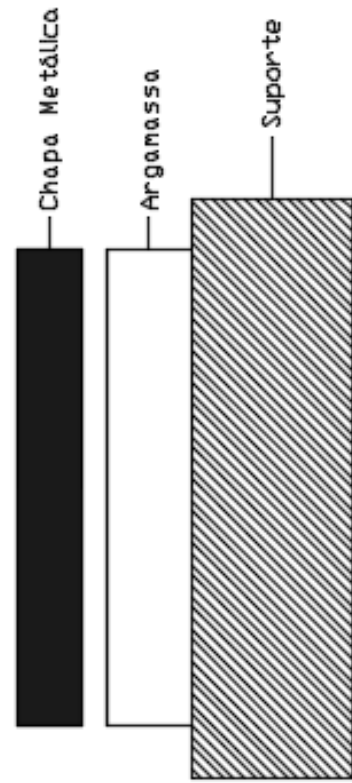
12 meses a partir da data de fabrico em embalagem original fechada e ao abrigo da humidade



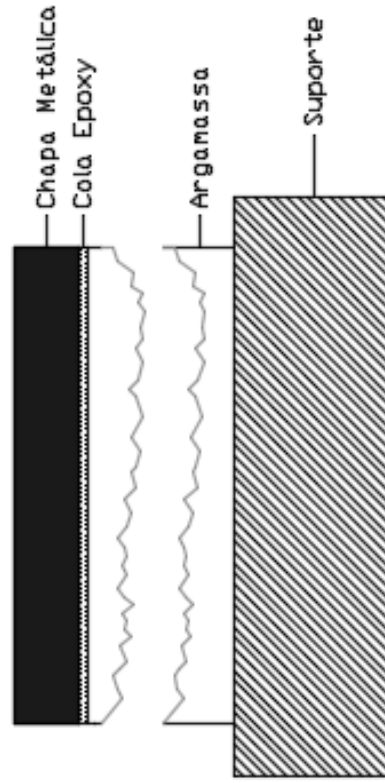
As indicações de utilização e dados técnicos sobre o produto são apresentados de boa-fé e baseiam-se na experiência e conhecimento acumulados, em situações de utilização tipificadas. As condições de aplicação e utilização poderão influenciar o comportamento do produto, pelo que será aconselhável realizar verificações e testes em cada situação específica.



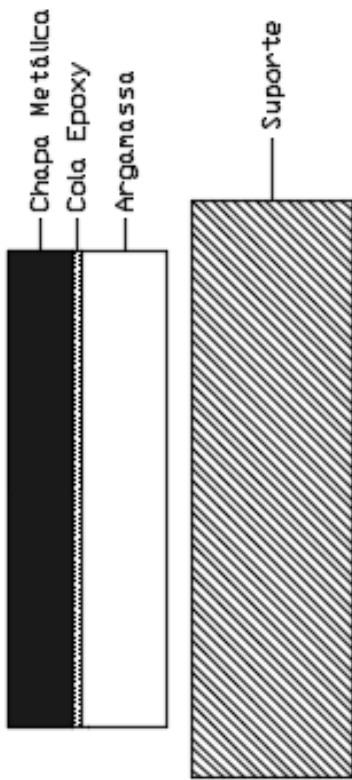
Anexo A.2 – Tipos de rotura



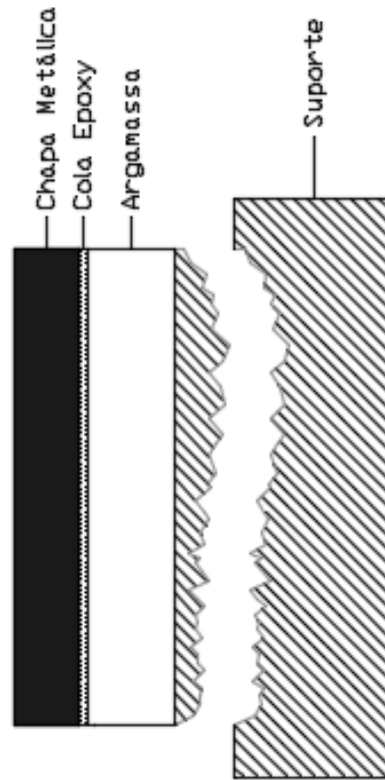
b) BS - Falha adesiva entre a argamassa e a chapa metálica



d) CF-A - Falha coesiva da argamassa



a) AF-S - Falha adesiva entre a argamassa e o substrato



c) CF-S - Falha coesiva do substrato

Anexo B

B.1 – Velocidade de propagação dos ultrassons

B.2 – Resistividade Elétrica

B.3 – Resistência mecânica: Tração por flexão

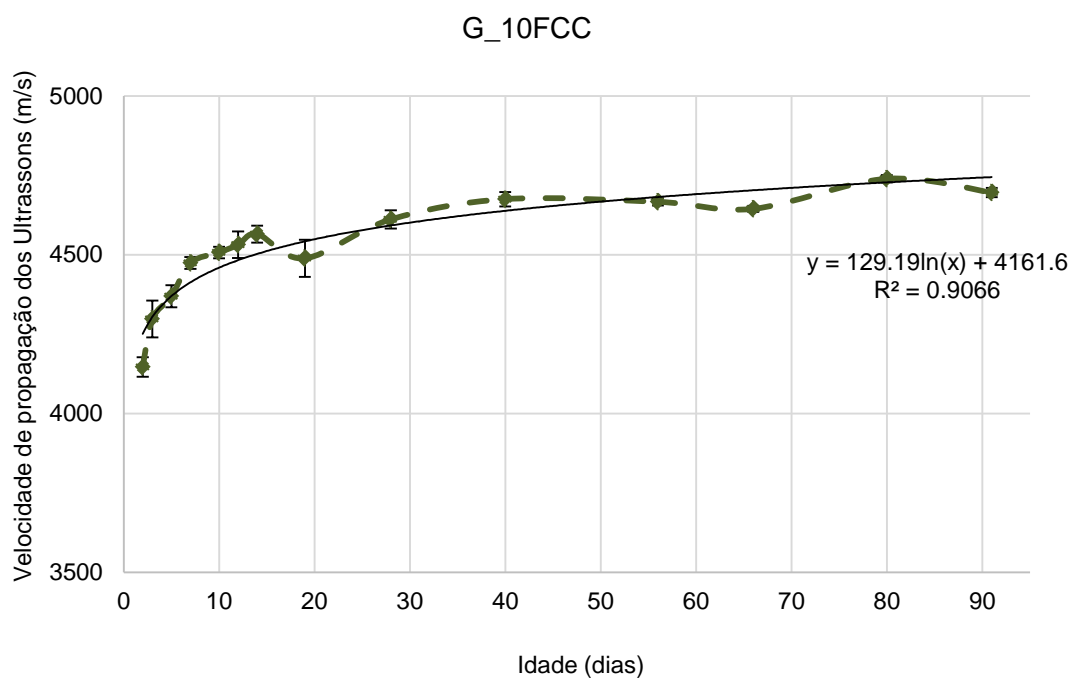
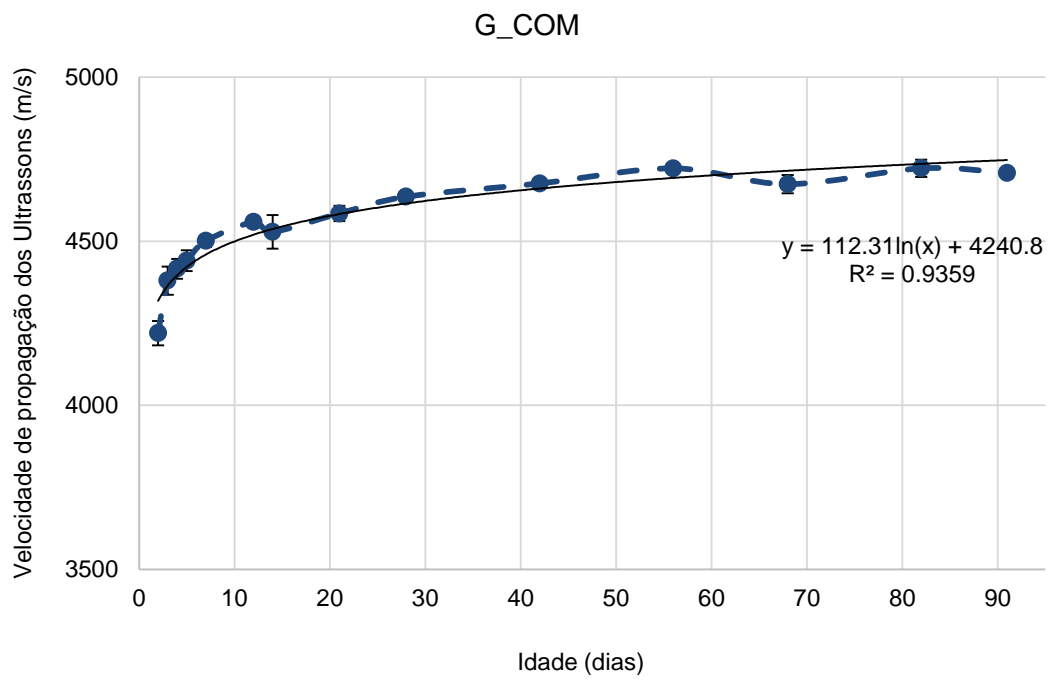
B.4 – Resistência mecânica: Compressão

B.5 – Difusão dos cloretos / Coeficientes de migração

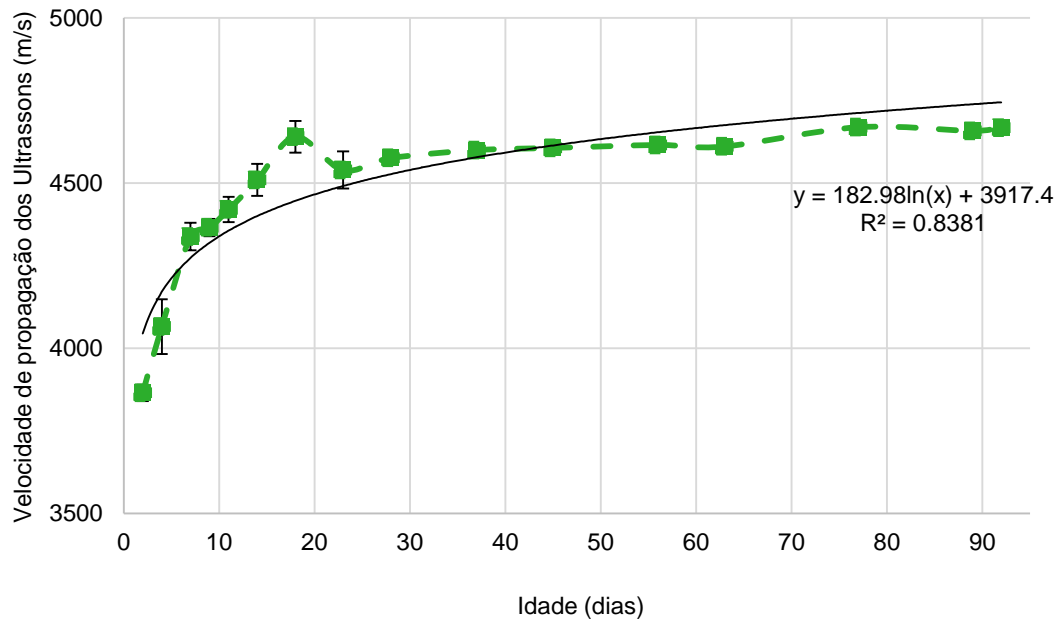
B.6 – Fotografias das amostras do ensaio de difusão dos cloretos

B.7 – Fotografias das amostras do ensaio de aderência

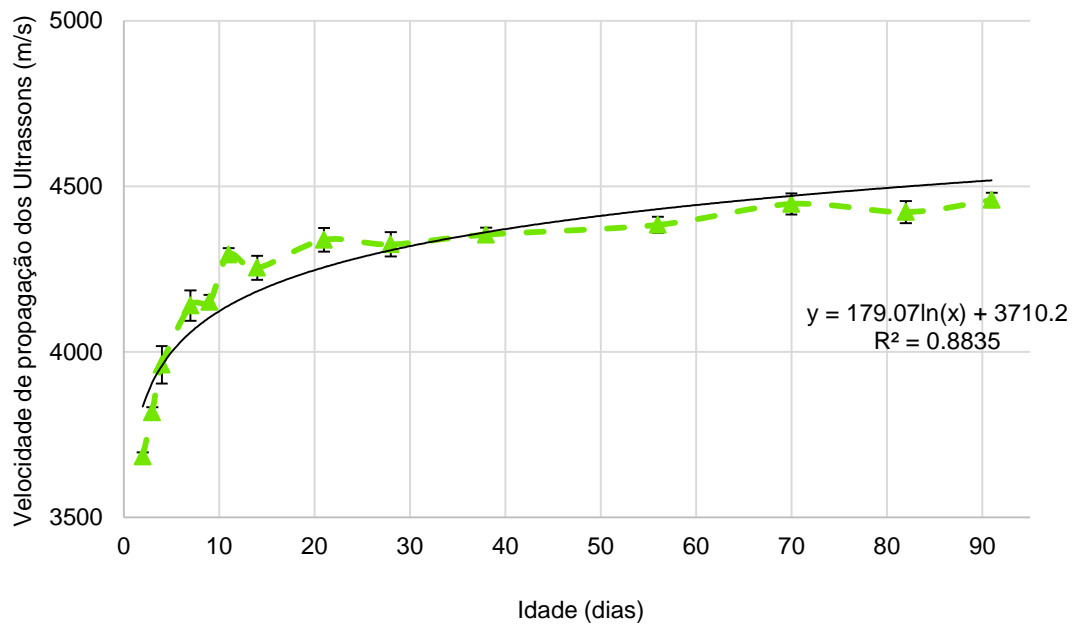
Anexo B.1 – Velocidade de propagação dos ultrassons



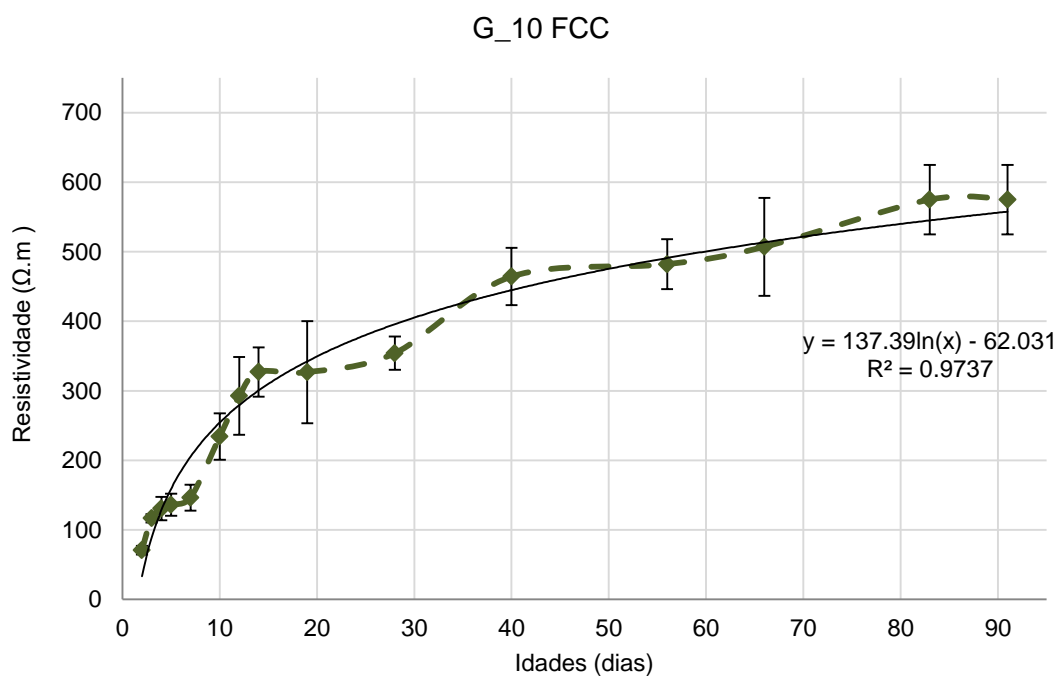
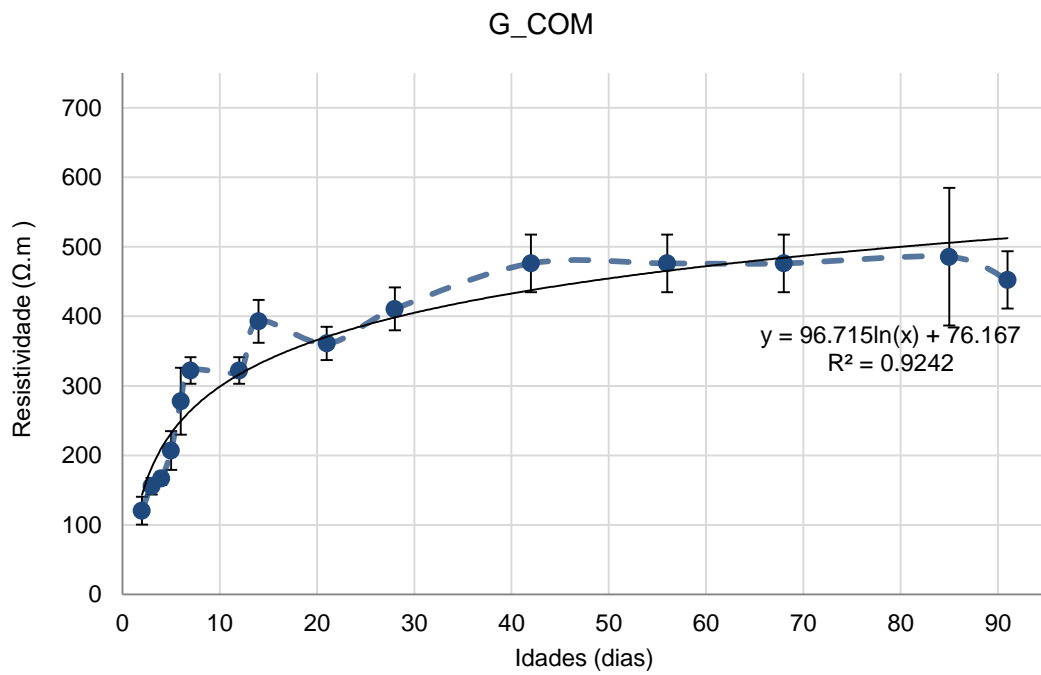
G_20FCC



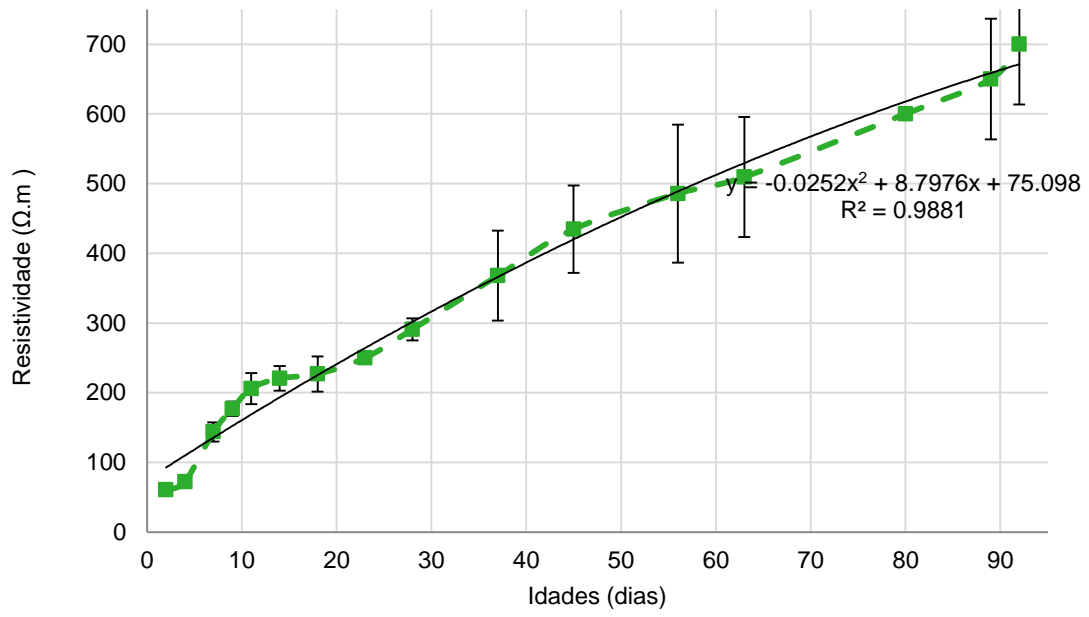
G_30FCC



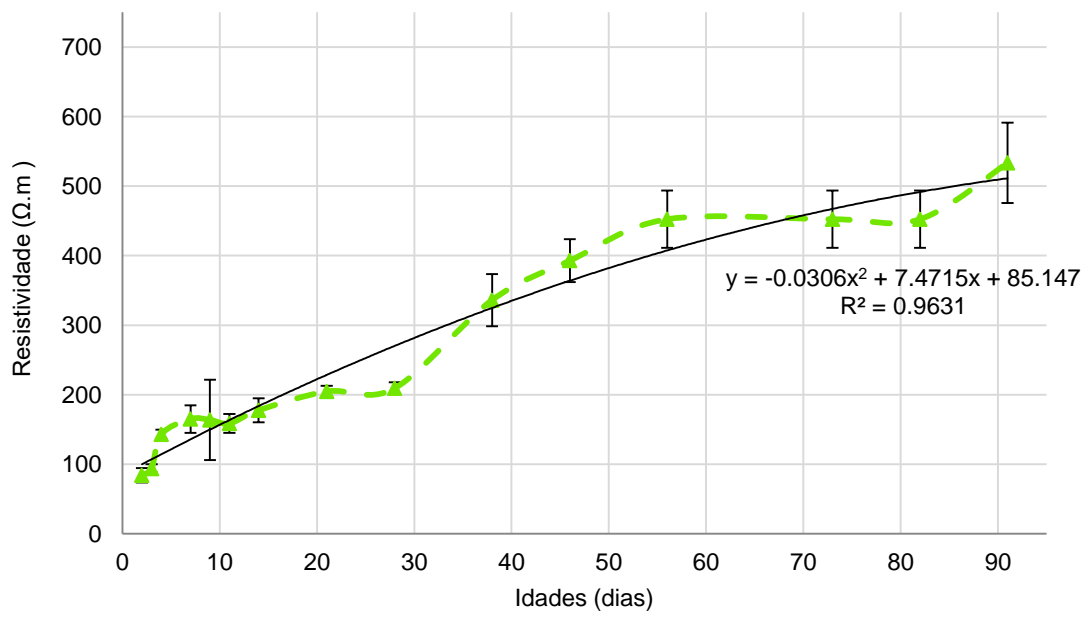
Anexo B.2 – Resistividade Elétrica



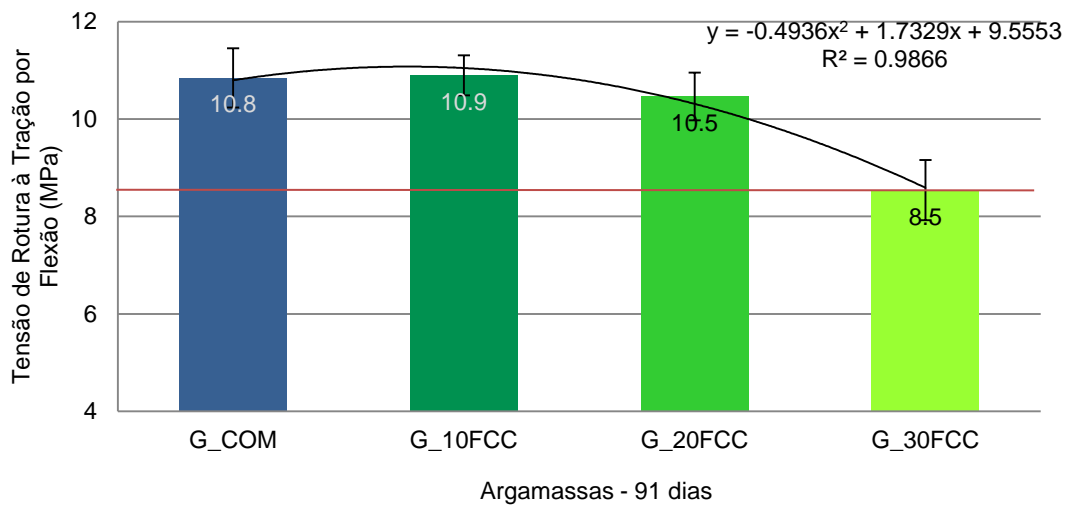
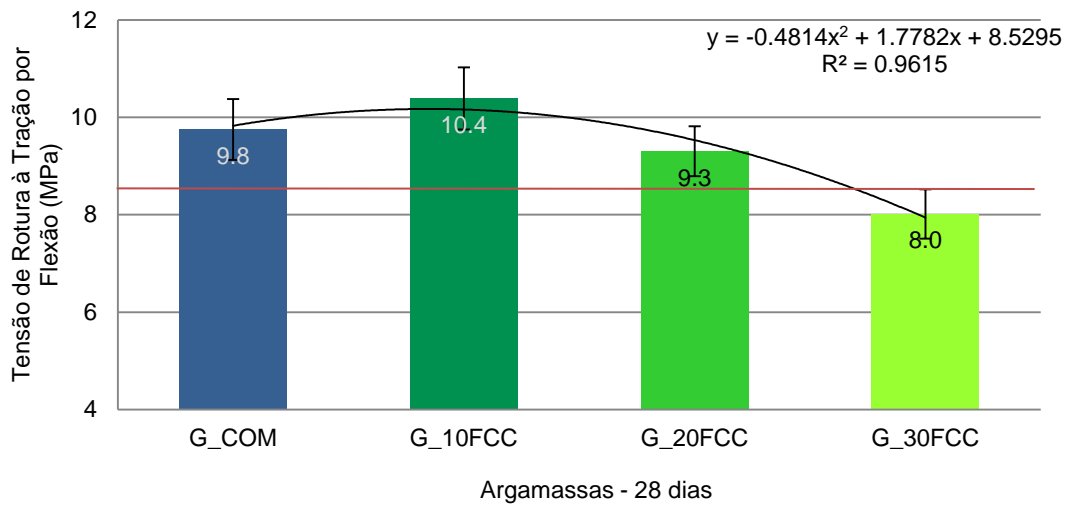
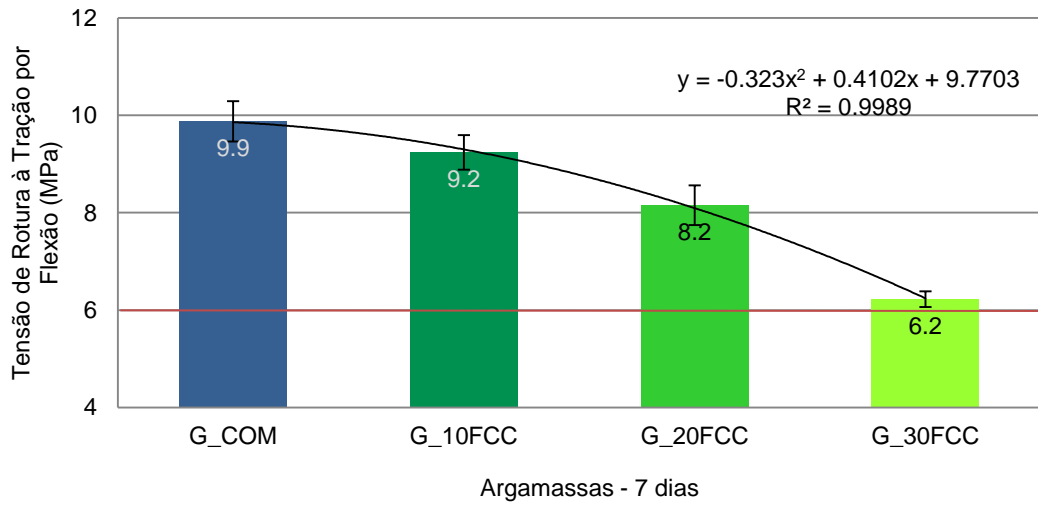
G_20FCC



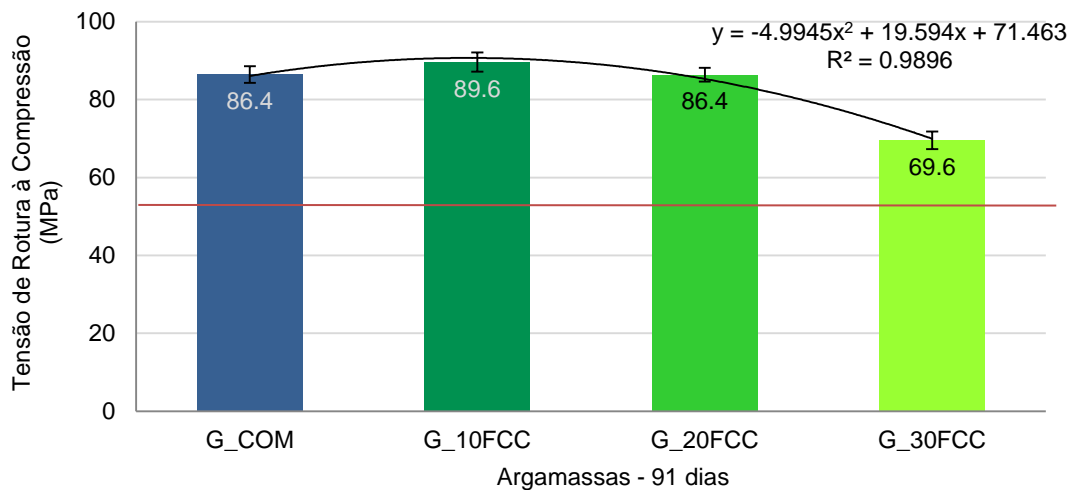
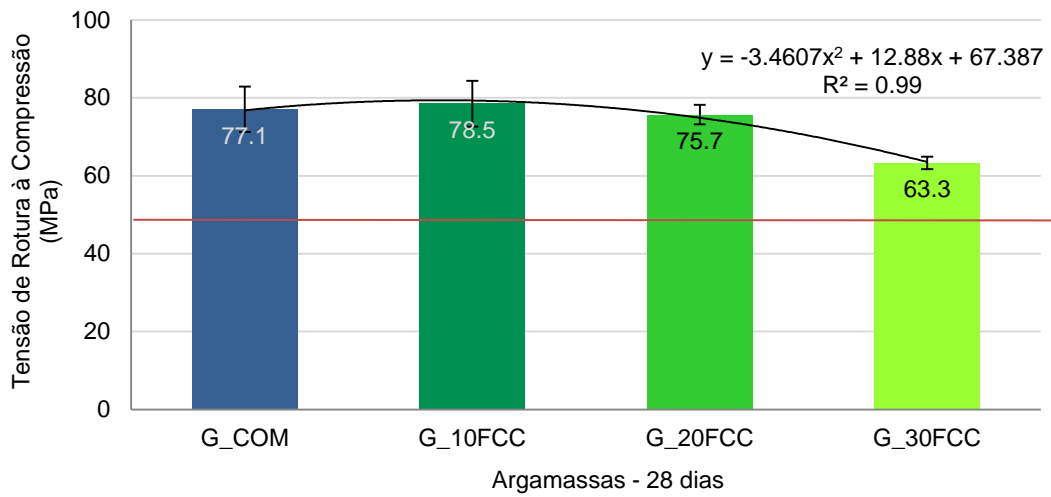
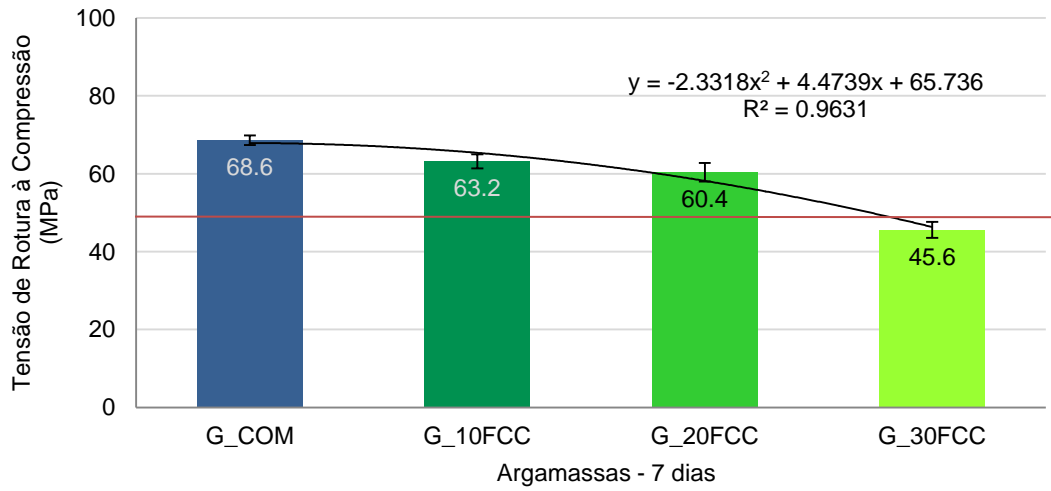
G_30FCC



Anexo B.3 – Resistência mecânica: Tração por flexão

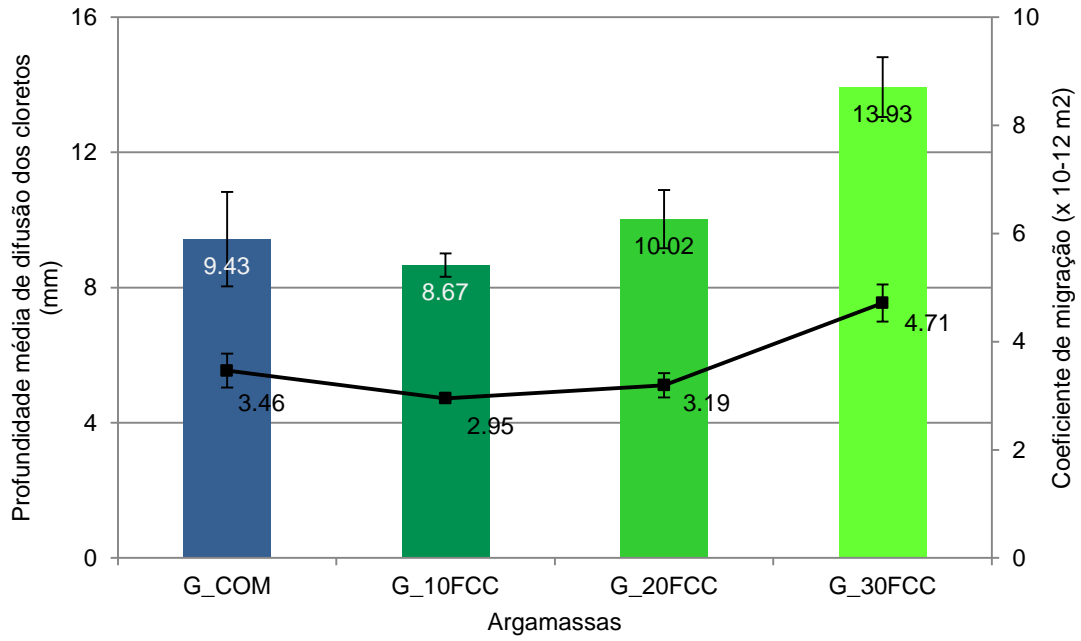


Anexo B.4 – Resistência mecânica: Compressão

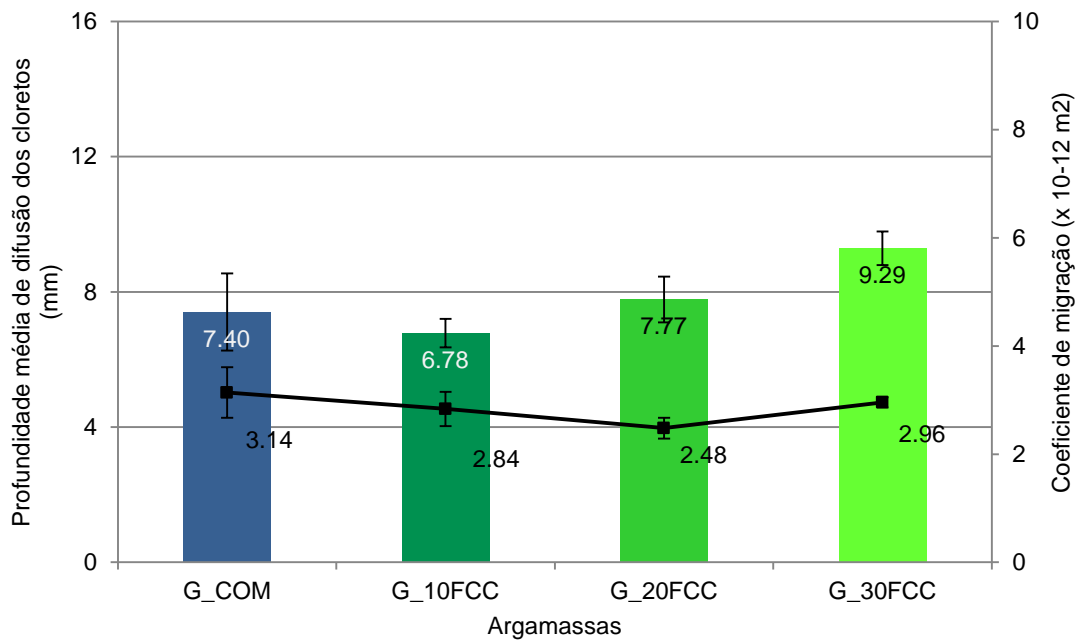


Anexo B.5 – Difusão dos cloretos / Coeficientes de migração

28 dias



91 dias

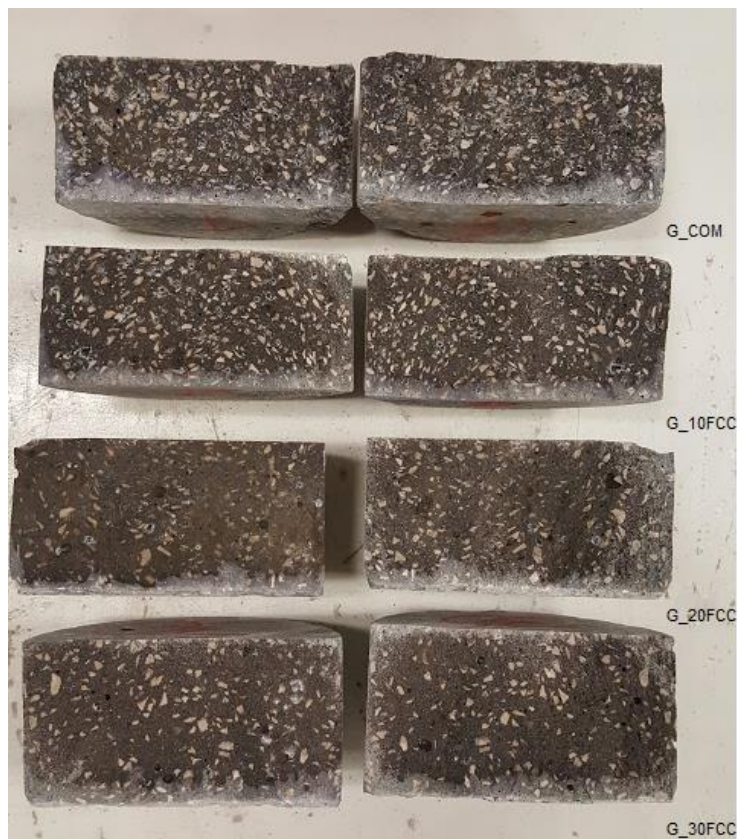


Anexo B.6 – Fotografias das amostras do ensaio de difusão dos cloretos

28 dias

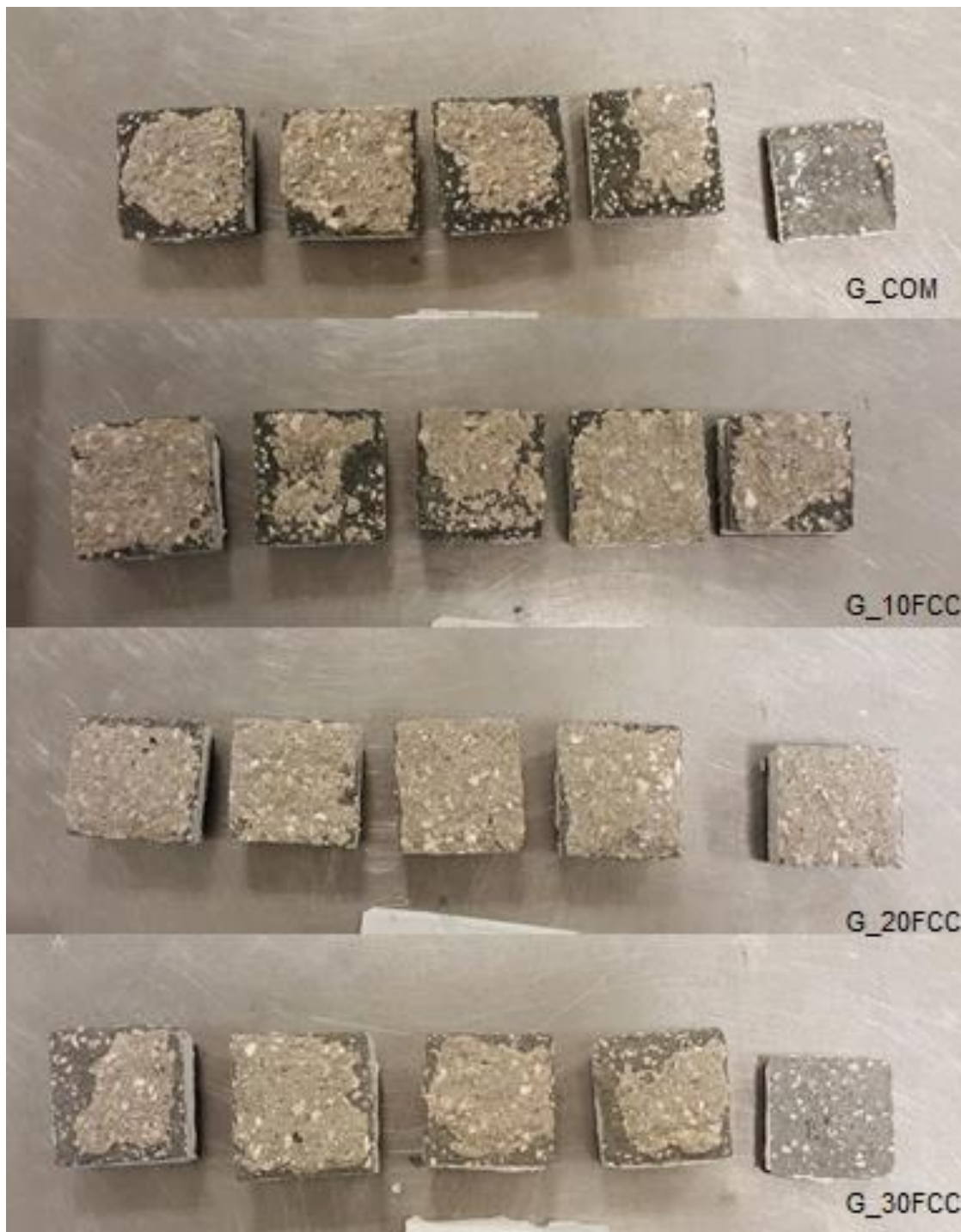


91 dias



Anexo B.7 – Fotografias das amostras do ensaio de aderência

28 dias



51 dias

