



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

ECO-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera

MARILYNE JUNQUEIRA ANTUNES
(Licenciada em Engenharia Civil)

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

Orientador (es):

Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Dezembro de 2013

RESUMO

O betão é um material que pode ser utilizado na execução de um número significativo de obras de engenharia civil, incluindo estruturas de betão simples, betão armado e betão pré-esforçado. No entanto, o seu impacto ambiental – oriundo, principalmente, da produção de cimento é uma das grandes preocupações associadas ao betão, uma vez que a produção de cimento é responsável por grandes emissões de CO₂ – constitui a principal preocupação associada à sua utilização. Desta forma, a substituição parcial de cimento por adições, na composição do betão, contribui para o aumento da sustentabilidade na construção. Neste contexto, neste trabalho pretendeu-se avaliar a viabilidade de reutilizar o catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico (FCC), produzido na refinaria da Petrogal, em Sines, como adição do tipo II na produção de betões.

A campanha experimental incluiu a produção de betões com quatro traços diferentes correspondentes à substituição parcial de cimento por 0, 10, 20 e 30% (em massa) de catalisador exausto de FCC. A composição dos constituintes destes betões, de forma a corresponderem aos requisitos exigidos pela norma NP EN 206 - 1, foram determinados pelo método de Faury. As propriedades dos betões no estado fresco avaliadas foram: a consistência pelo método do abaixamento, a massa volúmica e o teor de ar. No estado endurecido avaliou-se a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, a resistência à compressão, o índice de esclerómetro, a absorção de água por capilaridade e por imersão, e as variações dimensionais.

Com o presente estudo verificou-se que a incorporação, como adição, de catalisador exausto de FCC no betão conduz: (i) à diminuição da fluidez do betão; (ii) ao incremento da resistência à compressão; (iii) à diminuição da absorção de água por capilaridade até 20% de substituição de cimento, enquanto para 30% de incorporação aumenta significativamente; (iv) ao aumento da absorção de água por imersão; (v) à diminuição da retração quando a análise das variações dimensionais é realizada na ausência de tensões aplicadas e variações de temperatura; e, (vi) ao aumento de expansão do betão quando a análise das variações dimensionais é realizada aplicando uma tensão (provocada pela água da cura, dos provetes imersos em água).

Os betões produzidos com adição de resíduo de FCC enquadram-se normativamente segundo o preconizado pela norma NP EN 206 - 1, tanto para as propriedades no estado fresco e como no estado endurecido. Por fim verificou-se que o catalisador exausto de FCC está de acordo com os requisitos exigidos pela norma NP 4220 (“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”), a norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”), e pela norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”).

Pelos motivos expostos, este trabalho demonstra a viabilidade da utilização do catalisador gerado na unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC) como adição do tipo II, na produção de betões.

Palavras-chave: Betão; Adição do Tipo II; Reutilização de resíduos industriais; Catalisador exausto de FCC.

ABSTRACT

The concrete is a material that can be used on the execution of a vast number of civil engineer works including simple concrete structures, armed concrete and prestressed concrete. However, the environmental impact - mainly generated by the cement production which is responsible for high level of CO₂ emissions - is a major concern associated to the use of concrete. Thus, the partial replacement of cement with additions in the concrete composition may contribute for the sustainability of construction works. In this context, this thesis intended to evaluate the viability of reusing the exhausted catalyst generated by the fluid catalytic cracking (FCC) unit, in the Petrogal refinery at Sines, as addition of type II in the concrete production.

The experimental program included the production of concretes in which cement was with partially replaced with 0, 10, 20 and 30% (in mass) of waste FCC. The concretes composition in order to comply with NP EN 206 - 1 standard were determined by the Faury's method. Concretes were tested in their fresh and hardened state. The observed properties of the concretes in the fresh state were: workability bulk density and air content. The observed properties of concretes in the hardened state were the propagation velocity of ultrasonic waves, compressive strength, rebound number, water absorption by capillarity and immersion, and also the dimensional analysis test.

Results showed that the effects of using waste FCC catalyst are: (i) reduction of workability; (ii) increase of compressive strength; (iii) reduction of water absorption by capillarity up to 20% of cement replacement with the waste catalyst whereas for 30% replacement it increases considerably; (iv) increase of water absorption by immersion; (iv) reduction in the shrinkage, when the dimensional analysis is performed in the absence of applied tensions and temperature variations; and (v) increase of expansion, when the dimensional analysis is performed applying a tension (associated to the curing water when the samples are immersed in water).

The concretes produced using waste FCC in their constitution comply with the specifications laid down in the NP EN 206-1 standard. Moreover, it was also observed that the waste FCC catalyst also complies with the requirements laid down in the NP 4220 standard ("pozzolan for concrete, mortars and grouts"), the NP EN 450 - 1 standard ("fly ashes for concrete") and in the NP EN 13263 - 1 standard ("Silica fume for concrete").

Therefore, this work showed the viability of using the waste catalyst generated in the fluid catalytic cracking (FCC) unit as addition of type II, in the concrete production.

Keywords: Concrete; Type II addition; Reuse of industrial wastes; waste FCC catalyst.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação constitui mais uma importante fase da minha vida e o finalizar de cinco anos de estudo. Como tal, reconheço que sem o apoio de todas as pessoas que me acompanharam ao longo desta etapa, o desenvolvimento e a realização desta dissertação não seria possível.

Em primeiro lugar, agradeço à Doutora Carla Maria Costa, orientadora desta dissertação, pela oportunidade e confiança concedida para a realização da mesma. Expresso o meu agradecimento por toda a ajuda ao longo da realização desta dissertação, nomeadamente, o apoio e a confiança transmitida durante o período da sua realização, como também a motivação, entusiasmo, espírito crítico e rigor demonstrados na correção desta dissertação que contribuíram para o enriquecimento literário, e no auxílio na análise dos resultados.

À Raquel e ao António, técnicos do laboratório de materiais de construção do ISEL, pela disponibilidade, auxílio e apoio demonstrados durante toda a campanha experimental bem como ao acolhimento afável no seu ambiente de trabalho. Principalmente, agradeço ao António pelo auxílio constante na realização dos betões, pois caso contrário seria uma tarefa complicada pelo esforço necessário com os equipamentos. À Inês, pelo apoio e integração no laboratório de materiais de construção, e pela disponibilidade demonstrada, e à Cátia pela troca de informações e apoio no decorrer dos ensaios.

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

Pela cedência do cimento, expresso o meu agradecimento à CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A.

Agradeço ao meu irmão, Joel, por estar sempre presente, pela amizade, apoio, motivação e por acreditar que eu seria capaz de acabar mais uma etapa da minha vida.

Aos meus amigos que me acompanharam durante este percurso académico e que me deram força em todos os momentos. Um agradecimento especial à Tânia e ao Leandro pela amizade demonstrada e motivação. À Cátia e à Yesmary por toda a ajuda na realização desta dissertação, amizade e pelo apoio em todos os momentos e por nunca me deixarem desistir.

Por fim, agradeço aos meus pais e aos meus tios, pois sem eles nada disto seria possível!

A todos um obrigado!

ÍNDICE DO TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA	1
1.2	OBJETIVOS DO TFM.....	2
1.3	METODOLOGIA.....	2
1.4	ESTRUTURA DO TFM.....	3
2	SÍNTESE DE CONHECIMENTOS.....	5
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
2.2	O BETÃO E O AMBIENTE.....	6
2.3	O BETÃO.....	7
2.3.1	Cimento	7
2.3.2	Agregados	8
2.3.3	Adjuvantes.....	9
2.3.4	Adições.....	9
2.4	CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA (FCC)	12
2.5	ADIÇÕES DO TIPO II SEGUNDO AS NORMAS EM VIGOR	15
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	19
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	21
3.2.1	Cimento	21
3.2.2	Catalisador exausto de FCC	21
3.2.3	Agregado.....	23
3.2.4	Água	34
3.2.5	Superplastificante	34
3.3	FORMULAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS BETÕES.....	34
3.4	MISTURA DOS BETÕES.....	37
3.5	ENSAIOS NOS BETÕES NO ESTADO FRESCO.....	38
3.5.1	Ensaio de abaixamento – cone de Abrams.....	38
3.5.2	Massa Volúmica	40
3.5.3	Teor em ar – Método pressiométrico	41
3.6	PREPARAÇÃO DOS MOLDES, DESMOLDAGEM E CURA	43

3.7	ENSAIOS NO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	45
3.7.1	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.....	45
3.7.2	Resistência à compressão	47
3.7.3	Índice de esclerómetro	49
3.7.4	Absorção de água por capilaridade.....	51
3.7.5	Absorção de água por imersão	54
3.7.6	Variações dimensionais.....	56
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	61
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	61
4.2	ENSAIOS AOS AGREGADOS.....	62
4.2.1	Análise granulométrica	62
4.2.2	Massa volúmica e absorção de água.....	64
4.2.3	Baridade e volume de vazios	65
4.2.4	Índice de forma.....	65
4.3	ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO	66
4.3.1	Ensaio de abaixamento – Cone de <i>Abrams</i>	66
4.3.2	Massa Volúmica	67
4.3.3	Teor de ar – Método pressiométrico	69
4.4	ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	70
4.4.1	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.....	71
4.4.2	Resistência à compressão	73
4.4.3	Índice de esclerómetro	78
4.4.4	Absorção de água por capilaridade.....	83
4.4.5	Absorção de água por imersão	88
4.4.6	Variações dimensionais.....	90
4.5	AValiação DO CATALISADOR EXAUSTO DE FCC DE ACORDO COM AS NORMAS EM VIGOR.....	95
4.5.1	Verificação dos requisitos especificados na norma NP EN 206-1	95
4.5.2	Verificação dos requisitos especificados na norma NP 4220, na norma NP EN 450 – 1 e na norma NP EN 13263 - 1	96
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	99

5.1	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
	ANEXOS	i
	ANEXO A – PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	iii
	ANEXO B – TABELA DA ESPECIFICAÇÃO DO LNEC	xi
	ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS	xvii
	ANEXO D – METODOLOGIA UTILIZADA PARA O CÁLCULO DOS BETÕES	xxv
	ANEXO E – ESTUDOS REALIZADOS AOS AGREGADOS.....	xxxix
	ANEXO F – ESTUDOS REALIZADOS AOS BETÕES.....	xlv
	ANEXO G – DADOS DO OSCILOSCÓPIO E COEFICIENTES DE CAPILARIDADE.....	lxvii

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Constituintes do betão segundo a norma NP EN 206 - 1, e as normas a que deve corresponder [19].	15
Quadro 3.1 – Designação dos 4 traços de betões preparados.	19
Quadro 3.2 – Ensaio realizado na caracterização dos agregados, na avaliação das propriedades do betão no estado fresco e endurecido, as normas utilizadas para a sua realização bem como, os subcapítulos desta dissertação em que os ensaios são descritos.....	20
Quadro 3.3 – Composição química e propriedades físicas do catalisador exausto FCC e do cimento Portland 42,5R [39, 58].....	22
Quadro 3.4 – Propriedades físicas do catalisador exausto de FCC [39, 58].	23
Quadro 3.5 – Designação dos agregados, dimensão máxima da partícula e subcapítulo com a quantidade em massa na composição do betão.....	24
Quadro 3.6 – Utensílios utilizados na determinação da análise granulométrica dos agregados finos e grossos.	25
Quadro 3.7 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água nos agregados grossos pelo método do cesto de rede metálica.	28
Quadro 3.8 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água nos agregados finos pelo método do picnómetro	30
Quadro 3.9 – Utensílios utilizados na determinação da baridade e volume de vazios nos agregados grossos e finos	31
Quadro 3.10 – Utensílios utilizados na determinação do índice de forma nos agregados grossos.	33
Quadro 3.11 – Pressupostos que se assumiram para a formulação dos 4 traços de betões preparados.	36
Quadro 3.12 – Identificação dos agregados na composição dos 4 traços de betões preparados.	36
Quadro 3.13 – Composição dos 4 traços de betões preparados (obtidas tendo em conta os pressupostos considerados no Quadro 3.11 e pelo método de Faury em kg/m^3).....	37
Quadro 3.14 – Utensílios utilizados na determinação da consistência pelo cone de <i>Abrams</i> , no estado fresco.	39
Quadro 3.15 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica, no estado fresco....	40
Quadro 3.16 – Utensílios utilizados na determinação do teor de ar, no estado fresco.	42
Quadro 3.17 – Provetes utilizados em cada ensaio, número de provetes por ensaio, número de provetes por mistura do betão e tipo de moldes utilizados.....	44
Quadro 3.18 – Utensílios utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas em provetes cúbicos, no estado endurecido.	46

Quadro 3.19 – Utensílios utilizados na determinação da resistência à compressão em provetes cúbicos, no estado endurecido.....	48
Quadro 3.20 – Utensílios utilizados na determinação do índice de esclerómetro em provetes cúbicos, no estado endurecido.....	50
Quadro 3.21 – Utensílios utilizados na determinação absorção de água por capilaridade em provetes cúbicos, no estado endurecido.....	52
Quadro 3.22 – Utensílios utilizados na determinação da absorção de água por imersão em provetes cúbicos, no estado endurecido.....	55
Quadro 3.23 – Utensílios utilizados na determinação das variações dimensionais em provetes prismáticos, no estado endurecido.....	57
Quadro 4.1 – Análise granulométrica dos agregados finos e grossos, peneiros utilizados de acordo com a NP EN 933 - 2, percentagem do material retido no fundo (P), e o módulo de finura (MF).....	63
Quadro 4.2 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos e grossos obtidos de acordo com a norma NP EN 1097-6.....	64
Quadro 4.3 – Baridade (ρ_b) e percentagem de volume de vazios (%v) dos agregados finos e grossos obtidos de acordo com a norma NP EN 1097 - 3.....	65
Quadro 4.4 – Índice de Forma (SI) em percentagem do agregado grosso de acordo com a norma NP EN 933 – 4.....	65
Quadro 4.5 – Abaixamento pelo cone de <i>Abrams</i> , respetiva relação água/ ligante (A/L) e classe de abaixamento obtida de acordo com a norma NP EN 206 - 1: 2007 dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.....	66
Quadro 4.6 – Massa volúmica dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.....	68
Quadro 4.7 – Velocidade média, v , (m/s) de propagação de ondas ultrassónicas (média \pm desvio padrão), avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.....	71
Quadro 4.8 – Resistência à compressão, R_c , (MPa) (média \pm desvio padrão) avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.....	73
Quadro 4.9 – Índice de atividade (IA%) das misturas com diferentes teores de adição de catalisador exausto de FCC, com base na resistência à compressão, dos 4 traços de betões em estudo.....	77
Quadro 4.10 – Índice esclerométrico (IE) e resistência à compressão (R_{cIE} - MPa) estimada pelo índice esclerométrico avaliado em provetes cúbicos, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.....	79
Quadro 4.11 – Comparação dos valor de resistência à compressão obtidos pelo método destrutivo, subcapítulo 4.4.2, e estimados pelo índice esclerométricos e a sua variação.....	81

Quadro 4.12 – Absorção capilar aos 28 dias: absorção capilar média às 72 horas (Kg/m^2), coeficientes de capilaridade (K_c) e altura de ascensão de águas às 72 horas, avaliado em provetes cilíndricos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.	85
Quadro 4.13 – Absorção de água por imersão, avaliado em provetes cúbicos aos 28 dias dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.	88
Quadro 4.14 – Requisitos químicos e critérios de aceitação exigidos pela norma NP 4220(“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”), norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”), e norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) e os dados do catalisador exausto de FCC.....	97
Quadro 4.15 – Requisitos físicos e critérios de aceitação exigidos pela norma NP 4220(“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”), norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”), e norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) e os dados do catalisador exausto de FCC.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vantagens da utilização de adições no betão como substituto parcial do cimento.	12
Figura 3.1 – Cimento utilizado na campanha experimental. Cimento CEM I 42,5 R (a); Abertura do saco de cimento (b).....	21
Figura 3.2 – Catalisador exausto de FCC. a) Fotografia do catalisador exausto da unidade de <i>cracking</i> catalítico em leito fluidificado (FCC), como fornecido; b) Imagem de microscopia eletrónica de varrimento, obtida em modo de eletrões secundários (JEOL JSM 7001F), das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines [38, 39, 58].....	22
Figura 3.3 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC [38, 39, 58].....	23
Figura 3.4 – Agregados utilizados na campanha experimental. a) Areia 0/2; b) Areia 0/4; c) Brita 1; d) Brita 2.	24
Figura 3.5 – Coluna de peneiros de acordo com a norma NP EN 933 -2.	26
Figura 3.6 – Superplastificante (Sikaplast 898) utilizado na campanha experimental	34
Figura 3.7 – Misturadora de eixo vertical (marca PROETI).	37
Figura 3.8 – Ensaio no estado fresco, ensaio de abaixamento pelo cone de <i>abrams</i> . a) Material utilizado; b) Colocação da amassadura no cone; c) Compactação com o auxílio do varão; d) Levantamento do cone; e) Registo do abaixamento.....	40
Figura 3.9 – Ensaio no estado fresco, massa volúmica. a) Enchimento do recipiente; b) Retirar o excesso com a pá de pedreiro; c) Pesagem.....	41
Figura 3.10 – Ensaio no estado fresco, teor de ar. a) Limpeza dos excessos de betão; b) Posicionamento do aerómetro e fechar as cavilhas; c) Abertura das válvulas; d) Aumento da pressão dentro do recipiente; e) Registo do valor do teor de ar.....	43
Figura 3.11 – Fases de preparação para o fabrico dos betões e armazenamento. a) Pesagem de todos os constituintes; b) Homogeneização do betão na misturadora; c) Preparação dos moldes com óleo descofrante; d) Colocação do betão nos moldes; e) Vibração do betão em camadas; f) Alisamento da superfície; g-1) Compressor; g-2) Com o auxílio do compressor desmolda-se os provetes; h) Colocação dos provetes na câmara de cura.....	44
Figura 3.12 - Ensaio no estado endurecido, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. a) Instalação dos equipamentos; b) Aplicação de vaselina nos transdutores; c) Calibração do aparelho; d) Preparação do provete com vaselina; e) Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.....	47
Figura 3.13 – Ensaio da resistência à compressão no estado endurecido. a) Medição das dimensões do provete com o auxílio de um paquímetro; b) Colocação do provete na prensa; c) Rotura do provete.....	48

Figura 3.14 – Ensaio no estado endurecido, índice de esclerómetro. a) Traçado no provete dos pontos de embate; b) Calibração do esclerómetro como auxílio da bigorna de aço; c) Colocação do provete na prensa; d) Colocação do esclerómetro na horizontal; e) aplicação da força.....	51
Figura 3.15 – Preparação dos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Provetes dentro do tanque de água; b) Colocação dos provetes na estufa; c) Preparação da bacia de plástico; d) Colocação do suporte dentro da bacia; e) Introdução de água dentro da bacia; f) Verificação da altura de água.....	53
Figura 3.16 – Ensaio no estado endurecido, absorção de água por capilaridade. a) Provetes dentro da bacia de plástico; b) Pesagem dos provetes; c) Medição da ascensão de água pelas geratrizes.....	53
Figura 3.17 – Ensaio no estado endurecido, absorção de água por imersão. a) Provetes retirados do tanque de água; b) Pesagem dos provetes; c) Pesagem hidrostática; d) Colocação dos provetes em estufa.....	55
Figura 3.18 – Ensaio no estado endurecido, nomeadamente na ausência de tensões aplicadas e de variações de temperatura, e quando aplicado uma tensão (provocada pela água da cura dos provetes). a) Equipamento utilizado; b) Colocação das pastilhas metálicas; c) Calibração do equipamento; d) Posicionamento do equipamento sobre as pastilhas no provete de retração; e) Posicionamento do equipamento sobre as pastilhas no provete de expansão.....	59
Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados. (a) – Curva granulométrica da areia 0/2; (b) – Curva granulométrica da areia 0/4; (c) – Curva granulométrica da brita 1; (d) – Curva granulométrica da brita 2.....	63
Figura 4.2 – Abaixamento pelo cone de <i>Abrams</i> , dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a consistência pelo método de abaixamento em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).....	67
Figura 4.3 – Massa volúmica (kg/m^3) e respetiva linha de regressão linear, dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).....	68
Figura 4.4 – Relação entre a massa volúmica (kg/m^3) e a consistência por abaixamento (mm) (Cone de <i>Abrams</i>), dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.....	69
Figura 4.5 – Teor de ar (%) dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.....	69
Figura 4.6 – Relação entre o teor de ar (%) e massa volúmica (kg/m^3) dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.....	70
Figura 4.7 – Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultrassónicas avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem aos ajustes logarítmicos que se verificaram entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas em função do tempo de hidratação).....	72

Figura 4.8 – Resistência à compressão média (MPa) avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.	74
Figura 4.9 – Resistência à compressão média (MPa), avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).	75
Figura 4.10 – Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e a resistência à compressão até aos 28 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e a resistência à compressão).	76
Figura 4.11 – Relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo equipamento utilizado na determinação do índice de esclerómetro, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou na relação o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro ao longo do período de ensaio para os 4 traços de betão).	79
Figura 4.12 – Relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo método destrutivo do subcapítulo 4.4.2, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linha representadas, e as respetivas expressões da equação, correspondem à correlação potencial que se verificou na relação o índice esclerométrico e a resistência à compressão pelo método destrutivo ao longo do período de ensaio).	80
Figura 4.13 – Relação entre a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro e a resistência à compressão obtida pelo método destrutivo, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro e a resistência à compressão obtida pelo método destrutivo ao longo do período de ensaio).	82
Figura 4.14 – Curva de absorção de água média por capilaridade determinada em provetes cilíndricos, ao longo do período de ensaio, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou entre a absorção capilar ao longo da raiz quadrada do tempo durante o ensaio).	84
Figura 4.15 – Coeficientes de capilaridade ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.	85
Figura 4.16 – Relação entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) e a resistência à compressão média (MPa) dos 4 traços de betões em estudo, aos 28 dias de hidratação.	86

Figura 4.17 – Ascensão de água (mm) determinada em provetes cilíndricos, ao longo do período de ensaio, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou na relação entre a ascensão de água por capilaridade ao longo do período de ensaio).	87
Figura 4.18 – Absorção média de água por imersão (%) aos 28 dias de hidratação, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (A linha representada e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a ascensão de água por imersão em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).	89
Figura 4.19 – Relação entre a absorção de água por imersão (%) e a resistência à compressão média (MPa) dos 4 traços de betões em estudo, aos 28 dias de hidratação.	90
Figura 4.20 – Variação dimensional, ao longo de 90 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido na avaliação da retração. (As expressões das equações representadas, correspondem à correlação linear que se verificou na extensão obtida ao longo do período de ensaio).	91
Figura 4.21 – Variação dimensional de retração média aos 90 dias de ensaio para diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição dos betões. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação logarítmica que se verificou na relação entre a retração e a percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC ao longo do período de ensaio).	92
Figura 4.22 – Relação entre a variação dimensional na avaliação da retração ($m/m \cdot 10^{-6}$) aos 90 dias de ensaio e a absorção de água por imersão (%) dos 4 traços de betões em estudo.	92
Figura 4.23 – Variação dimensional, ao longo de 90 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido, na avaliação da expansão.	93
Figura 4.24 – Variação dimensional média aos 90 dias de ensaio para diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição dos betões, na avaliação da expansão.	94
Figura 4.25 – Relação entre a extensão provocada pela expansão ($m/m \cdot 10^{-6}$) aos 90 dias de ensaio e a absorção de água por imersão (%) dos 4 traços de betões em estudo.	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SIGLAS

Apeb	Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
A/L	Razão água/ligante
C	Cimento
CEM	Cimentos correntes
CI	Classe de teor de cloretos
E	Especificação
EN	Norma Europeia
f	Designação inicial da categoria do teor de finos
FCC	Catalisador da unidade de “cracking” catalítico em leito fluidizado (FCC é a abreviatura adotada genericamente a partir da designação da unidade em inglês “Fluid Catalytic Cracking”)
G _C	Designação inicial da categoria para a granulometria
GEE	Gases com efeito de estufa
GPL	Gás de petróleo liquefeito
IA	Índice de atividade pozolânica
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
k	Fator que tem em conta uma atividade de uma adição do tipo II
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
N	Número de provetes ensaiados
ND	Tipo do Esclerómetro de Schmidt
NP	Norma Portuguesa
SP	Superplastificante
S3	Classe de consistência por abaixamento
TFM	Trabalho Final de Mestrado
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
XC4	Classe de exposição ambiental ciclicamente húmido e seco

ABREVIATURAS

A	Área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm^2), utilizando as medições efetuadas com o auxílio do paquímetro
A_{ci}	Absorção de água por ascensão capilar no instante i (g/mm^2)
$A_{iC+jFCC}$	Absorção de água por imersão do betão com i de incorporação de cimento e j de incorporação de catalisador exausto de FCC
A_p	Área da superfície do provete em contacto com a água ($17\,671\text{mm}^2$)
A_{Rc}	Valor médio da resistência à compressão do betão para uma determinada substituição e idade de cura
A_{100C}	Absorção de água por imersão do betão de referência
B_{Rc}	Valor médio da resistência à compressão do betão de referência para a mesma idade de cura de A_{Rc}
d	Distância entre os transdutores (emissor e recetor) (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)
$D_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima do agregado
D	Massa volúmica do betão no estado fresco (kg/m^3)
D^*	Massa volúmica para o betão no estado fresco arredondada à décima mais próxima
F	Força de rotura à compressão (N)
f_{ck}	Resistência característica à compressão do betão (N/mm^2)
f_{cm}	Resistência média à compressão do betão (N/mm^2)
IE	Índice esclerométrico
K_c	Coeficiente de absorção capilar ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$)
K_{C6h}	Coeficiente de absorção capilar às 6 horas de ensaio ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$)
K_{C72h}	Coeficiente de absorção capilar às 72 horas de ensaio ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$)
$M_{i\text{abs}cap.}$	Massa do provete após i horas em contacto com a lâmina de água (g)
$M_{0\text{abs}cap}$	Massa inicial do provete de ensaio seco em estufa (g)
$M_{1\text{abs}im}$	Massa do provete saturado no ar (g)
$M_{1\text{agr.análise}gr.}$	Massa total da amostra seca em estufa (g)
$M_{1\text{agr.bar}}$	Massa do recipiente de ensaio (kg)

$M_{1agr.iforma}$	Massa das partículas retidas em cada peneiro (g)
$M_{1agr.mvol.cm}$	Massa do agregado saturado com superfície seca (g)
M_{1mvol}	Massa do recipiente (kg)
M_{2absim}	Massa hidrostática do provete após saturação (g)
$M_{2agr.análisegra.}$	Massa da amostra após lavagem e secagem (g)
$M_{2agr.bar}$	Massa do recipiente de ensaio cheio com agregado (kg)
$M_{2iagr.iforma}$	Massa das partículas não cúbicas em cada peneiro (g)
$M_{2agr.mvol.cm.}$	Massa aparente do cesto contendo a amostra saturada, imerso em água (g)
M_{2mvol}	Massa do recipiente cheio com o betão fresco (kg)
M_{3absim}	Massa do provete seco (g)
$M_{3agr.mvol.cm.}$	Massa aparente do cesto vazio imerso em água (g)
$M_{4agr.mvol.cm.}$	Massa da amostra seca em estufa (g)
P	Massa do material retido no peneiro de fundo (g)
R^2	Coefficiente de determinação (quadrado do coeficiente de correlação)
R_c	Resistência à compressão (Mpa ou N/mm ²)
R_{cIE}	Resistência à compressão estimada pelo índice esclerométrico (MPa)
R_i	Massa de material retido no peneiro i (g)
SI	Índice de forma (%)
t	Tempo decorrido no percurso da onda (s)
v	Velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s)
V	Volume do recipiente de ensaio (m ³)
V_{mvol}	Volume do recipiente (m ³)
%A	Percentagem da absorção de água por imersão (%)
%f	Percentagem de finos que atravessou o peneiro de 0,063 mm (%)
%R _i	Percentagem de material retido acumulado no peneiro i (%)
%v	Percentagem de vazios (%)
ε	Valor da extensão (m/m)
ρ _w	Massa volúmica da água à temperatura registada quando a determinação de $M_{2agr.mvol.cm}$ (g/cm ³)
ρ _a	Massa volúmica do material impermeável dos agregados (g/m ³)

ρ_{rd}	Massa volúmica dos agregados secos em estufa (g/m^3)
ρ_{ssd}	Massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (g/m^3)
ρ_b	Baridade do agregado (kg/m^3)
$\Delta\%$	Variação (%)
\emptyset	Diâmetro

NOTAÇÃO DOS COMPOSTOS QUÍMICOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
$\text{CaO}_{\text{Total}}$	Óxido de cálcio total
CH	Hidróxido de cálcio
CH_4	Metano
Cl^-	Cloretos
CO_2	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Fe_2O_3	Óxido de ferro
HFC	Hidrofluorcarbonetos
K_2O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
Mn_2O	Óxido de manganês
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	Alcális
N_2O	Óxido nitroso
PFC _s	Perfluorcarbonetos
P_2O_5	Fosfato
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
Si	Silício
SiO_2	Dióxido de silício
SO_3^-	Trióxido de enxofre
SrO	Óxido de estrôncio
Ti_2O_3	Tistarite

1.1 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O crescimento gradual da população mundial, que se tem vindo a registar em maior primazia desde o início do último século, obrigou à criação e desenvolvimento de novas estratégias que visassem um crescimento sustentável e controlado, incluindo a utilização mais racional dos recursos naturais disponíveis.

A construção é uma atividade essencial ao desenvolvimento económico e social da Humanidade. Atualmente, o material de construção mais utilizado é o betão [1] prevendo-se, que em termos globais, a sua utilização continue a aumentar no futuro. A indústria do cimento – um dos constituintes do betão – tem um impacto ambiental significativo uma vez que, consome quantidades significativas de matérias-primas não renováveis - como a argila e calcário e energia, bem como é uma fonte importante de emissão de CO₂ antropogénico para a atmosfera [2].

Com o objetivo de contribuir para a redução dos problemas enunciados acima, a comunidade científica identificou a importância de incorporar adições no betão, como substitutos parciais do cimento. A utilização de adições na produção de betões, em particular de adições do Tipo II, concorre para a melhoria do seu desempenho e durabilidade [3]. Concomitantemente, quando as adições incorporadas nos betões são resíduos de outras indústrias, o produto final também contribui para o aumento da sustentabilidade dos materiais de construção.

Neste contexto, pretende-se avaliar a viabilidade de utilização de um resíduo da indústria petrolífera - nomeadamente, o resíduo catalítico gerado na unidade de "cracking" catalítico em leito fluidizado (FCC, do inglês "Fluid Catalytic Cracking") da refinaria da Petrogal, em Sines - na produção de betões. Este sendo um aluminossilicato tem propriedades pozolânicas e portanto, tem potencial de utilização como adição do tipo II no betão [4 - 8].

Este estudo será realizado no âmbito de um projeto de I&D "ECO-Zement: Reutilização do resíduo de "cracking" catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia" (Ref.^a PTDC/ECM/113115/2009), atualmente em curso no ISEL. Resultados anteriores obtidos em argamassas e betão auto-compactável confirmaram que este resíduo catalítico de FCC apresenta atividade pozolânica significativa [9 - 13].

1.2 OBJETIVOS DO TFM

A presente dissertação visa a avaliação da viabilidade de utilização, na produção de betões, como adição de Tipo II, de um resíduo de FCC produzido na refinaria da Petrogal – Petróleos de Portugal, S.A, em Sines.

Neste sentido pretendeu-se analisar os efeitos desta adição nas propriedades e desempenho de betão bem como, o enquadramento normativo dos betões produzidos. Também se pretendeu, comparar as propriedades dos betões com diferentes percentagens de adição com as propriedades do betão corrente. Os principais objetivos do trabalho incidem:

- i. Definição da composição de betões com incorporação de resíduo da indústria petrolífera;
- ii. Avaliação do efeito da incorporação do resíduo nas propriedades do betão no estado fresco e no estado endurecido;
- iii. Avaliação da potencial utilização do catalisador exausto de FCC em relação às especificações requeridas pelas normas em vigor.

1.3 METODOLOGIA

Numa fase inicial, prévia ao trabalho experimental, procedeu-se à recolha de informação (fontes nacionais e internacionais) de modo a obter-se um esclarecimento sobre o tema em questão, nomeadamente o betão e o resíduo em estudo. Com a recolha da informação redigiu-se um documento que serviu de proposta de plano de trabalho final de mestrado e de base à elaboração do segundo capítulo desta dissertação.

De seguida, realizou-se um cronograma detalhado de trabalhos experimentais de forma a calendarizar as atividades a realizar no laboratório, de modo a garantir o tempo previsto para a realização da dissertação em concordância com as normas em vigor (Anexo A.1).

Após o aprovisionamento de todo o material, necessário ao trabalho experimental, deu-se início à realização das atividades. Numa etapa inicial procedeu-se à caracterização dos agregados de modo a verificar a sua influência nos betões a realizar. De seguida, elaborou-se as folhas de cálculo de apoio à atividade laboratorial nomeadamente ao cálculo das quantidades dos materiais constituintes nas diferentes amassaduras dos betões (Anexo D.1). Posteriormente, procedeu-se à preparação dos betões com diferentes teores de adição de catalisador exausto de FCC e à preparação do betão corrente sem incorporação de catalisador exausto de FCC (betão de referência), considerando os requisitos exigidos pela norma NP EN 206 - 1.

Os betões produzidos, foram analisados no estado fresco e ensaios no estado endurecido, e de acordo com a norma NP EN 206 - 1. Por fim, efetuou-se o tratamento, análise e discussão dos resultados experimentais, bem como a avaliação do catalisador exausto de FCC de acordo com as normas em vigor.

Este trabalho culminou com a redação da presente dissertação, tendo sido compilada e organizada em texto toda a informação, resultados, análises, e conclusões.

1.4 ESTRUTURA DO TFM

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos resumindo-se, em seguida, os principais assuntos abordados em cada um deles.

No primeiro e presente capítulo efetua-se o enquadramento do tema desta dissertação, descreve-se os objetivos delineados e a metodologia adotada e expõe-se a distribuição das várias partes do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se o resumo da síntese de conhecimentos no âmbito dos betões e das propriedades dos mesmos com adição do resíduo da indústria petrolífera. Neste expõem-se a problemática e a importância desta investigação, nomeadamente os impactos ambientais associados à produção do betão. De seguida evidencia-se a origem do resíduo em estudo bem como as conclusões dos trabalhos já realizados no âmbito desta dissertação. Por fim realiza-se um enquadramento das adições do tipo II com as normas em vigor, principalmente a norma NP EN 206 - 1.

No terceiro capítulo apresenta-se a campanha experimental desenvolvida para dar cumprimento aos objetivos estabelecidos. Neste definem-se os materiais utilizados na composição dos betões, a sua preparação, e descrevem-se os fundamentos teóricos, utensílios e procedimentos adotados, associados a cada ensaio.

No quarto capítulo expõem-se a apresentação, análise e discussão de resultados obtidos ao longo da campanha experimental. Neste caracterizam-se os betões, ao nível das suas propriedades mecânicas e físicas, sustentadas por quadros e elementos gráficos. Sempre que possível, foram ainda estabelecidas correspondências entre os vários ensaios realizados para uma melhor compreensão dos betões em estudo. Por fim avaliam-se os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC segundo a norma NP EN 206 -1 e o catalisador exausto de FCC de acordo com as normas em vigor.

No quinto capítulo e último capítulo apresenta-se as conclusões adquiridas após a análise aos resultados alcançados ao longo da campanha experimental, definindo-se ainda várias propostas de desenvolvimentos futuros neste âmbito.

Ainda no fim do trabalho apresentam-se as referências bibliográficas e alguns anexos com informação complementar.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O betão é considerado um material-chave para satisfazer as necessidades atuais do património edificado, nomeadamente no que se refere à construção de habitações e infraestruturas (túneis, pontes e viadutos), sendo produzido anualmente aproximadamente de 1 m³ de betão por pessoa [1]. O cimento é um dos materiais de construção mais importantes no mundo, e é usado principalmente para a produção de betão, no entanto a utilização em abundância do cimento surge como consequência: o impacto ambiental, nomeadamente na emissão de CO₂ para a atmosfera e na utilização dos recursos não renováveis (calcário e argila) em abundância. Desta forma a conservação dos recursos energéticos, bem como a redução das emissões de CO₂ e a diminuição da utilização dos recursos não renováveis, é uma das prioridades para o desenvolvimento sustentável.

Neste sentido, é importante a identificação e otimização de materiais, que possam ser usados na composição do betão como adições, substituindo parcialmente o cimento, e sem que as características mecânicas do betão sejam perdidas. Um dos materiais promissores para este fim é o catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (na presente dissertação como catalisador exausto de FCC) presente em algumas refinadoras de petróleo (Subcapítulo 2.4) [4 - 8].

O presente capítulo tem como finalidade enquadrar o objetivo do estudo efetuado nesta dissertação – contribuir para a avaliação da viabilidade de utilização, como adição de tipo II, do resíduo de FCC da refinaria de Sines, da Petrogal (Subcapítulo 1.2) - com vista à otimização da utilização de novas adições como substitutos parciais do cimento, com menores impactos ambientais, a incorporar na mistura de betão. Inicialmente, apresenta-se uma síntese dos problemas ambientais referentes à produção do betão (Subcapítulo 2.2), e de seguida apresenta-se a constituição do betão, com o intuito de compreender as propriedades no estado fresco e endurecido do betão (Subcapítulo 2.3). Adicionalmente, descreve-se algumas possíveis medidas de mitigação do impacto ambiental provocado pelo betão abordando a utilização potencial como adição do tipo II do catalisador exausto de FCC (Subcapítulo 2.4). Por fim, realiza-se um enquadramento da adição do tipo II à luz das normas em vigor (Subcapítulo 2.5).

2.2 O BETÃO E O AMBIENTE

Ao longo dos últimos anos, a preocupação com questões de carácter ambiental tem vindo a ser mais acentuada, nomeadamente o aquecimento global [14].

A comunidade científica atribui como causa maioritária do aquecimento global os gases com efeito de estufa (GEE) e consequente acumulação destes poluentes na atmosfera. A preocupação ambiental em torno dos GEE, levou a que estabelece-se em 1997 um acordo entre vários países, que se comprometeram a inverter a tendência verificada relativamente a estas emissões, cujos limites de emissões foram impostos pelo Protocolo de Quioto: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), os hidrofluorcarbonetos (HFC), os perfluorcarbonetos (PFC_s) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6) [15, 16].

Dos GEE o principal que afeta a atmosfera é o CO_2 [1], sendo que o sector da construção é responsável por cerca de 30% deste gás [1, 2, 16, 17]. Dentro do sector da construção a produção de betão é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões de CO_2 , equivalente à quantidade emitida pelo cimento [18]. Embora o cimento corresponda apenas a 10-15% do betão, em termos de massa, é de facto o constituinte imprescindível como ligante e determinante nas propriedades do betão no estado fresco e endurecido. No entanto é o constituinte do betão que causa maior carga ambiental [1]. Neste sentido, a indústria do cimento também é responsável pelo consumo expressivo de recursos naturais não renováveis como o calcário, as argilas, a energia combustível e elétrica [17]. De seguida, sistematizam-se os principais impactos ambientais da indústria de cimento:

- i. Consumo de recursos naturais não-renováveis – Estima-se que por cada tonelada de cimento produzida está associada a utilização de cerca de duas toneladas de recursos naturais, nomeadamente, calcário e argila [17, 19];
- ii. Consumo de energia combustível e elétrica – A produção de cimento está associado à combustão de quantidades significativas de combustíveis fósseis não-renováveis, como: o carvão coque de petróleo e gás natural [17, 20];
- iii. Emissão de GEE, nomeadamente CO_2 – Estima-se que, durante a produção do cimento, é emitida cerca de uma tonelada de CO_2 , o que se traduz em 5 a 7% do CO_2 global emitido [2, 16, 17, 21, 22].

Face ao exposto, o sector da construção é um dos principais sectores visados a enquadrar a sua atividade no âmbito do acordo do Protocolo de Quioto. A substituição parcial de cimento na produção de betões por adições reduz a necessidade de produção de cimento, e consequente diminuição da necessidade de recorrer a recursos naturais não renováveis e diminuição das emissões de CO_2 , contribuindo-se assim uma política ambiental mais responsável de acordo com o Protocolo. Neste contexto, este trabalho pretende contribuir para a avaliação da possibilidade de incorporação de uma adição no betão, nomeadamente um resíduo de uma indústria petrolífera (subcapítulo 2.4), substituindo o cimento e mitigando o impacto ambiental.

De referir, que associado também ao betão surge outro problema relativamente ao ambiente, nomeadamente a utilização de grandes quantidades de agregados, cerca de 70 a 80% de volume do betão. Tornando relevante a preocupação com a extração de agregados naturais, indo ao encontro da utilização de agregados artificiais ou reciclados. Uma vez que como referido, produzem-se grandes quantidades de betão (cerca de 1m^3 por pessoa) e sem agregado o betão não poderá ser produzido. No entanto, este tema não é objeto de estudo desta dissertação.

2.3 O BETÃO

O betão tem como função principal a estabilidade e resistência, porém assume também um papel de extrema relevância por ser um material com capacidade de permitir criar estruturas com as mais diversas formas. O betão é um material de construção constituído por cimento, água, e agregados finos e grossos. Eventualmente pode-se adicionar na amassadura do betão outros materiais, com o intuito de melhorar as suas características, como os adjuvantes e adições.

No estado fresco o betão deve ter uma consistência tal, que possa ser transportado, colocado, compactado, e acabado de forma eficaz e sem segregação. As propriedades do betão endurecido, assim como o seu comportamento ao longo do tempo, poderão depender em grande parte das propriedades e do tratamento do betão no estado fresco. Neste sentido, os constituintes do betão devem ser colocados na misturadora de forma a garantir homogeneidade e em proporções determinadas. Como tal, os métodos de determinação da composição do betão baseiam-se em procedimentos aproximados, devendo estes serem comprovados experimentalmente em laboratório e antes de serem colocadas em obra [23].

No estado endurecido, a resistência mecânica fornece uma boa informação acerca da qualidade do betão, uma vez que está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada [23, 24, 25]. O betão deve responder também no estado endurecido a parâmetros de durabilidade, entre outros [3]. Acresce ainda, que a estrutura interna do betão e, portanto, as respetivas propriedades, vão evoluindo ao longo do tempo, interagindo com o ambiente em que o betão está inserido [26].

Neste subcapítulo apresentam-se os principais aspetos dos constituintes do betão e a sua influência nas propriedades do betão.

2.3.1 Cimento

A norma NP EN 197-1 [27] define o cimento como um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com a água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações químicas entre a água e o cimento [27]. Ainda define os diferentes tipos de cimento correntes que podem ser comercializados na Europa e os seus constituintes, para além de

especificar os requisitos mecânicos, físicos e químicos a que têm de corresponder. Em termos de composição existem 27 produtos da família dos cimentos correntes agrupados em 5 tipos principais, classificados conforme a natureza e percentagem dos constituintes, nomeadamente [27]:

- CEM I – Cimento Portland;
- CEM II – Cimento Portland Composto;
- CEM III – Cimento de Alto-forno;
- CEM IV – Cimento Pozolânico;
- CEM V – Cimento Composto.

Na constituição do betão o CEM I e o CEM II são os mais utilizados correntemente [28]. A quantidade de cimento na constituição do betão tem influência na sua resistência e igualmente na sua consistência, sendo cerca de 10 a 15% da massa do betão.

2.3.2 Agregados

Os agregados a introduzir na composição do betão quanto à sua origem podem ser agregados de origem natural, artificiais (como subprodutos industriais) ou reciclados de materiais previamente usados na construção [3]. Estes ocupam em geral cerca de 70 a 80% do volume do betão.

Os agregados surgiam correntemente com a designação de inertes, uma vez que não eram considerados como constituintes do betão quimicamente inertes. No entanto à medida que os conhecimentos acerca do betão foram sendo aprofundados concluiu-se que os agregados também podem ter um papel nas reações químicas que ocorrem na pasta de cimento, contribuindo para a resistência do betão [24, 25]. Por outro lado, conferem ainda uma maior estabilidade volúmica à mistura e maior durabilidade do que a pasta de cimento hidratada [24].

As características dos agregados influenciam as propriedades do betão, de forma significativa, como tal é necessário avaliar o agregado com o intuito de evitar potenciais efeitos negativos que podem ocorrer posteriormente no betão. Por exemplo, se o betão contiver na sua composição cimento com teor de álcalis superior a 0,60%, a utilização de agregados reativos com os álcalis poderá provocar reações expansivas internas e conseqüentemente fissuração na estrutura. Assim sendo, os agregados devem corresponder aos seguintes requisitos [23, 29]:

- i. Forma adequada e dimensões proporcionadas, dentro de determinados limites;
- ii. Resistência mecânica compatível com a aplicação em causa;
- iii. Propriedades térmicas adequadas;
- iv. Propriedades químicas compatíveis com a sua utilização em betão e com o meio ambiente circundante;
- v. Isentos de substâncias prejudiciais.

Face ao exposto, os agregados devem ser avaliados em laboratório de acordo com o fim a que se destinam, realizando ensaios para a determinação das propriedades geométricas (como a determinação do tamanho das partículas dos agregados e respetiva dimensão máxima do agregado, índice de forma, índice de achatamento), das propriedades mecânicas e físicas (como a resistência à fragmentação, massa volúmica e absorção de água, baridade e volume de vazios) e das propriedades térmicas e de meteorização (como a determinação do sulfato magnésio e a retração por secagem) [30]. Na presente dissertação os agregados da campanha experimental foram alvos de ensaios descritos no subcapítulo 3.2.3 e avaliados no subcapítulo 4.2.

2.3.3 Adjuvantes

Os adjuvantes são substâncias utilizadas numa percentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionados durante a amassadura aos componentes normais dos betões, com a finalidade de modificar uma, ou mais, das propriedades dos betões [24]. Geralmente, os adjuvantes são utilizados para acelerar ou retardar o processo de endurecimento; alterar a trabalhabilidade do betão no estado fresco; diminuir a quantidade de água necessária para a amassadura; entre outras propriedades manipuláveis. Neste sentido, existe uma grande variedade de adjuvantes actualmente disponíveis no mercado, nomeadamente: introdutores de ar; aceleradores e retardadores de presa; redutores de água do tipo plastificantes ou superplastificantes; modeladores de viscosidade; inibidores de corrosão; controladores de retração; controladores da reação alcalis-silíca; controladores do desenvolvimento da resistência; melhoradores da durabilidade contra a ação gelo-degelo e contra ações químicas [24].

Os requisitos a que um adjuvante deve corresponder são definidos pela norma NP EN 934 - 1 [31]. Em complemento, a norma NP EN 934 - 2 [32] define as funções e os tipos de adjuvantes existentes para o betão.

2.3.4 Adições

A norma NP EN 206 - 1 considera a possibilidade de utilização de adições na composição de betões. De acordo com esta norma, adições são materiais inorgânicos finamente divididos que podem ser adicionados ao betão durante a amassadura com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais [3]. A quantidade de adição a incorporar no betão irá depender das propriedades pretendidas para o betão e o fim a que se destina.

Ainda segundo a norma NP EN 206 - 1 existem dois tipos de adições classificados de acordo com a reatividade química, como [3, 26]:

- Adição do tipo I – materiais quimicamente inertes;
- Adição do tipo II – materiais quimicamente reativos.

As adições do tipo I são tipicamente designadas de *filleres* em alusão à sua capacidade de preencher os poros nos materiais à base de cimento endurecidos completando a curva granulométrica dos agregados finos [3, 9, 26]. O calcário (material proveniente das rochas calcárias) é o *filler* mais vulgarmente utilizado.

As adições do tipo II, sendo quimicamente reativas, interferem nas reações de hidratação do cimento, formando quantidades adicionais de silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H) [26]. Estes tipos de adições podem-se ainda classificar das seguintes formas:

- i. Materiais ligantes hidráulicos latentes constituídos por silicatos e aluminatos de cálcio que hidratam por reação com a água, mas cuja reação só se torna significativa na presença de um ativador alcalino adequado. Esta reação conduz à formação adicional de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Como exemplo destes materiais, as escórias de alto-forno, que são um subproduto do fabrico de gusa que se recolhe no estado líquido, a uma temperatura elevada, na parte inferior do forno da transformação de ferro. [3, 28];
- ii. Materiais pozolânicos ou pozolanas constituídos por silicatos ou aluminossilicatos que reagem com a água na presença de hidróxido de cálcio (C-H) – um dos compostos resultantes da hidratação do cimento. Esta reação forma quantidades adicionais de silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, e de aluminatos de cálcio hidratados, C-A-H, que contribuem para o desenvolvimento da resistência, o aumentando a compacidade da mistura e em muitos casos reduzindo a porosidade total do betão. Tipicamente quanto maior a superfície específica das partículas da pozolana mais extensa é a reação pozolânica [13, 26, 33]. Os materiais pozolânicos podem-se distinguir em pozolanas naturais (provenientes de erupções vulcânicas ou de argilas cozidas naturalmente pela lava incandescente), pozolanas artificiais (argilas/xistos termicamente ativados, como o metacaulino), ou ser subprodutos industriais e da agricultura como o caso de cinzas volantes, sílica de fumo e a cinza de casca de arroz [3, 26, 28, 34].

Dos vários materiais com características pozolânicas, nomeadamente as cinzas volantes e sílica de fumo a utilizarem-se como adição no betão, está prevista na norma NP EN 206 - 1 [3].

Por forma a promover o desenvolvimento sustentável e ecológico continuam a realizar-se estudos para identificar outras adições possíveis de se utilizar na constituição do betão tais como: as cinzas de casca de arroz [1, 35], resíduos da produção de vidro [36, 37], resíduos da queima de detritos florestais [1], cinzas de fundo das centrais de biomassa [1], cinzas volantes de biomassa [1], cinzas de cama de frango de casca de arroz [1], resíduos da indústria da pasta de papel (Grits) [1, 8, 35], entre outros [16, 32].

Tendo presente o exposto anteriormente, este estudo visa avaliar a viabilidade de utilização, de um resíduo de FCC da refinaria de Sines da Petrogal, como adição do tipo II de origem industrial no betão à luz da norma NP EN 206 - 1. O resíduo de FCC a estudo, contém na sua composição teores significativos de alumina e sílica (Subcapítulo 2.4), isto é, apresenta

potencialmente propriedades pozolânicas [9, 11, 10, 12, 13, 38, 39], o que torna este material como uma ótima adição ao cimento. Por este motivo, a utilização do catalisador exausto de FCC nos materiais de construção à base de cimento pode ser vantajosa (Subcapítulo 2.4), criando uma solução ambientalmente preferível ao seu destino atual e conferindo valor económico a materiais que seriam desprezados [22]. No subcapítulo 2.4 apresenta-se com mais detalhe as características do resíduo a estudo.

Vantagens na utilização de adições

O betão pode ser produzido utilizando apenas o cimento como material ligante. No entanto, a substituição parcial de cimento por uma ou pela combinação de adições do tipo I e do tipo II, pode apresentar vantagens ambientais, económicas, e tecnológicas, nomeadamente ao nível da resistência mecânica, que se apresentam sistematizadas na Figura 2.1 [36].

A procura da identificação de adições aumentou devido à possibilidade de redução da energia e da poluição incorporada na produção do cimento (diminuição da quantidade de emissão de CO₂), e também pela reutilização de subprodutos, que de outra forma seriam necessários armazenar, tratar, e havendo continuamente o risco de poluição [2, 36]. Relativamente ao custo do betão, concomitantemente bastará a diminuição do cimento nas composições de betão, para que a custos mais reduzidos possa produzir-se um material com vantagens para o meio ambiente e para a própria construção. Neste sentido pode-se produzir betões com fortes vantagens ambientais e económicas.

Por fim, as adições podem conferir maiores resistências mecânicas e podem melhorar significativamente a trabalhabilidade, a durabilidade, diminuição da porosidade, aumentando a compacidade [1, 26]. Neste sentido, e de forma sistematizada as adições podem conferir um efeito benéfico a algumas propriedades do betão:

- Maior resistência mecânica;
- Maior resistência à segregação do betão;
- Menor densidade;
- Melhor trabalhabilidade.

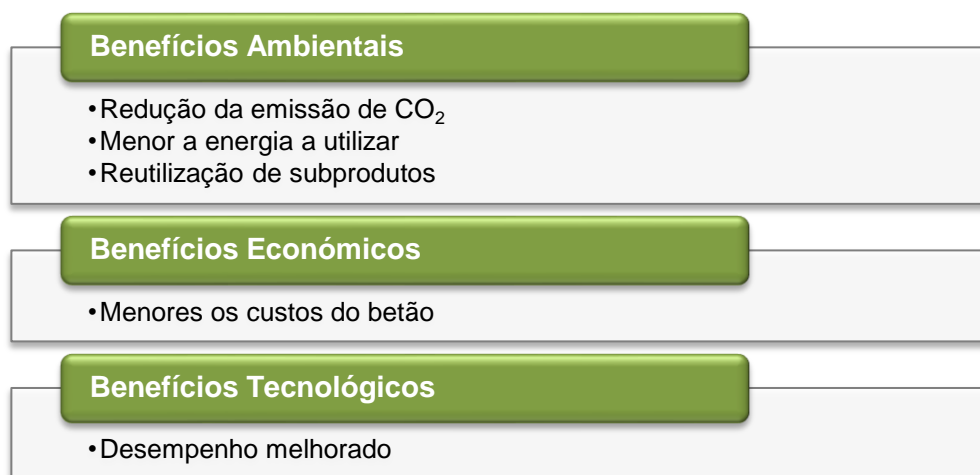


Figura 2.1 – Vantagens da utilização de adições no betão como substituto parcial do cimento.

2.4 CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA (FCC)

O catalisador exausto da unidade de “cracking” catalítico em leito fluidizado (na presente dissertação como catalisador exausto de FCC) é um subproduto presente em algumas refinadoras de petróleo, do qual é objeto de estudo desta dissertação o catalisador exausto de FCC da refinaria de Sines, da Petrogal. De seguida apresenta-se detalhadamente a origem do catalisador exausto de FCC e o seu efeito espectável ao se adicionar como adição no betão.

Origem do catalisador exausto de FCC

O petróleo é uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil, e é a matéria-prima da indústria petrolífera e petroquímica [40]. O petróleo bruto, ou seja quando extraído, é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos, isto é substâncias orgânicas formadas por moléculas de hidrogénio e carbono.

Após a extração do petróleo, segue-se a refinação do petróleo que consiste num processo químico de quebra (*cracking*) e na separação e purificação das grandes moléculas que consistem o petróleo, em frações de moléculas de menores dimensões, tirando partido das suas diferenças de densidade e volatilidade [41, 42]. Neste processo obtêm-se os diversos derivados do petróleo tais como o gasóleo, gás de petróleo liquefeito (GPL), metano, propano, nafta, entre outros [43].

A unidade de “*cracking*”¹ catalítico em leito fluidizado é uma unidade presente em algumas refinarias de petróleo de modo a otimizar o rendimento do processo de refinação. Nesta unidade os hidrocarbonetos de cadeia longas – óleos combustíveis – são convertidos em produtos mais leves, como o gasóleo e a gasolina, concorrendo para satisfazer as

¹ A designação em inglês é *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) e designado frequentemente em português por “unidades de FCC”.

necessidades humanas uma vez que o consumo destes produtos é superior aos óleos combustíveis [6, 22]. Esta unidade efetua as conversões a temperaturas elevadas (cerca de 480 a 550 °C), a pressões atmosféricas de 2 a 3 bar e na presença de um catalisador [22, 44] que tipicamente tem na sua composição, cerca de 5 a 40 % de zeólito Y que é um aluminossilicato cristalino, uma matriz com uma fração ativa composta por alumina e uma fração inerte constituída por uma argila que fornece uma estrutura porosa adequada à difusão dos hidrocarbonetos, e um ligante que estabelece a ligação entre os diversos elementos composto por sílica ou sílica-alumina [6, 23, 44].

Durante a atividade química do processo *cracking* catalítico forma-se um resíduo de alto teor de carbono, designado como coque (compostos poliaromáticos insaturados de alto teor de carbono) que se deposita sobre a superfície do catalisador, diminuindo a sua eficiência, necessitando assim da sua regeneração [6, 45]. Esta regeneração é efetuada a elevadas temperaturas, entre os 680 a 750°C e na presença de vapor de água [9, 44]. No entanto a regeneração provoca uma desativação do catalisador de FCC, diminuindo a eficiência do processo de “*cracking*”, pelo que é necessário a substituição de parte do catalisador por catalisador fresco. Atualmente, depois de retirado do processo o catalisador exausto é enviado sobretudo para aterros sanitários [6]. O catalisador retirado do processo - catalisador exausto de FCC – é o objeto de estudo nesta dissertação.

De salientar que as refinarias de petróleo usam aproximadamente 500 000 toneladas do catalisador de FCC, dos quais 20% são usados em refinarias europeias. A Galp Energia é proprietária de uma refinaria em Sines em que apresenta uma unidade de FCC. Desta forma, em Portugal são geradas cerca de 60 000 toneladas por ano do resíduo catalítico de FCC [11].

O catalisador desativado (catalisador exausto), contém, na sua composição teores significativos de alumina e sílica, apresentando potencialmente propriedades pozolânicas, como referido anteriormente (subcapítulo 2.3.4) e evidenciado em estudos efetuados em catalisadores provenientes de várias refinarias [5, 7, 8, 33, 38, 39, 46]. De referir que os catalisadores exaustos de FCC apresentam composições e características específicas em cada refinaria, o que poderá resultar em propriedades finais diferentes, incluídas as de carácter pozolânico. Desta forma, é necessário avaliar o seu comportamento individualmente, como forma de avaliar tendências e não valores [13, 22, 47]. Do qual nesta dissertação é objeto de estudo o catalisador exausto de FCC da refinaria de Sines da Petrogal, cuja atividade pozolânica já foi demonstrada [9, 10, 11, 12, 13, 38, 39].

Em estudos já realizados, concluiu-se ainda que relativamente ao processo de hidratação, quando estamos perante o resíduo de FCC este acelera o processo de hidratação do cimento nos primeiros instantes da reação. Esta é uma grande vantagem, pois acelera o processo de hidratação sem aumentar o calor libertado evitando grandes variações térmicas [48, 49].

Adicionalmente, estudos termogravimétricos [5, 50, 48, 49, 51] e de difração de raios-X [5, 49, 50, 52], em pastas de cimento revelaram que o teor de Ca(OH)_2 é inferior nas pastas que não

contêm resíduo, confirmando assim a sua atividade pozolânica concluindo que pode ser utilizado como adição pozolânica no betão. Também se verificou que a ação pozolânica do resíduo é favorecida quando este apresenta uma maior superfície específica e quando a dimensão da partícula é mais próxima da dimensão das partículas do cimento [6].

Efeito espectacular ao adicionar o catalisador exausto de FCC como adição no betão

Como referido anteriormente, foram realizados estudos a diferentes catalisadores exaustos de FCC em que apontam o potencial de utilização dos resíduos gerados nas unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado de refinarias para produção de materiais de construção como adição ao cimento no betão e em argamassas. Relativamente ao projeto “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “cracking” catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia” também foram realizadas algumas pesquisas relativamente ao catalisador exausto gerado pela refinaria da GALP em Sines, na produção de argamassas [9, 10, 11, 13] e na produção de betão auto-compactável [12].

O catalisador exausto de FCC em estudos anteriores verificou-se que tem como desvantagem ser uma pozolana que exige quantidades de água significativas, por ser muito absorvente que pode ser atribuído ao facto de o catalisador ter elevada área superficial específica, refletindo-se na perda de trabalhabilidade de betões [5, 12, 46], no estado fresco, e também verificado em argamassas [8, 11, 33, 46] tornando-se necessário usar um superplastificante ou adição de água à mistura.

A incorporação de resíduo de FCC como substituto parcial do cimento no betão, pode traduzir-se tanto no aumento como na diminuição da resistência à compressão, quando comparado com os betões de referência. Este facto depende não só da percentagem de substituição efetuada como da origem do resíduo. Desta forma estudos verificam um aumento na resistência mecânica com a presença de catalisador exausto de FCC, quando o cimento no betão é substituído por entre 10% a 25 % de catalisador exausto de FCC [4, 5, 50] e a diminuição das resistências mecânicas para substituições de 30% [53]. O aumento da resistência à compressão, na presença de catalisadores exaustos de FCC, foi verificado também em argamassas [5, 46]. Também se verificou que o betão com o resíduo de FCC também aumenta o módulo de elasticidade [45].

Ao adicionar catalisador exausto de FCC no betão, verificou-se que a microestrutura do betão fica mais compacta, aumentando densidade, diminuindo a absorção de água e aumentando a resistência a ações de ciclo gelo-degelo [5].

Por fim, no betão armado, verificou-se que o betão com incorporação de catalisador exausto de FCC aumenta a resistência à carbonatação aos teores de cloretos, contribuindo para a diminuição da permeabilidade dos cloretos [5, 7].

2.5 ADIÇÕES DO TIPO II SEGUNDO AS NORMAS EM VIGOR

Como referido no subcapítulo 2.3.4, as adições são materiais inorgânicos finamente divididos que podem ser adicionados ao betão como substitutos parciais do cimento. No entanto a utilização de adições no betão deve estar de acordo com as respetivas normas em vigor para que as mesmas possam ser comercializadas no mercado europeu. Como por exemplo as cinzas volantes com a norma NP EN 450, e a sílica de fumo com a norma NP EN 13263 e ainda ambas com a norma genérica para pozolanas nomeadamente a norma NP 4220 [54, 55, 56].

De referir, que ainda não existe uma norma europeia em vigor para o catalisador exausto de FCC, no entanto a utilização de adições no betão devem estar também de acordo com os requisitos exigidos pela norma NP EN 206 - 1.

Neste sentido, a norma NP EN 206 - 1 exige que sejam verificados os requisitos especificados, nomeadamente: (i) requisitos para os materiais constituintes; (ii) requisitos para a composição de betão; (iii) requisitos relacionados com a classe de exposição ambiental do betão; (iv) requisitos para o estado fresco do betão; (v) e requisitos para o estado endurecido do betão [3]. Neste sentido, e tendo em consideração os objetivos da presente dissertação, apenas se fará referência neste subcapítulo aos requisitos exigidos pela norma para a incorporação de adições do tipo II.

Requisitos para os materiais constituintes

A norma NP EN 206 - 1 [3] define que os materiais constituintes do betão não devem conter substâncias nocivas em quantidades prejudiciais à durabilidade do betão ou causar corrosão das armaduras, e devem ser adequadas ao uso previsto para o betão. Neste sentido, o betão pode conter na sua composição, cimento, agregados, água, adjuvantes e adições segundo as respetivas normas como apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Constituintes do betão segundo a norma NP EN 206 - 1, e as normas a que deve corresponder [19].

Constituintes	Normas
Cimento	EN 197 - 1
Agregados	Normais e pesados EN 12620
	Agregados leves EN 13055 - 1
Água	EN 1008
Adjuvantes	EN 934 - 2
Adições do tipo I e II	De acordo com a norma respetiva

Requisitos para a composição de betão

Relativamente aos requisitos para a composição de betão, uma vez que se pretende analisar uma nova adição do tipo II, segundo a norma NP EN 206 -1 as adições podem ser incluídas na composição do betão substituindo parcialmente o cimento [3]. A quantidade de adição do tipo II incluída irá afetar a razão água/ligante do betão, que pode ser determinada por dois métodos alternativos [3]:

- Recorrendo ao conceito do fator-k, sendo a razão água/cimento substituída pela razão água/(cimento+k×adição). Este método exige o conhecimento do fator-k que só está definido na norma NP EN 206 - 1 para as cinzas volantes e para a sílica de fumo. Para as cinzas volantes o fator-k está definido de 0,2 quando se utiliza CEM I 32,5 e de 0,4 quando se utiliza CEM I 42,5 e superiores. Para a sílica de fumo o fator-k está definido como sendo 2,0. No entanto, se o betão for produzido para as classes ambientais XC e XF, o fator-k tem o valor 1,0 quando as razões de água/(cimento+k×adição) são superiores a 0,45;
- Recorrendo ao conceito de desempenho equivalente do betão que consiste basicamente em considerar um betão que tem um desempenho equivalente ao de um betão de referência. Este conceito permite que se realizem alterações aos requisitos da norma NP EN 206 1 e da especificação do LNEC E 464, quanto à mínima dosagem de cimento e máxima relação água/cimento, devendo ser demonstrada a equivalência de desempenho, nomeadamente ao nível das propriedades fundamentais para a durabilidade e ações ambientais, utilizando a razão água/(cimento+adição) [57].

Ainda, referente aos requisitos para a composição de betão, especificados na norma NP EN 206 - 1, é relevante a análise do teor de cloretos de um betão. Neste sentido a norma define o máximo teor de cloretos que os betões devem conter, tendo em conta a utilização a que se destinam (Anexo B.2 e Quadro 10 da norma NP EN 206 - 1 [3]).

Requisitos relacionados com as classes de exposição ambiental do betão

A norma NP EN 206 - 1 define que antes da determinação da composição dos betões, deve-se avaliar qual o ambiente a que o betão irá estar exposto e portanto, a que classe de resistência ambiental terá que corresponder, de modo a responder a questões de durabilidade, nomeadamente a vida útil pretendida para a estrutura de betão. Os requisitos para cada classe de exposição, de acordo com a norma NP EN 206 - 1 [3] e descritos na especificação do LNEC E 464 [57] são (Anexo B.1):

- Tipos e classes de materiais constituintes permitidos;
- Máxima razão água/cimento;
- Mínima dosagem de cimento;
- Mínima classe de resistência à compressão;
- Recobrimento mínimo;
- Mínimo teor de ar do betão.

Os limites impostos, de modo a que a estrutura de betão corresponda às questões de durabilidade estão definidos na especificação do LNEC E 464 [57].

Requisitos para o estado fresco do betão

Os requisitos do estado fresco exigidos pela norma NP EN 206 - 1 [3] são nomeadamente, a dosagem de cimento, a razão água/cimento, o teor de ar, a máxima dimensão do agregado e os limites impostos para a determinação da consistência do betão, por um dos seguintes métodos:

- Ensaio de abaixamento;
- Ensaio de vêbê;
- Ensaio de compactação;
- Ensaio de espalhamento;
- Métodos específicos, a acordar entre o especificador e o produtor.

Requisitos para o estado endurecido do betão

Por fim, o betão no estado endurecido, tal como o betão no estado fresco deve estar de acordo com os requisitos especificados na norma NP EN 206 - 1 [3], relativamente à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, massa volúmica seca, resistência à penetração da água e requisitos relativos à reação ao fogo.

Assim, relativamente à resistência à compressão, uma vez que se pretende analisar um novo betão com adição de catalisador exausto de FCC, este deve ser ensaiado de modo a analisar se a composição utilizada conduz à resistência mecânica pretendida. Neste sentido, tendo em conta a norma NP EN 206 - 1, a resistência à compressão determinada experimentalmente

(fcm) aos 28 dias de hidratação deve ser igual ou superior à resistência (fck) que se considera como a requerida na determinação da composição do betão [3].

Após a avaliação dos requisitos especificados na norma NP EN 206 - 1, a designação do betão deve incluir:

- Referência à norma NP EN 206 - 1;
- Classe de resistência à compressão - segundo o Quadro 7 da norma NP EN 206 - 1 [3];
- Classe de exposição ambiental seguida do código do país;
- Classe de teor de cloretos (Quadro 10 da norma NP EN 206 -1 [3]);
- Máxima dimensão do agregado mais grosso (determinado pelo ensaio da análise granulométrica – subcapítulo 3.2.3);
- Classe de consistência (utilizando um dos métodos referidos anteriormente).

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação tem como objetivo contribuir para a avaliação da viabilidade de utilização de um catalisador exausto de FCC na produção de betões. Neste sentido pretende-se analisar os efeitos desta adição nas propriedades e desempenho de betão bem como, o enquadramento normativo do catalisador exausto de FCC e dos betões produzidos. Para esse efeito, caracterizaram-se os materiais e realizaram-se ensaios no estado fresco e no estado endurecido dos betões para avaliar a influência da adição do tipo II em estudo, o catalisador exausto de FCC.

O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do ISEL. A campanha experimental envolveu a preparação e o estudo de betão, com quatro composições distintas, nos quais o cimento foi substituído parcialmente até 30% em massa, por catalisador exausto de FCC. No Quadro 3.1 apresenta-se a designação adotada para o betão que foi definido em função da composição do ligante, isto é da percentagem mássica do cimento e do catalisador exausto de FCC.

Quadro 3.1 – Designação dos 4 traços de betões preparados.

Designação	Ligante	
	CEM I 42,5R	FCC
100C	100%	0%
90C+10FCC	90%	10%
80C+20FCC	80%	20%
70C+30FCC	70%	30%

A realização da campanha experimental requereu a necessidade de planejar todo o trabalho experimental, de forma a garantir uma maior fluidez na realização das várias atividades e de forma a simplificar a campanha experimental. Desta forma a campanha foi dividida em três fases distintas. A primeira consistiu na caracterização dos agregados, a segunda na formulação e produção dos betões, incluindo os ensaios no estado fresco, e a terceira nos respetivos ensaios do betão no estado endurecido.

De referir, que a caracterização dos outros materiais utilizados, nomeadamente o catalisador exausto de FCC e o cimento não foi realizada no âmbito desta dissertação uma vez que já tinham sido caracterizados anteriormente [39, 58].

No Quadro 3.2 apresenta-se uma sistematização dos ensaios experimentais realizados na caracterização dos agregados e na avaliação das propriedades do betão no estado fresco e endurecido, bem como das normas nas quais se basearam os respetivos procedimentos experimentais.

Quadro 3.2 – Ensaios realizados na caracterização dos agregados, na avaliação das propriedades do betão no estado fresco e endurecido, as normas utilizadas para a sua realização bem como, os subcapítulos desta dissertação em que os ensaios são descritos.

	Ensaios realizados	Normas/Especificações	Idade dos ensaios	Subsecção
Agregado Fino	Análise Granulométrica	NP EN 933-1 (2000) NP EN 933-2 (1999)	-	3.2.3
	Massa Volúmica e Absorção de Água	NP EN 1097-6 (2003)	-	3.2.3
	Baridade e Volume de Vazios	NP EN 1097-3 (2002)	-	3.2.3
Agregado Grosso	Análise Granulométrica	NP EN 933-1 (2000) NP EN 933-2 (1999)	-	3.2.3
	Massa Volúmica e Absorção de Água	NP EN 1097-6 (2003)	-	3.2.3
	Baridade e Volume de Vazios	NP EN 1097-3 (2002)	-	3.2.3
	Índice de Forma	NP EN 1097-6 (2003)	-	3.2.3
Ensaios no betão no estado fresco	Ensaio de Abaixamento – Cone Abrams	NP EN 12350 – 2 (2009)	-	3.5.1
	Massa Volúmica	NP EN 12350 – 6 (2009)	-	3.5.2
	Teor em Ar	NP EN 12350 – 7 (2009)	-	3.5.3
Ensaios no betão no estado endurecido	Velocidade de Propagação dos Ultra-Sons	NP EN 12504-4 (2007)	3, 7, 14, 28	3.7.1
	Resistência à Compressão	NP EN 12390-1 (2009)	3, 7, 14, 28, 56, 90	3.7.2
		NP EN 12390-2 (2009)		
		NP EN 12390-3 (2009)		
	Índice de Esclerómetro	NP EN 12504-2 (2012)	3, 7, 14, 28, 56, 90	3.7.3
	Absorção de Água por Capilaridade	E393 (1993)	28	3.7.4
	Absorção de Água por Imersão	E394 (1993)	28	3.7.5
Variações dimensionais	E398 (1993)	1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 63, 69, 90	3.7.6	

Relativamente à determinação da composição dos betões recorreu-se ao método das curvas de referência da granulometria dos constituintes “secos” do betão de Faury, normalmente identificado por “método de Faury”, do qual se descreveu pormenorizadamente no Anexo D.1.

Em síntese, neste capítulo apresentam-se pormenorizadamente: os materiais utilizados (Subcapítulo 3.2) nos betões estudados (Quadro 3.1); as metodologias adotadas na realização da caracterização dos agregados (Subcapítulo 3.2.3); o método utilizado para o cálculo dos betões e a sua amassadura (Subcapítulos 3.3 e 3.4); as metodologias adotadas na realização dos ensaios no estado fresco (Subcapítulo 3.5), preparação, moldagem e cura (Subcapítulo 3.6), e as metodologias adotadas na realização dos ensaios no estado endurecido (Subcapítulo

3.7), estabelecendo-se o enquadramento com as referências normativas em vigor, e apresentando-se as expressões de cálculo associados.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Cimento

No desenvolvimento da campanha experimental foi utilizado o cimento Portland tipo I da classe de resistência 42,5 com elevada resistência nos primeiros dias (CEM I 42,5R), fornecido pelo grupo CIMPOR, produzido na fábrica de Alhandra. O material foi fornecido em sacos de 35Kg, (Figura 3.1 (a-b)), utilizando-se na campanha experimental sempre o mesmo lote. Ao longo da campanha experimental teve-se o cuidado de tentar prevenir a hidratação prematura do cimento, colocando-se sempre um plástico sobre os sacos de cimento quando abertos.



Figura 3.1 – Cimento utilizado na campanha experimental. Cimento CEM I 42,5 R (a); Abertura do saco de cimento (b).

De acordo com a ficha técnica do fabricante disponível no Anexo C.1 e segundo a NP EN 197 - 1 [27] este cimento apresenta na sua constituição uma percentagem de clínquer que varia entre 95 e 100%. Relativamente à massa volúmica, esta foi determinada em trabalhos anteriores, sendo de $3,18 \text{ g/cm}^3$ [38].

Relativamente às percentagens de cimento utilizadas em cada betão, estas encontram-se descritas no Quadro 3.1.

3.2.2 Catalisador exausto de FCC

Na campanha experimental, como substituto parcial do cimento utilizou-se o catalisador exausto da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidificado (FCC) (Figura 3.2 (a)) fornecido pela refinaria de Sines da empresa Petrogal. O catalisador, como referido no subcapítulo 2.4 é um material com características pozolânicas (Figura 3.2 (b)) [9, 10, 11, 12, 13].

Na Figura 3.2 apresenta-se o catalisador exausto de FCC como fornecido para a campanha experimental (Figura 3.2 (a)), e uma imagem microscópica eletrônica de varrimento das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines (Figura 3.2 (b)) [39, 58].

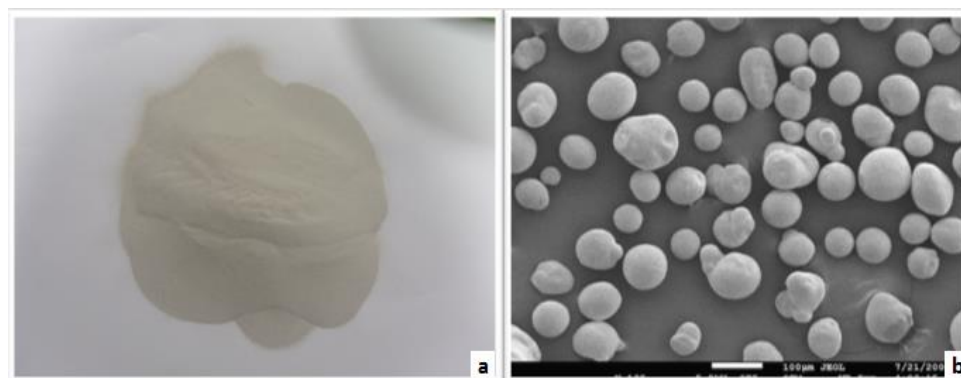


Figura 3.2 – Catalisador exausto de FCC. a) Fotografia do catalisador exausto da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidificado (FCC), como fornecido; b) Imagem de microscopia eletrônica de varrimento, obtida em modo de elétrons secundários (JEOL JSM 7001F), das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines [38, 39, 58].

No Quadro 3.3 apresenta-se a composição química do catalisador exausto de FCC e do cimento Portland 42,5R e no Quadro 3.4 as propriedades físicas do catalisador exausto de FCC.

Quadro 3.3 – Composição química e propriedades físicas do catalisador exausto FCC e do cimento Portland 42,5R [39, 58].

Composição Química	Catalisador exausto de FCC (%)	Cimento Portland 42,5 R (%)
SiO ₂	39,59	19,41
Al ₂ O ₃	52,81	5,40
Fe ₂ O ₃	0,55	3,23
CaO _{Total}	0,09	62,57
MgO	0,19	1,91
SO ₃ ⁻	0,23	2,89
K ₂ O	0,04	1,10
Na ₂ O	0,68	0,00
Ti ₂ O ₃	0,82	0,27
P ₂ O ₅	0,06	0,10
Mn ₂ O	0,00	0,05
SrO	0,00	0,07
Cl ⁻	0,01	0,02
Perda ao fogo	1,49	2,70

Quadro 3.4 – Propriedades físicas do catalisador exausto de FCC [39, 58].

Propriedades físicas	Catalisador exausto de FCC
Densidade (g/cm ³)	2,71
Dimensão média da partícula (µm)	80 – 124,3

Na Figura 3.3 apresenta-se a distribuição cumulativa do tamanho de partículas do cimento e do catalisador exausto de FCC.

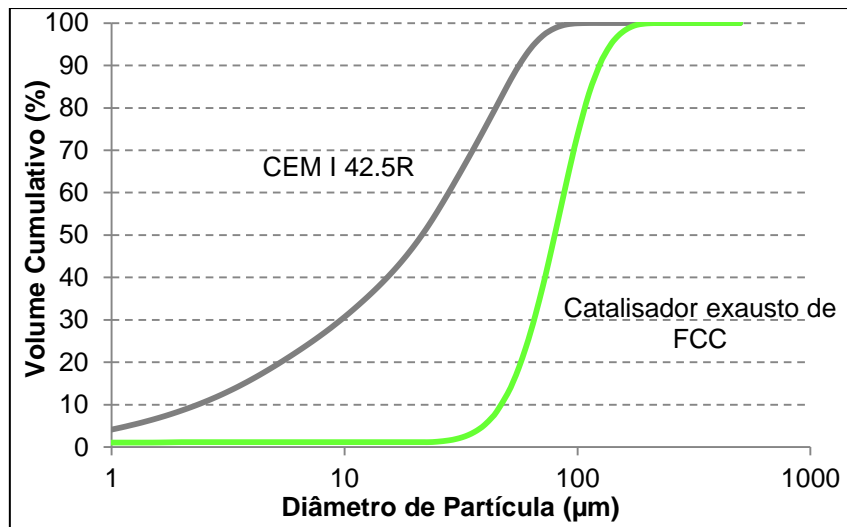


Figura 3.3 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC [38, 39, 58].

Relativamente à distribuição cumulativa do tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC, verifica-se que partículas do resíduo são maiores do que as do cimento, tendo como dimensão média das partículas entre 80 e 124,3 µm [38].

As percentagens de catalisador exausto de FCC utilizadas em cada betão, estão descritas no Quadro 3.1.

3.2.3 Agregado

Na campanha experimental utilizaram-se dois tipos de agregados, referidos neste documento respetivamente como o “agregado grosso” e o “agregado fino”. O agregado fino por sua vez incluiu duas areias: a areia fina britada, designada como areia 0/2 (Figura 3.4.(a)) e a areia grossa britada designada como areia 0/4 (Figura 3.4.(b)). O agregado grosso incluiu duas britas, distinguindo-se pela máxima dimensão da partícula, designada como a brita 1 (Figura 3.4.(c)) e a brita 2 (Figura 3.4.(d)). A informação dos agregados usados encontra-se sistematizados no Quadro 3.5 no qual se inclui também a dimensão máxima da partícula, e o tipo de agregado.

Quadro 3.5 – Designação dos agregados, dimensão máxima da partícula e subcapítulo com a quantidade em massa na composição do betão.

Agregado	Constituintes	Dimensão máxima da partícula (mm)	Tipo de agregado
Agregado Fino	Areia 0/2	2	Britado
	Areia 0/4	4	Britado
Agregado Grosso	Brita 1	12,5	Britado
	Brita 2	20	Britado



Figura 3.4 – Agregados utilizados na campanha experimental. a) Areia 0/2; b) Areia 0/4; c) Brita 1; d) Brita 2.

Como primeira fase na campanha experimental para cada tipo de agregado utilizado, nomeadamente agregado grosso e agregado fino (Quadro 3.5), realizou-se a respetiva caracterização através da realização de ensaios específicos segundo o procedimento experimental descrito nas normas indicadas no Quadro 3.2. Assim, de seguida especifica-se as metodologias utilizadas em cada ensaio dos agregados, de acordo com as normas.

Ensaio aos agregados

De referir, a importância dos agregados na mistura do betão (não menosprezando os restantes constituintes), uma vez que estes ocupam em geral cerca de 70 a 80% do volume do betão, isto é cerca de três quartos do volume total, como referido no subcapítulo 2.3.2. Como tal, as suas características geométricas e físicas influenciam consideravelmente o desempenho do betão relativamente à sua durabilidade e resistência mecânica [59].

Assim, se um dado agregado submetido aos diversos ensaios e apresentar características de acordo com a norma NP EN 12620 [30], então é possível produzir um betão de qualidade (subcapítulo 2.3.2). Desta forma, é importante avaliar os agregados antes de produzir betões. As propriedades de cada agregado foram utilizadas posteriormente para a formulação dos betões pelo método de Faury (Anexo D.1).

Os ensaios realizados para cada um dos agregados estão descritos no Quadro 3.2. Para cada agregado e como forma a atenuar quaisquer erros optou-se por realizar três vezes o mesmo ensaio em amostras diferentes e o resultado final será a média aritmética das 3 amostras.

* **Análise granulométrica**

A análise granulométrica de um agregado, grosso ou fino, consiste em separar uma amostra do agregado em frações, sendo que em cada fração fica retido as partículas com dimensões correspondentes às aberturas dos peneiros [29].

Os procedimentos experimentais para a determinação da análise granulométrica dos agregados utilizados na campanha experimental (Quadro 3.5), foram realizados de acordo com a norma NP EN 933 - 1 [60] e a norma NP EN 933 - 2 [61].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da análise granulométrico dos agregados da campanha experimental encontram-se indicados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Utensílios utilizados na determinação da análise granulométrica dos agregados finos e grossos.

Utensílios
- Balança com precisão de ± 0.1 % da massa do provete;
- Estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- Peneiros de ensaio com aberturas de: 0.063; 0.125; 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 5.6; 6.3; 8; 10; 11.2; 12,5; 14; 16; 20; 22,4; 31,5 mm de acordo com a norma NP EN 933 -2.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 933 - 1

A primeira fase do ensaio consistiu na obtenção da massa mínima da amostra, do qual se recorreu à máxima dimensão do agregado, fino ou grosso, como especificado na norma NP EN 933 - 1 [60]. Após a obtenção da amostra colocou-se a mesma na estufa até obter massa constante, designada como $M_{1agr.análisegra}$.

De seguida, a amostra foi lavada, com a ajuda dos peneiros de 0,063 e 4 mm, até que a água que passasse pelo peneiro de 0,063 mm estivesse límpida, obtendo-se apenas os agregados de dimensões superiores à da menor abertura utilizada. Após a lavagem, a amostra foi

colocada na estufa até ser atingida, novamente a massa constante, deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como $M_{2agr.análisegra}$.

Posteriormente, despejou-se a amostra sobre a coluna de peneiros, que se apresenta na Figura 3.5. Estes peneiros, com abertura de malha conforme referido no Quadro 3.6, foram dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas. Após a amostra ser colocada na coluna de peneiros, agitou-se a coluna, garantindo que não existe perda de material. Na campanha experimental agitou-se a coluna de peneiros manualmente, mas poder-se-ia recorrer ao método mecânico.

Finalmente, pesou-se o material retido no peneiro de maior dimensão (registando como R_i), e de seguida transferiu-se para o peneiro seguinte, continuando a operação até peneiro de 0,063 mm. O material retido no fundo da coluna de peneiros, ou seja o material que atravessou o peneiro de 0,063 mm, foi também pesado e registou-se a sua massa como P.



Figura 3.5 – Coluna de peneiros de acordo com a norma NP EN 933 -2.

Expressão dos resultados

A curva granulométrica corresponde à representação gráfica da percentagem de material retido em cada peneiro, representada no eixo das abcissas a dimensão dos peneiros, numa escala proporcional à raiz quinta da dimensão das partículas e nas ordenadas, numa escala linear, a percentagem de material que passa em cada peneiro. Cujo cálculo recorreu-se à Eq.3.1.

$$\%R_i = \frac{R_i}{M_{1agr.análisegra}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sendo,

$\%R_i$ – percentagem de material retido acumulado no peneiro i (%);

R_i – massa de material retido no peneiro i (g);

$M_{1agr.análisegra}$ – massa total da amostra seca em estufa (g).

A percentagem de finos (%f) presentes na amostra, ou seja os finos que atravessam o peneiro de 0,063 mm (Quadro 3.6) determinou-se pela expressão:

$$\%f = \frac{(M_{1\text{agr.análisegra.}} + M_{2\text{agr.análisegra.}}) + P}{M_{1\text{agr.análisegra.}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Sendo,

%f – percentagem de finos que atravessou o peneiro de 0,063 mm (%);

$M_{1\text{agr.análisegra.}}$ – massa total da amostra seca em estufa (g);

$M_{2\text{agr.análisegra.}}$ – massa da amostra após lavagem e secagem (g);

P – massa do material retido no peneiro de fundo (g).

De forma a validar a correta execução do procedimento experimental, a norma NP EN 933 - 1 define que a soma das massas Ri e P não deve deferir mais de 1% relativamente à massa $M_{2\text{análisegra.}}$

Com os valores das percentagens obtidos neste processo, determinaram-se os módulos de finura (MF), que consistem na soma das percentagens totais de material retido nos peneiros da série principal dividida por 100, conforme a Eq. 3.3.

$$\mathbf{MF} = \frac{\%R_{31,5} + \%R_{16} + \%R_8 + \%R_4 + \%R_2 + \%R_1 + \%R_{0,5} + \%R_{0,25} + \%R_{0,125} + \%R_{0,063}}{100} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

* Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica dos agregados é uma propriedade importante na definição da composição do betão, porque a determinação dos seus constituintes é expresso em volume, mas as suas dosagens do ponto de vista da preparação são, geralmente expressas em massas. O conhecimento da massa volúmica permite assim, a realização desta conversão.

O ensaio da absorção de água nos agregados deve ser realizado de modo a avaliar, se irá afetar ou não a produção de betões. Ou seja, ao se determinar a quantidade de água para a amassadura do betão como descrito no Anexo D.1, deve-se ter em conta todas as perdas devidas a outros fenómenos como por exemplo a absorção de água dos agregados.

Os procedimentos experimentais para a determinação da massa volúmica e absorção de água pelos agregados utilizados na campanha experimental (Quadro 3.5), foram realizados de acordo com a norma NP EN 1097 - 6 [62]. Esta norma prevê a utilização de um de dois métodos, sendo a seleção baseada na granulometria do agregado a estudo. Em concreto, a norma recomenda a utilização do método do picnómetro, no caso dos agregados finos terem dimensões de 0,063 a 4 mm, e no caso dos agregados grossos terem dimensões de 4 a 31,5 mm, e recomenda o método do cesto de rede metálica para partículas superiores a 31,5 mm.

No entanto, optou-se pela utilização do método do cesto de rede metálica para a determinação da massa volúmica e absorção de água dos agregados grossos, cuja máxima dimensão é de 20 mm (Quadro 3.5), devido ao facto da não existência de um picnómetro, em laboratório, com dimensões adequadas aos agregados grossos. Neste sentido, para o agregado fino utilizou-se o método do picnómetro e para o agregado grosso utilizou-se o método do cesto de rede metálica, a seguir descritos.

Agregado grosso – Método do cesto de rede metálica

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da massa volúmica e absorção de água, pelo método do cesto de rede metálica dos agregados grossos da campanha experimental encontram-se indicados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água nos agregados grossos pelo método do cesto de rede metálica.

Utensílios
- Balança com precisão de ± 0.1 % da massa do provete;
- Pano seco:
- Estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- Peneiros de ensaio com aberturas de 0,063 mm e 31,5 mm;
- Tanque/Balde com água a 22 ± 3 °C.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 1097 - 6

A primeira fase do ensaio consistiu na obtenção da massa da amostra. Do qual se recorreu à máxima dimensão do agregado grosso (brita 1 e brita 2), como especificado na norma NP EN 1097 – 6 [62]. Após a sua obtenção, lavou-se a amostra sobre o peneiro de 4 mm de modo a remover todos os finos, rejeitando as partículas que atravessassem o peneiro de 4 mm.

De seguida colocou-se o provete no cesto de rede metálica e imergiu-se completamente no balde com água, retirando todo o ar ocluído, e verificou-se se a altura de água está pelo menos 50 mm acima do topo. Por fim deixou-se o cesto com o agregado imerso cerca de $24 \pm 0,5$ h.

Posteriormente agitou-se o cesto, pesou-se dentro de água, e registou-se a massa como $M_{2agr.mvol.cm}$. De seguida, retirou-se o cesto da água e verteu-se o agregado sobre um pano seco, voltou-se a pesar o cesto dentro de água sem o agregado, registando como $M_{3agr.mvol.cm}$.

Após a pesagem do cesto dentro de água sem o agregado, secou-se o agregado cuidadosamente com um pano seco e pesou-se, registando como $M_{1agr.mvol.cm}$. Por fim, verteu-se o agregado para um tabuleiro e colocou-se em estufa até massa constante, registando como $M_{4agr.mvol.cm}$.

Expressão dos resultados

As massas volúmicas foram obtidas pelas expressões que a seguir se apresentam:

$$\rho_a = \frac{M_{4agr.mvol.cm.}}{[M_{4agr.mvol.cm.} - (M_{2agr.mvol.cm.} - M_{3agr.mvol.cm.})] / \rho_w} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_{4agr.mvol.cm.}}{[M_{1agr.mvol.cm.} - (M_{2agr.mvol.cm.} - M_{3agr.mvol.cm.})] / \rho_w} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_{1agr.mvol.cm.}}{[M_{1agr.mvol.cm.} - (M_{2agr.mvol.cm.} - M_{3agr.mvol.cm.})] / \rho_w} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

A absorção de água foi obtida pela expressão:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_{1agr.mvol.cm.} - M_{4agr.mvol.cm.})}{M_{4agr.mvol.cm.}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Sendo,

$M_{1agr.mvol.cm.}$ – massa do agregado saturado com superfície seca (g);

$M_{2agr.mvol.cm.}$ – massa aparente do cesto contendo a amostra saturada, imerso em água (g);

$M_{3agr.mvol.cm.}$ – massa aparente do cesto vazio imerso em água (g);

$M_{4agr.mvol.cm.}$ – massa da amostra seca em estufa (g);

ρ_w – massa volúmica da água à temperatura registada quando a determinação de $M_{2agr.mvol.}$ (g/cm^3);

ρ_a – massa volúmica do material impermeável dos agregados (g/m^3);

ρ_{rd} – massa volúmica dos agregados secos em estufa (g/m^3);

ρ_{ssd} – massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (g/m^3).

Agregado fino – Método do Picnómetro para agregados com dimensão entre 0,063 mm e 4 mm

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da massa volúmica e absorção de água, pelo método do picnómetro dos agregados finos da campanha experimental encontram-se indicados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água nos agregados finos pelo método do picnómetro

Utensílios
- Balança com precisão de ± 0.1 % da massa do provete;
- Estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- Picnómetro;
- Tanque/Balde com água a 22 ± 3 °C;
- Peneiros de ensaio de 4 mm e 0,063 mm.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 1097 - 6

A primeira fase do ensaio consistiu na obtenção da massa da amostra. Do qual se recorreu à máxima dimensão do agregado fino (areia 0/2 e areia 0/4) como especificado na norma NP EN 1097 - 6 [62]. Após a sua obtenção lavou-se a amostra sobre os peneiros de 4 mm e de 0,063 mm de modo a remover todos os finos, rejeitando quaisquer partículas não contidas nesse intervalo.

A amostra preparada anteriormente foi imersa dentro de um picnómetro, adicionando água a 22 ± 3 °C até total imersão da amostra, agitou-se o picnómetro com o intuito de eliminar o ar da mistura, e de seguida imergiu-se o picnómetro em água a 22 ± 3 °C durante $24 \pm 0,5$ h.

Terminado esse período, agitou-se novamente, fez-se transbordar o picnómetro por adição de água à mesma temperatura e colocou-se a tampa sem permitir entrada de ar. De seguida, secou-se o picnómetro por fora, pesou-se e registou-se a sua massa como $M_{2agr.mvol.cm}$ e registou-se a temperatura da água.

Seguidamente, decantou-se a maior quantidade de água possível, contida no picnómetro, e espalhou-se a amostra sobre um tabuleiro. De seguida, encheu-se novamente o picnómetro, fazendo-o transbordar por adição de água, e secou-se por fora, pesou-se e registou-se a sua massa como $M_{3agr.mvol.cm}$. De referir, que se registou novamente a temperatura da água para garantir que não ocorreram variações superiores e inferiores na ordem dos 2 °C.

Posteriormente, a amostra foi exposta a uma leve corrente de ar, durante um certo período de tempo, e foi remexida frequentemente até não ser visível humidade superficial. Por fim registou-se a massa como $M_{1agr.mvol.cm}$.

Finalmente, colocou-se a amostra na estufa a 110 ± 5 °C até alcançar massa constante. Após alcançar massa constante deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como $M_{4agr.mvol.cm}$.

Expressão dos resultados

Os cálculos são os mesmos descritos para os agregados grossos, nomeadamente as equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

* **Baridade e volume de vazios**

A baridade ou a massa volúmica aparente estabelece a relação entre a massa e o volume aparente ocupado por um conjunto de agregados. O conhecimento desta grandeza é fundamental quando as medições correspondentes à formulação do betão são feitas em volume e não em massa. Através do ensaio para a determinação da baridade, é também possível calcular a percentagem de vazios num dado volume de agregados, nomeadamente o volume de vazios [63].

Os procedimentos experimentais para a determinação da baridade e volume de vazios dos agregados utilizados na campanha experimental (Quadro 3.5), foram realizados de acordo com a norma NP EN 1097 - 3 [64].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da baridade e volume de vazios dos agregados da campanha experimental encontram-se indicados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Utensílios utilizados na determinação da baridade e volume de vazios nos agregados grossos e finos

Utensílios
- Balança com precisão de ± 0.1 % da massa do provete;
- Estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- Balde de aço inoxidável;
- Varão de compactação.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 1097 - 3

A primeira fase do ensaio consistiu na obtenção da massa mínima da amostra. Do qual recorreu-se à máxima dimensão do agregado, fino ou grosso, de modo a retirar qual a capacidade mínima do recipiente a utilizar e assim conhecer qual a massa da amostra a utilizar como especificado na NP EN 1097 - 3 [64]. A amostra foi colocada em estufa à temperatura de 110 ± 5 °C até atingir massa constante.

Após a determinação da capacidade volúmica do recipiente e o agregado seco em estufa pesou-se o recipiente vazio e seco, registando-se o seu valor como $M_{1agr.bar}$. Seguidamente, o recipiente foi colocado sobre uma superfície horizontal e cuidadosamente cheio, até transbordar e sem compactação. Com o auxílio do varão de compactação procedeu-se à regularização da superfície do mesmo. Pesou-se o recipiente cheio e registou-se a sua massa como $M_{2agr.bar}$.

Expressão dos resultados

A baridade foi determinada pela seguinte expressão:

$$\rho_b = \frac{(M_{2agr.bar} - M_{1agr.bar})}{V} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Sendo,

ρ_b – baridade do agregado (kg/m^3);

$M_{1\text{agr.bar}}$ – massa do recipiente de ensaio (kg);

$M_{2\text{agr.bar}}$ – massa do recipiente de ensaio cheio com agregado (kg);

V – volume do recipiente de ensaio (m^3).

Por fim a percentagem de vazios é traduzida pela Eq.3.9.

$$\%v = \frac{(\rho_{rd} - \rho_b)}{\rho_{rd}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Sendo,

$\%v$ – percentagem de vazios (%);

ρ_{rd} – massa volúmica dos agregados secos em estufa, determinado no ensaio da massa volúmica e volúmica e absorção de água (kg/m^3);

ρ_b – baridade do agregado (kg/m^3).

* Índice de Forma

O índice de forma dos agregados grossos é um aspeto importante para compreender o comportamento do betão, em termos de consistência e compacidade. Estas características são variáveis uma vez que a forma das partículas determina a disposição e interligação das mesmas na mistura final.

Assim, o índice de forma relaciona o comprimento das maiores e menores dimensões das partículas, classificando-as em cúbicas ou não cúbicas (alongado). No betão quanto menor a quantidade de partículas não cúbicas melhor a sua compacidade.

Os procedimentos experimentais para a determinação do índice de forma do agregado grosso nomeadamente a brita 1 e a brita 2 (Quadro 3.5), foram realizados de acordo com a norma NP EN 933 - 4 [65].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação do índice de forma dos agregados grossos encontram-se indicados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Utensílios utilizados na determinação o índice de forma nos agregados grossos.

Utensílios
- Balança com precisão de ± 0.1 % da massa do provete;
- Estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- Paquímetro;
- Peneiros de ensaio de dimensões: 31.5; 22.4; 16; 11.2; 8; 5.6; e 4 mm.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 933 - 4

A primeira fase do ensaio consistiu na obtenção da massa mínima da amostra. Do qual recorreu-se à máxima dimensão do agregado, especificamente do agregado grosso brita 1 e brita 2, como especificado na norma NP EN 933 - 4 [65]. De seguida, a amostra foi previamente seca em estufa à temperatura de 110 ± 5 °C até atingir massa constante.

Após a amostra alcançar massa constante, procedeu-se à sua peneiração, de forma a excluir todas as partículas que passem pelo peneiro com abertura de malha de 4 mm. A amostra daí resultante foi pesada e registou-se a sua massa como $M_{0agr.iforma}$.

De seguida peneirou-se a amostra nos seguintes peneiros: 31.5 mm, 22.4 mm, 16 mm, 11.2 mm, 8 mm, 5.6 mm e 4mm, registando as massas de cada peneiro ($M_{1iagr.iforma}$) e calculou-se a percentagem relativa à massa total da amostra, M_0 . As frações com percentagem inferiores a 10% mássico foram desprezadas. Para as frações não desprezadas mediu-se com o auxílio do paquímetro, a dimensão máxima, L, e a dimensão mínima, E, de cada partícula, e separaram-se e recolheram-se as partículas não cúbicas, ou seja, as que apresentavam uma relação dimensional $L/E > 3$.

Finalmente, pesou-se e registou-se a massa da amostra contendo as partículas não cúbicas, de cada fração granulométrica, como M_{2i} .

Expressão dos resultados

O índice de forma conforme a norma NP EN 933 - 4 foi calculado pela seguinte expressão:

$$SI = \left(\frac{\sum_{i=1}^y M_{2iagr.iforma}}{\sum_{i=1}^x M_{1iagr.iforma}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Sendo,

SI – índice de forma (%);

$M_{2iagr.iforma}$ – massa das partículas não cúbicas em cada peneiro (g);

$M_{1iagr.iforma}$ – massa das partículas retidas em cada peneiro (g).

3.2.4 Água

Na composição dos betões utilizou-se água da rede pública de abastecimento da cidade de Lisboa, satisfazendo as exigências da norma NP EN 206 -1 [3].

3.2.5 Superplastificante

A escolha do uso do superplastificante (SP) foi motivada pelo intuito de induzir consistência ao betão, uma vez que como referido no subcapítulo 2.4. o catalisador exausto de FCC é muito absorvente, consumindo a água do betão, refletindo-se na perda de consistência dos betões que o contenham.

O superplastificante utilizado para a realização da campanha foi o SikaPlast 898, conforme a Figura 3.6, onde a ficha técnica do fabricante se encontra no Anexo C.2, fornecido pela empresa Sika.



Figura 3.6 – Superplastificante (Sikaplast 898) utilizado na campanha experimental

A quantidade de incorporação do superplastificante foi ajustada em função da consistência pretendida (Subcapítulo 3.3). De acordo com o fabricante, a quantidade a utilizar seria de 0,5 a 1,5% do ligante a introduzir no betão (quantidade de cimento mais catalisador exausto de FCC). Durante a fase experimental, a dosagem de superplastificante foi ajustada de 1% do ligante, ou seja, conforme o Anexo D.1, uma quantidade de $4,26 \text{ l/m}^3$.

3.3 FORMULAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Nesta campanha experimental, produziram-se betões com quatro traços diferentes, nos quais, especificamente, se substituiu parcialmente o cimento por 0%, 10%, 20%, e 30% (percentagem mássica) de catalisador exausto de FCC (a notação adotada nestes betões foi apresentado no Quadro 3.1).

Uma vez que se pretende atender às exigências requeridas na norma NP EN 206 - 1, na utilização de catalisador exausto como adição ao betão, recorreu-se à mesma de modo a ter

em consideração quais os requisitos a que os diferentes traços de betões deveriam estar de acordo. Neste sentido, relativamente às adições, a norma refere que para o uso de adições na mistura de betão deve-se considerar um dos seguintes conceitos (apresentados no subcapítulo 2.5) [3]:

- Fator-k – que se encontra estabelecido para cinzas volantes e para sílica de fumo, referido no subcapítulo 2.5;
- Desempenho equivalente do betão.

Na presente dissertação optou-se pelo conceito do fator-k, considerando que o fator-k tem valor 1 e portanto, utilizando a razão água/(cimento+k×adição) igual à razão água/(cimento+adição).

Mantendo a focalização de que nesta dissertação se pretende avaliar a viabilidade de utilização do catalisador exausto de FCC como adição do tipo II, na composição do betão, e tendo em consideração que se pretende também atender às exigências requeridas na norma NP EN 206 - 1 [3], primeiramente definiram-se um conjunto de pressupostos para o cálculo dos betões a estudar que se encontram explicados abaixo e sinteticamente apresentados no Quadro 3.11:

- A classe de exposição optou-se pela **XC4**, uma vez que corresponde às exigências de exposição a um ambiente ciclicamente húmido e seco, que é o ambiente mais corrente em Portugal;
- O tipo de cimento optou-se pelo **CEM I 42,5R**, já referido no subcapítulo 3.2.1;
- Após a escolha do tipo de cimento a utilizar e da classe de exposição que os betões devem obedecer, recorreu-se à especificação do LNEC E464 [57] de modo a ter em consideração os limites impostos. Assim de acordo com esta especificação para os betões a estudo a dosagem de cimento mínima, é de 280 kg/m³, a razão a/c máxima, de 0,60, e a classe de resistência mínima do betão, C30/37 (Anexo B.1). Neste sentido optou-se para os betões a estudo uma classe de resistência do betão **C30/37**;
- Optou-se ainda por produzir betões com consistência mole (**S3**), uma vez que segundo a Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (Apeb) é o recomendado nas aplicações estruturais correntes. Os betões de classe de consistência S3 devem apresentar abaixamento pelo Cone de *Abrams* entre 100 e 150 mm [3];
- A razão água/ligante optou-se por manter constante para os 4 traços de betão em estudo;
- Relativamente aos agregados, optou-se pela utilização potencial de 4 agregados, especificamente dois agregados finos e dois agregados grossos (ver Quadro 3.5). No entanto, para dois dos traços dos betões preparados neste trabalho (20 e 30% de substituição de cimento), após o cálculo da composição dos betões verificou-se que o agregado fino 0/2 não foi incluído na composição. Tal pode ser atribuído ao facto de que o método de cálculo dos betões escolhido (método de Faury) garantir a máxima compacidade dos betões (Quadro 3.12), uma vez que o diâmetro médio do catalisador

exausto de FCC (Figura 3.3), e o diâmetro médio da areia 0/2 (Quadro 4.1) são semelhantes.

Quadro 3.11 – Pressupostos que se assumiram para a formulação dos 4 traços de betões preparados.

Características	Referência
Classe de exposição	XC4
Tipo de cimento	CEM I 42,5 R
Classe de resistência	C30/37
Classe de consistência	S3
Máxima dimensão do agregado	20 mm
Adjuvante	Superplastificante: SikaPlast 898
Adição	Catalisador exausto de FCC

Quadro 3.12 – Identificação dos agregados na composição dos 4 traços de betões preparados.

Designação	Agregado Fino		Agregado Grosso	
	Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
100C	✓	✓	✓	✓
90C+10FCC	✓	✓	✓	✓
80C+20FCC	x	✓	✓	✓
70C+30FCC	x	✓	✓	✓

As composições exatas dos betões preparados nesta campanha experimental – que se apresenta no Quadro 3.13 – foram determinadas tendo em conta os pressupostos referidos neste subcapítulo (Quadro 3.11) e recorrendo ao método de Faury (Anexo D.1). A escolha deste método de cálculo baseou-se na sua simplicidade de cálculo, aliado à sua fiabilidade [59]. Em síntese, este método com base nas características dos agregados disponíveis e nos pressupostos referidos, permite a determinação da curva de referência da granulometria dos constituintes secos do betão e assim determinar as quantidades dos agregados a introduzir na composição do betão de forma a garantir a máxima compacidade. No Anexo D.1 apresenta-se a aplicação detalhada do método de Faury.

Tal como referido anteriormente assumiu-se como um dos pressupostos para determinação da composição dos betões, que de acordo com a sua consistência os betões deveriam classificar-se como S3 (Quadro 3.11). Uma vez que a relação A/L mantida igual para todos os traços de betões preparados, o ajuste da consistência seria concretizada com a adição de superplastificante. Inicialmente assumiu-se a adição de 1% (em massa) de superplastificante em relação à quantidade de ligante. No entanto, a adequação deste valor de superplastificante adicionado teria que ser confirmado experimentalmente com base nos resultados do ensaio de abaixamento pelo cone de *Abrams* realizado no estado fresco dos betões. Neste sentido, verificou-se para os 4 traços de betões preparados que a quantidade de SP adicionada era adequada (Subcapítulos 4.3.1).

Tal como se referiu atrás neste subcapítulo, assumiu-se que se pretendia preparar betões de consistência mole, o que de acordo com a norma NP EN 206 - 1 corresponde a limites do abaixamento, pelo Cone de Abrams, entre 100 e 150 mm [3]. No entanto estabeleceu-se um limite menos extenso de 130 ± 15 mm de forma a possibilitar a comparação mais rigorosa dos resultados experimentais dos quatro traços dos betões (Subcapítulo 4.3.1).

Quadro 3.13 – Composição dos 4 traços de betões preparados (obtidas tendo em conta os pressupostos considerados no Quadro 3.11 e pelo método de Faury em kg/m^3).

Materiais	100C	90C+10FCC	80C+20FCC	70C+30FCC
CEM I 42,5	455,7	410,1	364,6	319,0
FCC	0,0	45,6	91,1	136,7
Areia 0/2	13,2	11,50	0,0	0,0
Areia 0/4	747,1	745,8	747,7	739,9
Brita 1	358,2	356,8	358,6	360,5
Brita 2	534,3	532,28	533,4	532,9
Água	202,7	202,7	202,7	202,7
SP	4,6	4,6	4,6	4,6

3.4 MISTURA DOS BETÕES

A quantidade total do betão necessário para cada um dos traços a produzir era de 131,4 litros (Quadro 3.1), de modo a garantir a realização de todos os ensaios previstos. Assim foi necessário realizar 12 amassaduras considerando sempre a capacidade da misturadora (195 litros), tendo sido realizadas em 5 dias distintos. Previamente, à realização das misturas foi desenvolvido um cronograma dos ensaios, que permitisse conduzir toda a campanha experimental, após a receção de todos os materiais. O plano de ensaios está definido no Anexo A, no qual se apresenta a calendarização das atividades (Anexo A.1).

Na preparação dos betões utilizou-se uma misturadora de eixo vertical com capacidade máxima de 195 litros, conforme a Figura 3.7.



Figura 3.7 – Misturadora de eixo vertical (marca PROETI).

A amassadura dos betões requereu, primeiramente, a pesagem dos diferentes constituintes do betão. De seguida introduziu-se na misturadora desligada, por ordem decrescente de granulometria (brita 2, brita 1, areia 0/4 e areia 0/2), os agregados. Aciona-se o botão de arranque da misturadora, misturando os agregados durante 30 segundos. Após a mistura dos agregados juntou-se 2/3 da água, o cimento e o catalisador exausto de FCC. Esta ordem de introdução dos constituintes do betão deve-se à função de misturadores e homogeneizadores da pasta que os agregados têm, e à melhoria da aderência entre os mesmos e o cimento depois de humedecidos. Considerou-se o início da contagem do tempo (tempo zero) quando ocorre a mistura da água com o ligante. De referir que este processo decorre durante 2 minutos e que a introdução do cimento e do catalisador exausto de FCC foi executada com o maior cuidado para evitar perdas de material. De seguida, introduziu-se o restante 1/3 de água com o superplastificante e deixou-se a envolver durante 3 minutos. Por fim, seguiu-se um período de repouso (1 minuto), homogeneizou-se o betão com o auxílio de uma pá de pedreiro, garantindo que não há materiais não misturados retidos no bordo da base do tambor, findo o tempo volta-se a ligar a misturadora durante 1 minuto, ao fim do qual o processo de amassadura termina.

Após a realização das amassaduras procedeu-se à realização dos ensaios no estado fresco, discriminados no subcapítulo 3.5. A amostra necessária para realizar o ensaio de abaixamento foi reutilizada para o enchimento dos moldes, enquanto a amostra necessária para a realização do ensaio de massa volúmica e teor de ar não foi reaproveitada.

3.5 ENSAIOS NOS BETÕES NO ESTADO FRESCO

Os ensaios realizados aos betões no seu estado fresco pretendem avaliar a conformidade com os pressupostos iniciais (Quadro 3.11), nomeadamente a consistência desejada, assegurando, assim, que estes respeitam os critérios de aplicabilidade em obra.

Após a realização de cada amassadura dos betões, como apresentado no subcapítulo 3.4 procedeu-se aos ensaios no estado fresco antes da colocação nos moldes.

3.5.1 Ensaio de abaixamento – cone de Abrams

O abaixamento do cone de *Abrams* é um ensaio que permite avaliar, de forma expedita, a consistência do betão produzido. Este parâmetro é medido pelo abaixamento de um volume troncocónico de betão com dimensões padrão relativamente à sua altura inicial. Esse abaixamento neste ensaio foi definido *à priori* em 130 ± 15 mm (Subcapítulo 3.3).

Os procedimentos experimentais para a determinação da consistência, pelo cone de *Abrams*, dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12350 - 2 [66].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio de abaixamento pelo cone de *Abrams* encontram-se indicados no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 – Utensílios utilizados na determinação da consistência pelo cone de *Abrams*, no estado fresco.

Utensílios
- Recipiente do equipamento Vêbê (Figura 3.8.a)
- Molde de metal de forma troncocónica com dimensões padrão segundo a NP EN 12350-2 (2009);
- Funil que permite a acoplação ao topo do molde troncocónico;
- Régua metálica graduada de 300 mm;
-Varão de compactação com extremidades arredondadas segundo a NP EN 12350-2 (2009);
- Pano molhado;
- Pá de pedreiro.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12350 - 2

Na Figura 3.8 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a consistência pelo cone de *Abrams* dos betões preparados e apresentados no Quadro 3.1.

Antes de se iniciar o ensaio, a superfície interna do molde troncocónico e a superfície inferior, em que neste caso o recipiente do equipamento da medição do tempo de vêbê, devem ser limpos com um pano humedecido.

De seguida, colocou-se o molde no centro do recipiente do equipamento vêbê (Figura 3.8 (a)), e introduziu-se o betão em três camadas com o auxílio do funil e de uma pá de pedreiro, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde (Figura 3.8 (b)). Em cada camada procedeu-se à compactação com o varão de compactação, através de 25 pancadas, e procurou-se distribuir cada pancada por toda a secção transversal do molde, sem que o varão atravessa-se as camadas inferiores à que está a ser compactada (Figura 3.8 (c)).

Após a compactação da última camada, regularizou-se a superfície do molde, com o auxílio da colher de pedreiro, e removeu-se o excesso de betão. Por fim retirou-se, cuidadosamente, o molde, através de um movimento na vertical sem transmitir vibrações, num intervalo entre 5 e 10 segundos (Figura 3.8 (d)). Com recurso ao varão de compactação e da régua metálica, mediu-se o abaixamento em milímetros (Figura 3.8 (e)).

O ensaio não será válido quando se obtém um abaixamento deformando, caso se obtenha deve-se recolher outra amostra e repetir o ensaio, de acordo com a norma NP EN 12350 - 2 [66].



Figura 3.8 – Ensaio no estado fresco, ensaio de abaixamento pelo cone de *abrams*. a) Material utilizado; b) Colocação da amassadura no cone; c) Compactação com o auxílio do varão; d) Levantamento do cone; e) Registo do abaixamento.

3.5.2 Massa Volúmica

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão no estado fresco permite caracterizar, ainda que de forma indireta, a trabalhabilidade dos betões, bem como o seu desempenho quando endurecidos [67]. A realização do ensaio da determinação da massa volúmica na campanha experimental teve como principal objetivo, analisar a influência do catalisador exausto de FCC nos betões.

Os procedimentos experimentais para a determinação da massa volúmica dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12350 - 6 [68].

Este ensaio antecede o ensaio de determinação do teor de ar contido nos betões, aproveitando o recipiente e a amostra de betão para o ensaio do teor de ar, descrito no subcapítulo 3.5.3.

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da massa volúmica dos betões encontram-se indicados no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 – Utensílios utilizados na determinação da massa volúmica, no estado fresco.

Utensílios
- Colher de pedreiro;
- Recipiente metálico de forma cilíndrica, com capacidade superior a 8L;
- Agulha vibratória;
- Balança de precisão de $\pm 0,1\%$.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12350 - 6

Na Figura 3.9 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a massa volúmica dos betões apresentados no Quadro 3.1.

A primeira fase do ensaio consistiu na pesagem do recipiente cilíndrico vazio, registando a sua massa como M_{1mvol} . Após a homogeneização do betão, procedeu-se ao enchimento do recipiente, em duas camadas, cada uma com sensivelmente metade da altura do recipiente. Cada camada deve ser cuidadosamente compactada, utilizando uma agulha vibratória, sem esta atravessar a camada subjacente à que está a ser vibrada (Figura 3.9 (a)).

Por fim, nivelou-se a superfície do recipiente, com o auxílio de uma colher de pedreiro, removendo o excesso de betão que se encontrar no exterior do mesmo, pesou-se e registou-se a sua massa como M_{2mvol} . (Figura 3.9 (b-c)).



Figura 3.9 – Ensaio no estado fresco, massa volúmica. a) Enchimento do recipiente; b) Retirar o excesso com a pá de pedreiro; c) Pesagem.

Expressão dos resultados

A massa volúmica do betão no estado fresco, é determinada através da seguinte expressão:

$$D = \frac{M_{2mvol} - M_{1mvol}}{V_{mvol}} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Sendo,

D – massa volúmica do betão no estado fresco (kg/m^3);

M_{1mvol} – massa do recipiente (kg);

M_{2mvol} – massa do recipiente cheio com o betão fresco (kg);

V_{mvol} – volume do recipiente (m^3).

3.5.3 Teor em ar – Método pressiométrico

Por teor de ar entende-se como o volume de ar contido na mistura de betão. O volume de ar introduzido pode resultar de diferentes fatores, tais como a velocidade e o tempo de mistura, a quantidade e tipo de superplastificante utilizado e a relação água/ ligante adotada.

Os procedimentos experimentais para a determinação do teor de ar dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12350 - 7 [69].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação do teor de ar encontram-se indicados no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 – Utensílios utilizados na determinação do teor de ar, no estado fresco.

Utensílios
- Aerómetro;
- Colher de pedreiro;
- Recipiente metálico de forma cilíndrica, com capacidade superior a 8L.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12350 - 7

Na Figura 3.10 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar o teor em ar dos betões apresentados no Quadro 3.1.

Em primeiro lugar verificou-se o estado do equipamento, nomeadamente o aerómetro, garantindo que a bomba de pressão está presa e que as válvulas e tubagens estão em pleno funcionamento.

Após a realização do ensaio da massa volúmica, procedeu-se à realização do ensaio do teor de ar. Em primeira fase, verificou-se se a superfície do recipiente com a amostra de betão está lisa, e os bordos do recipiente limpos de eventuais porções de betão que resultaram da regularização da superfície (Figura 3.10.a), após a realização do ensaio da massa volúmica.

Em seguida, posicionou-se a campânula do aerómetro sobre o recipiente e fechou-se as cavilhas. As válvulas laterais devem estar abertas, e a água é injetada por forma a selar hidricamente o sistema, até sair pela outra válvula em fluxo contínuo. Neste momento as válvulas são fechadas simultaneamente. De seguida, aumentou-se a pressão dentro do recipiente pelo bombeamento da válvula introdutora, até que o ponteiro ultrapassa-se a marca vermelha, regularizando-se depois o ponteiro até à marca de teor de ar 0% (Figura 3.10.b.c.d).

Por fim, acionou-se a válvula de descompressão até à estabilização do ponteiro e regista-se o teor de ar que o equipamento indica expresso em percentagem (%) (Figura 3.10.e).



Figura 3.10 – Ensaio no estado fresco, teor de ar. a) Limpeza dos excessos de betão; b) Posicionamento do aerómetro e fechar as cavilhas; c) Abertura das válvulas; d) Aumento da pressão dentro do recipiente; e) Registo do valor do teor de ar.

3.6 PREPARAÇÃO DOS MOLDES, DESMOLDAGEM E CURA

Antes da realização dos ensaios nos betões no estado endurecido, os mesmos foram preparados, transportados, colocados e compactados, passando por uma série de etapas. Neste sentido, de forma a sistematizar todo o processo, divide-se em:

- **Preparação dos moldes** – como etapa preliminar, tem-se a preparação dos moldes (Quadro 3.17), do qual foram devidamente lubrificadas com óleo descofrante do laboratório de materiais de construção e realizado pelo mesmo, com o intuito de facilitar a limpeza dos moldes, e principalmente de retirar os provetes dos moldes;
- **Amassadura** – após a preparação dos moldes, tem-se a realização da amassadura dos betões, discriminado no subcapítulo 3.4 (Figura 3.11.(a-b));
- **Colocação e compactação** – terminado a etapa da amassadura introduziu-se a mistura nos moldes, previamente lubrificadas com óleo descofrante, e procedeu-se à vibração através da agulha vibratória (Figura 3.11. (c-d)). A colocação do betão nos moldes, foi colocada por 3 camadas, vibrando em cada uma de modo a libertar o máximo possível de ar preso, sem comprometer a homogeneidade da mistura (Figura 3.11.e). Depois dos moldes cheios regularizou-se a superfície livre com o auxílio de uma talocha (Figura 3.11.f).

- **Desmoldagem e cura dos provetes** – ao fim de 24 horas da realização da amassadura dos betões, desmoldou-se os provetes com o auxílio de um compressor (Figura 3.11.g-1), identificou-se (Figura 3.11.g-2) e colocou-se no local de cura destinado, a câmara de cura (Figura 3.11. h).

O Quadro 3.17 apresenta o tipo de moldes utilizados e para que ensaios se destinaram.

Quadro 3.17 – Provetes utilizados em cada ensaio, número de provetes por ensaio, número de provetes por mistura dor betão e tipo de moldes utilizados

Ensaio	Número de provetes por ensaio	Número de provetes por traço de betão	Moldes (mm)
Resistência à compressão/ Velocidade de Propagação de ondas ultrassónicas/ Índice de Esclerómetro	3	18	150x150x150
Absorção de Água por Capilaridade	3	3	∅150x300
Absorção de Água por Imersão	3	3	100x100x100
Retração	2	2	150x150x600
Expansão	2	2	150x150x550



Figura 3.11 – Fases de preparação para o fabrico dos betões e armazenamento. a) Pesagem de todos os constituintes; b) Homogeneização do betão na misturadora; c) Preparação dos moldes com óleo descofrante; d) Colocação do betão nos moldes; e) Vibração do betão em camadas; f) Alisamento da superfície; g-1) Compressor; g-2) Com o auxílio do compressor desmolda-se os provetes; h) Colocação dos provetes na câmara de cura.

3.7 ENSAIOS NO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização dos betões no estado endurecido incluiu a realização dos seguintes ensaios: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas; determinação da resistência mecânica nomeadamente a resistência à compressão; índice de esclerómetro; a absorção de água por capilaridade; absorção de água por imersão; e as variações dimensionais.

Os ensaios no estado endurecido foram realizados ao fim de diferentes tempos de cura, dependendo do tipo de ensaio.

3.7.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

A magnitude da velocidade de propagação para materiais à base de cimento depende de vários fatores, nomeadamente: tipo e dimensão do agregado; teor de humidade; temperatura do betão; comprimento do percurso; dimensões e formato do provete; efeito dos varões de aço; razão água/cimento; adições; grau de compactação; cura e idade do betão; além de características relacionadas com o equipamento de medição e com a precisão do ensaio [70, 71].

Em geral, o ensaio de medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas pode ser utilizado para: medição da uniformidade do betão; deteção e medição aproximada de fendas, vazios e outros defeitos; medição das mudanças ocorridas ao longo do tempo das propriedades do betão; estimativa da resistência; e a medição do módulo de elasticidade dinâmico e estimativa do módulo de elasticidade estático [70]. Na campanha experimental pretendeu-se avaliar a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e relacionar com a resistência mecânica, nomeadamente a resistência à compressão.

Na realização do ensaio da velocidade propagação de ondas ultrassónicas utilizou-se o aparelho “*Tico Proceq Ultrasonic Instrument*” com os transdutores de 150kHz de frequência. O aparelho permite determinar o tempo de transmissão do impulso, em microssegundos, e a velocidade de propagação do mesmo, em metros por segundo. O aparelho está ligado a um osciloscópio para que em cada ensaio para além da leitura da propagação da velocidade da onda ultrassónica, também se adquirisse o sinal elétrico associado à onda. Contudo, o processamento desta informação sai fora do âmbito da presente dissertação, pelo que não será objeto de análise neste documento, mas sim numa análise futura.

Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes cúbicos (Quadro 3.17) cuja preparação e cura se apresenta descrito no subcapítulo 3.6, sendo testados 3 provetes para cada idade – isto é, aos 3, 7, 14, e 28 dias. De referir, não se obteve resultados aos 56 e 90 dias uma vez que o aparelho se avariou durante a campanha experimental.

Os procedimentos experimentais para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12504 - 4 [72].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas encontram-se indicados no Quadro 3.18.

Quadro 3.18 – Utensílios utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas em provetes cúbicos, no estado endurecido.

Utensílios
- Aparelho ultra-sons (TICO);
- Computador com o software “Open Choice”;
- Osciloscópio (Tektronix);
- Balança de precisão de $\pm 0,1\%$;
- Espátula;
- Papel de cozinha;
- Vaselina sólida.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12504 - 4

Na Figura 3.12 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas dos betões apresentados no Quadro 3.1

Antes da preparação dos provetes os equipamentos devem estar montados e ligados, de modo a se realizar imediatamente o ensaio (Figura 3.12 (a)).

Após a ligação dos equipamentos seguiu-se a calibração do aparelho de ultra-sons que consistiu, em assegurar que o tempo decorrido entre as duas extremidades do cilindro de calibração seja igual a $20,1 \pm 1 \mu\text{s}$ (conforme recomendado pelo fabricante do aparelho). A aderência entre os topos do cilindro e os transdutores é conseguida pela massa de contacto, nomeadamente a vaselina sólida (Figura 3.12 (b-c)).

A fase inicial deste ensaio consistiu na preparação dos provetes, isto é na hora e dia de realização do ensaio retiraram-se os provetes necessários da câmara de cura e limpavam-se as suas fases. De seguida pesaram-se e registaram-se os seus valores.

Uma vez calibrado o aparelho prosseguiu-se o ensaio, colocou-se vaselina sólida nos extremos do provete a ensaiar de modo a ser possível uma correta aderência entre os transdutores e o provete e posicionou-se os transdutores nomeadamente o emissor e recetor. Acionou-se o botão do aparelho TICO para emitir um impulso elétrico de frequência ultrassónica 150kHz gerando uma onda que atravessa o provete que é conduzida do transdutor emissor e é captada pelo transdutor recetor, onde é transformado, novamente num impulso elétrico e conduzido de volta ao equipamento que mede diretamente o tempo gasto no percurso (Figura 3.12 (d-e)).

Assim, efetuou-se três leituras para cada provete considerando-se o valor médio da velocidade.

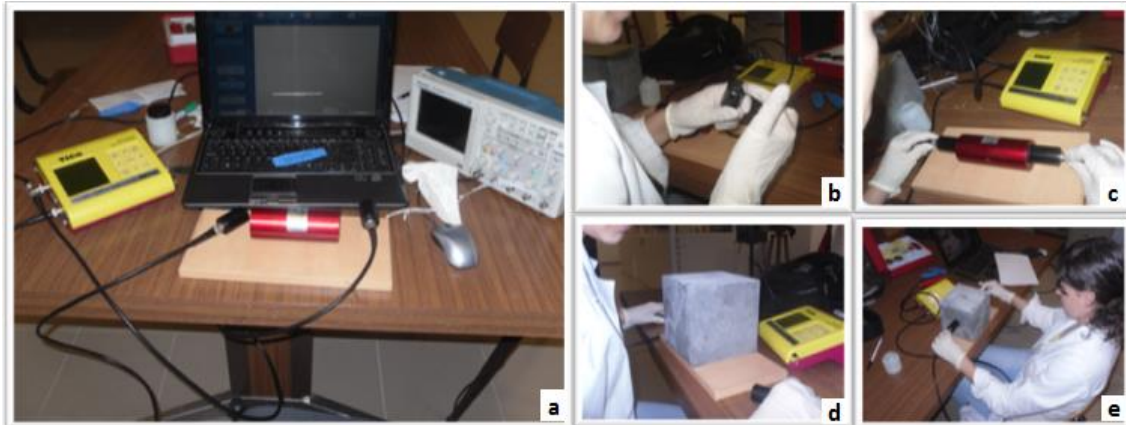


Figura 3.12 - Ensaio no estado endurecido, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. a) Instalação dos equipamentos; b) Aplicação de vaselina nos transdutores; c) Calibração do aparelho; d) Preparação do provete com vaselina; e) Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.

Expressão dos resultados

O valor da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas é obtido através da Eq.3.12.

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Sendo,

v – velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s);

d – distância entre os transdutores (emissor e recetor) (m);

t – tempo decorrido no percurso da onda (s).

3.7.2 Resistência à compressão

O ensaio de medição da resistência à compressão tem como finalidade a determinação da capacidade resistente dos diversos betões produzidos, quando sujeitos a uma tensão uniforme de compressão. Para tal, submetem-se os provetes até à rotura e regista-se a carga última a que resistem.

O equipamento utilizado para a determinação do valor de resistência à compressão foi a prensa *FORM+TEST SEIDNER*, de capacidade máxima de 3000kN e a velocidade imposta de 8001,2 N/s.

Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes cúbicos de 150 mm (Quadro 3.17) de aresta cuja preparação e cura se apresenta descrita no subcapítulo 3.6, sendo testados 3 provetes para cada idade – isto é, aos 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias - considerando-se o valor médio da resistência à compressão.

Os procedimentos experimentais para a determinação da resistência à compressão dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12390 - 1, a norma NP EN 12390 - 2 e a norma NP EN 12390 - 3 [73, 74, 75].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da resistência à compressão encontram-se indicados no Quadro 3.19.

Quadro 3.19 – Utensílios utilizados na determinação da resistência à compressão em provetes cúbicos, no estado endurecido.

Utensílios
- Balança de precisão de $\pm 0,1\%$;
- Prensa hidráulica de 4 colunas, de velocidade controlável;
- Pano de limpeza;
- Paquímetro.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12390 - 3

Na Figura 3.13 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a resistência à compressão dos betões apresentados no Quadro 3.1.

Os provetes que se destinaram à realização deste ensaio foram os provetes utilizados no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (Subcapítulo 3.7.1). Desta forma, previamente à realização deste ensaio, a máquina de ensaio deve estar limpa com recurso a um pincel e ligada. Após a realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, com o auxílio do paquímetro regista-se a dimensão dos provetes em duas direções (Figura 3.13 (a)).

Assim, após a limpeza do equipamento, colocou-se o provete na prensa tendo o cuidado de o centrar relativamente à plataforma inferior da prensa, de forma a evitar qualquer erro, e evitando colocar a face de acabamento do provete em contacto com os pratos do equipamento (Figura 3.13 (b)). De seguida, fechou-se a porta de segurança, aplicou-se a carga e a velocidade de 8001,2 N/s. Após a rotura do provete (Figura 3.13 (c)) registou-se a carga máxima (F) em Newton e avaliou-se a configuração de rotura dos provetes, de modo a avaliar se esta é satisfatória ou não satisfatória, de acordo com os critérios estipulados pela norma NP EN 12390 - 3 [75].



Figura 3.13 – Ensaio da resistência à compressão no estado endurecido. a) Medição das dimensões do provete com o auxílio de um paquímetro; b) Colocação do provete na prensa; c) Rotura do provete.

Expressão dos resultados

A resistência à compressão é dada pelo quociente entre a carga máxima e a área da secção transversal onde é aplicada a Eq.3.13.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Sendo,

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

F – força de rotura à compressão (N);

A – área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²), utilizando as medições efetuadas com o auxílio do paquímetro.

3.7.3 Índice de esclerómetro

O ensaio do índice de esclerómetro consiste na medição da dureza superficial do betão (índice esclerométrico), com a qual se estabelece uma relação com a resistência à compressão do betão. Este método é um dos testes não destrutivos mais utilizados para estimar *in situ* a resistência à compressão do betão, no entanto pode ser utilizado também em laboratório [70].

Em geral aplica-se para: inferir a uniformidade da qualidade do betão; estimar aproximadamente a resistência mecânica e avaliar a qualidade do revestimento [76]. Na presente campanha experimental utilizou-se o ensaio do índice de esclerómetro, para comparar a resistência à compressão estimada por o mesmo com a resistência à compressão determinada pelo método destrutivo e ainda medir a dureza superficial dos 4 traços de betão em estudo.

O equipamento de medição da dureza superficial trata-se de um martelo de aço, ligado a uma mola em tensão. Quando a mola é largada (através do auxílio de força, pressionando o aparelho à superfície de betão), embate num percutor em contato com a superfície do betão. A distância entre o percutor e o martelo após a repercussão é medida numa escala linear, chamado o índice esclerométrico e aparece no visor, uma vez que o aparelho utilizado foi o Esclerómetro de Schmidt digital do tipo ND. Através desse valor (índice esclerométrico), pode-se estimar a resistência do betão, valor que aumenta com a sua resistência [76].

No entanto o índice esclerométrico pode ser afetado por vários fatores, nomeadamente: irregularidades superficiais; idade do material testado; teor de humidade; tipo de cimento; carbonatação; tipo de agregado; movimento da peça de betão a ensaiar; e além de características relacionadas com o equipamento de medição e com a precisão do ensaio [70, 76]. De referir que devido aos fatores mencionados, e mesmo para provetes de ensaio realizados em laboratório, curados e ensaiados em condições idênticas é pouco provável que a resistência possa ser estimada com um erro inferior a $\pm 15\%$, em betões até três meses de

idade (15 a 30%) [70, 76]. Por este motivo e apesar de um ensaio de muito fácil execução, económico e um método não destrutivo, este ensaio tem merecido pouca atenção por parte de investigadores.

O ensaio pode ser realizado com o esclerómetro orientado horizontalmente ou verticalmente, para cima ou para baixo, ou em qualquer ângulo intermédio. Independentemente da direção de ensaio, esta informação deve ser colocada no aparelho, se o aparelho for um aparelho digital.

Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes cúbicos (Quadro 3.17) cuja preparação e cura se apresenta descrita no subcapítulo 3.6, sendo testado 1 provete para cada idade – isto é, aos 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

Os procedimentos experimentais para a determinação do índice de esclerómetro dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a norma NP EN 12504 - 2 [77].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação do índice esclerométrico encontram-se indicados no Quadro 3.20.

Quadro 3.20 – Utensílios utilizados na determinação do índice de esclerómetro em provetes cúbicos, no estado endurecido.

Utensílios
- Esclerómetro de Schmidt (DIGI SCHMIDT 2000, do tipo ND)
- Aparelho digital TICO;
- Prensa hidráulica de 4 colunas, de velocidade controlável;
- Régua;
- Bigorna de aço de 16 ± 1 kg e $\varnothing 150$ mm.

Procedimento de ensaio como descrito na norma NP EN 12504 - 2

Na Figura 3.14 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar o índice esclerométrico dos betões apresentados no Quadro 3.1.

A fase inicial deste ensaio consistiu na preparação dos provetes, conforme a norma. Assim, em uma das superfícies do provete e com o auxílio da régua traçaram-se linhas afastadas de 2,5 cm das extremidades. Dentro do quadrado desenhado traçou-se ainda, uma grelha com afastamento de aproximadamente 3,33 cm entre linhas (Figura 3.14 (a)). O resultado final, consiste em 16 cruzamentos entre linhas, onde serão realizadas 16 leituras.

Após a ligação dos equipamentos seguiu-se a calibração do aparelho do índice de esclerómetro que consistiu em, efetuar 5 ensaios utilizando a bigorna de aço. As leituras efetuadas utilizando a bigorna de aço deveram estar entre os valores definidos conforme o fabricante, nomeadamente o aparelho utilizado foi um aparelho do tipo ND, neste sentido as leituras deveram estar entre 81 ± 2 (Figura 3.14 (b)).

Uma vez calibrado o aparelho, colocou-se o provete na prensa *FORM+TEST SEIDNER*. De seguida ligou-se a prensa e introduziu-se uma velocidade de 1000 N/s de modo a assegurar a imobilização do provete (Figura 3.14 (c)). Após a imobilização do provete, deu-se início ao ensaio, colocando o esclerómetro na direção horizontal, aplicou-se uma força contra o provete (Figura 3.14 (d-e)), e retiraram-se as leituras dos índices esclerométricos e da resistência à compressão que apareciam no visor do aparelho, dos respetivos pontos de embate.

Conforme a norma se mais de 20% das leituras diferirem da mediana em mais de 30% todo o conjunto de leituras deve ser eliminado. Por fim o resultado final do índice esclerométrico (dureza superficial) e da resistência à compressão estimada, para as idades testadas dos 4 traços de betão, obteve-se pela média aritmética dos valores obtidos.



Figura 3.14 – Ensaio no estado endurecido, índice de esclerómetro. a) Traçado no provete dos pontos de embate; b) Calibração do esclerómetro como auxílio da bigorna de aço; c) Colocação do provete na prensa; d) Colocação do esclerómetro na horizontal; e) aplicação da força.

3.7.4 Absorção de água por capilaridade

A realização do ensaio de absorção de água por capilaridade consiste na avaliação da estrutura porosa do material, dado que, quanto mais poroso for o material, mais fácil será a percolação da água e migração de outros compostos químicos no seu interior, facilitando a ocorrência de reações químicas de degradação que contribui para uma diminuição da durabilidade [9]. A execução do ensaio de absorção de água por capilaridade permite avaliar de que forma a adição de catalisador exausto de FCC influencia na absorção capilar dos betões.

Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes cilíndricos de 300 mm de altura e diâmetro de 150 mm (Quadro 3.17), cuja preparação e cura se apresenta descrita na secção 3.6. Durante o ensaio, foram testados 3 provetes aos 28 dias de idade de cura, considerando-se o valor médio da absorção de água por capilaridade.

Os procedimentos experimentais para a determinação da absorção de água por capilaridade dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a especificação do LNEC E 393 [78].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio encontram-se indicados no Quadro 3.21.

Quadro 3.21 – Utensílios utilizados na determinação absorção de água por capilaridade em provetes cúbicos, no estado endurecido.

Utensílios
- Balança de precisão de $\pm 0,1\%$;
- Estufa ventilada a 40 ± 5 °C;
- Pano de limpeza;
- Régua;
- Suportes de plástico;
- Bacia de plástico;
- Apoios de plástico.

Procedimento de ensaio como descrito na especificação do LNEC E 393

Na Figura 3.15 apresenta-se a sequência da preparação dos provetes para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Como descrito anteriormente os provetes utilizados neste ensaio foram provetes cilíndricos de 300 mm de altura e diâmetro de 150 mm. Após a desmoldagem colocaram-se os provetes na câmara de cura durante 14 dias (Figura 3.15 (a)). Finalizado esse período colocaram-se os provetes numa estufa à temperatura de 40 ± 5 °C, durante 14 dias (Figura 3.15 (b)). De seguida, findos os 14 dias em estufa, retiraram-se os provetes e deixaram-se arrefecer, pesaram-se e registou-se a massa dos provetes de ensaio secos como $M_{0\text{abscap}}$.

Posteriormente, na bacia de plástico colocaram-se os provetes, de modo a que a base correspondente à fase irregular do betão, ficasse suportada nos apoios de plástico (Figura 3.15 (c-d)). De seguida, introduziu-se a água na bacia até que o seu nível atingisse 5 ± 1 mm acima da face inferior dos provetes. Este valor foi mantido constante durante todo o tempo de ensaio (Figura 3.15 (e-f)). Por fim, a norma exige que se tapem os provetes com uma campânula, mas na ausência desta colocou-se dentro de uma sala fechada de modo a evitar a evaporação da água e mantendo as condições de humidade relativa de 65 ± 5 %. Este processo não corresponde ao recomendado na especificação do LNEC E393, mas foi utilizado em todos os provetes, o que permite a comparação dos resultados entre os diferentes betões produzidos.



Figura 3.15 – Preparação dos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Provetes dentro do tanque de água; b) Colocação dos provetes na estufa; c) Preparação da bacia de plástico; d) Colocação do suporte dentro da bacia; e) Introdução de água dentro da bacia; f) Verificação da altura de água.

A Figura 3.16 apresenta, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a absorção de água por capilaridade dos betões apresentados no Quadro 3.1.

As pesagens dos provetes e as medições da ascensão de água foram realizadas ao fim de 10 min, 1h, 3h, 4h, 6h, 24h e 72h desde a colocação dos provetes na água (Figura 3.16 (a)). Para efetuar a pesagem, retiraram-se os provetes e colocaram-se sobre uma base não absorvente durante 60 ± 5 segundos, de modo a permitir que a água esorra (Figura 3.16 (b)). De seguida pesaram-se os provetes, registando como $M_{iabs\text{cap}}$. Em cada um dos provetes mediu-se ainda, a altura de água absorvida por capilaridade, observando a variação na tonalidade da superficial do provete em quatro geratrizes do provete (Figura 3.16 (c)).

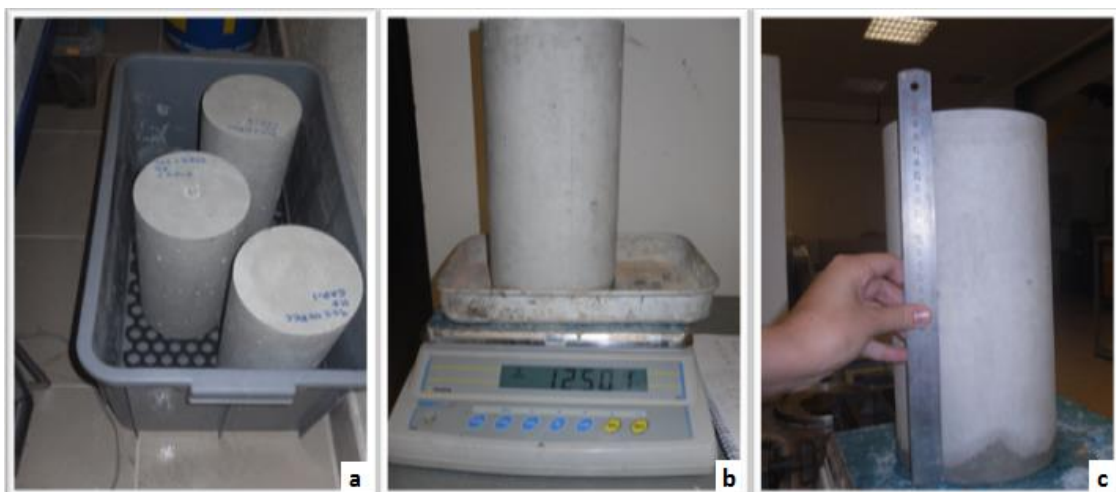


Figura 3.16 – Ensaio no estado endurecido, absorção de água por capilaridade. a) Provetes dentro da bacia de plástico; b) Pesagem dos provetes; c) Medição da ascensão de água pelas geratrizes.

Expressão dos resultados

A expressão que traduz a absorção de água por ascensão capilar é a seguinte:

$$A_{ci} = \frac{M_{i\text{abscap}} - M_{0\text{abscap}}}{A_p} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Sendo,

A_{ci} – absorção de água por ascensão capilar no instante i (g/mm^2);

$M_{i\text{anscap}}$ – massa do provete após i horas em contacto com a lâmina de água (g);

$M_{0\text{abscap}}$ – massa inicial do provete de ensaio seco em estufa (g);

A_p – área da superfície do provete em contato com a água ($17\,671\text{mm}^2$).

Por fim, calculou-se o coeficiente de absorção capilar (K_c) como sendo o declive da reta que melhor se ajusta à curva de absorção capilar (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo ($t^{0.5}$), expresso em minutos. O coeficiente de absorção capilar foi determinado para as primeiras 6 horas (considerando os valores obtidos da absorção capilar às 0, 3 e 6 horas de ensaio) e ao fim das 72 horas (considerando todos os valores obtidos da absorção capilar às 0, 3 e 6, 24 e 72 horas de ensaio).

3.7.5 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão permite caracterizar a porosidade aberta do betão. Como tal, este ensaio permite a quantificação do volume de vazios acessíveis na massa de betão produzido, pois a água não consegue preencher todos os poros da matriz cimentícia do betão.

Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes cúbicos de $100 \times 100 \times 100$ mm (Quadro 3.17) cuja preparação e cura se apresenta descrita no subcapítulo 3.6. Durante o ensaio, foram testados 3 provetes aos 28 dias de cura dos betões, considerando-se o valor médio da absorção de água por imersão.

Os procedimentos experimentais para a determinação da absorção de água por imersão dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a especificação do LNEC E 394 [79].

Os utensílios necessários para a realização do ensaio da determinação da absorção de água por imersão encontram-se indicados no Quadro 3.22.

Quadro 3.22 – Utensílios utilizados na determinação da absorção de água por imersão em provetes cúbicos, no estado endurecido.

Utensílios
- Pano de limpeza;
- Tanque de água;
- Balança de precisão de $\pm 0,1\%$;
- Balança hidrostática;
- Estufa ventilada a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Procedimento de ensaio como descrito na especificação do LNEC E 394

Na Figura 3.17 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar absorção de água por imersão dos betões apresentados no Quadro 3.1.

Em primeiro lugar, após a desmoldagem dos provetes, os mesmos foram colocados no interior do tanque com água (câmara de cura), até atingir 28 dias de cura. Após esse período, verificaram-se se os provetes alcançaram massa constante. Nomeadamente, no 28º dia de cura pesaram-se os provetes e no dia seguinte (29º dia de cura) pesaram-se novamente sendo os valores iguais. Como a massa já era constante, retiraram-se os provetes de dentro de água, limpam-se as superfícies com um pano húmido e pesaram-se os provetes registando como $M_{1\text{absim}}$ (Figura 3.17 (a-b)).

De seguida pesaram-se os provetes dentro de água com o auxílio de um balde, registando como $M_{2\text{absim}}$, obtendo a massa hidrostática dos provetes após saturação (Figura 3.17 (c)).

Por fim, colocaram-se os provetes em estufa à temperatura de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, até obter massa constante. Para se considerar massa constante, a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas pelo menos 24 horas, deve ser inferior a 0,1% da média das duas leituras, obtendo assim a massa do provete seco, registando como $M_{3\text{absim}}$ (Figura 3.17 (d)).

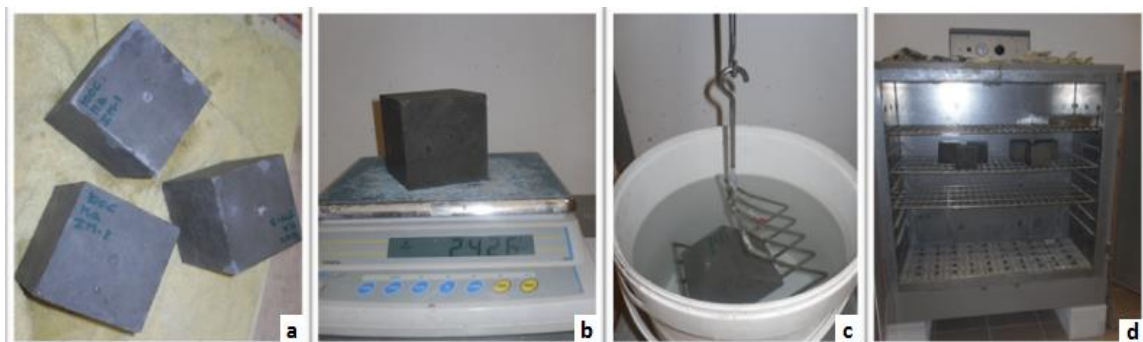


Figura 3.17 – Ensaio no estado endurecido, absorção de água por imersão. a) Provetes retirados do tanque de água; b) Pesagem dos provetes; c) Pesagem hidrostática; d) Colocação dos provetes em estufa.

Expressão dos resultados

A expressão que traduz a absorção de água por imersão é a seguinte:

$$\%A = \frac{M_{1\text{absim}} - M_{3\text{absim}}}{M_{1\text{absim}} - M_{2\text{absim}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Sendo,

$M_{1\text{absim}}$ – massa do provete saturado no ar (g);

$M_{2\text{absim}}$ – massa hidrostática do provete após saturação (g);

$M_{3\text{absim}}$ – massa do provete seco (g).

3.7.6 Variações dimensionais

As variações dimensionais dos materiais à base de cimento são avaliadas tipicamente por dois métodos distintos que se diferenciam essencialmente pelas condições de cura dos provetes:

- Na ausência de tensões aplicadas e de variações de temperatura;
- Aplicando uma tensão (provocada pela água da cura dos provetes).

Na avaliação da variação dimensional na ausência de tensões aplicada verifica-se tipicamente a retração que consiste num decréscimo de volume ao longo do tempo de uma peça de betão. Sendo a causa principal a alteração do teor em água que ocorre por evaporação, e em alguns casos, por auto-dessecação [80]. Existem vários tipos de retração que podem ocorrer isoladamente ou em simultâneo nomeadamente: a retração plástica, por secagem, autogénea, térmica e por carbonatação.

A retração plástica ocorre nas primeiras horas, com o betão no estado fresco, e ocorre, sobretudo em casos onde a evaporação superficial é rápida dependendo de fenómenos de perda de água por exsudação, evaporação à superfície e absorção de água pelos agregados. A retração autogénea é uma consequência da retração química, e resulta das variações de volume produzidas pela progressão das reações de hidratação de cimento, independentemente das condições ambientais. A retração por secagem pode ser definida como a deformação dependente no tempo, devida à perda de água em condições de temperatura e humidade relativa constantes, que consiste na evaporação de água ao longo do tempo, diminuindo a quantidade de água na microestrutura do betão. A retração por carbonatação é causada pela reação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) do cimento hidratado com o dióxido de carbono (CO_2), na presença de humidade, progredindo muito lentamente. A retração térmica ocorre devido a dois fatores: à libertação do calor das reações exotérmicas de hidratação do cimento e a variações da temperatura [80, 81, 82, 83].

Na presente dissertação avaliou-se a retração por secagem. De referir que a retração autógena na avaliação da retração por secagem poderá estar a ocorrer, no entanto a retração autógena

após o endurecimento do betão e que termina no final do processo de hidratação tem pouca ou quase nenhuma influência [83].

Enquanto a avaliação da variação dimensional dos materiais à base de cimento, cuja cura é feita imersa em água, verifica-se tipicamente a expansão que consiste no aumento progressivo da deformação instantânea de uma peça de betão ao longo do tempo. Este fenómeno ocorre devido geralmente: à redução de tensões capilares; as forças expansivas resultantes da absorção de água nas partículas de gel da pasta que forcem o seu afastamento; à diminuição da tensão superficial dos produtos de hidratação conduzindo a uma pequena expansão adicional [80, 84].

As variações dimensionais são condicionadas, essencialmente, pela relação água/ligante, composição do betão, à dosagem de cimento, ao ambiente de exposição do betão e pela forma da peça de betão. A expansão é influenciada também pelo nível de tensão aplicado e a resistência do betão [84].

Na realização dos ensaios da avaliação das variações dimensionais, nomeadamente na ausência de tensões aplicadas e de variações de temperatura, e aplicando uma tensão (provocada pela água da cura dos provetes), utilizaram-se, respetivamente, provetes prismáticos de dimensões 150x150x600 mm e de 150x150x550 mm (Quadro 3.17). Durante o ensaio, foram testados 2 provetes, considerando-se o valor médio.

Os procedimentos experimentais para a determinação das variações dimensionais dos diferentes betões em estudo (Quadro 3.1), foram realizados de acordo com a especificação do LNEC E 398 [85].

Os utensílios necessários para a realização dos ensaios da variação dimensional encontram-se indicados no Quadro 3.23.

Quadro 3.23 – Utensílios utilizados na determinação das variações dimensionais em provetes prismáticos, no estado endurecido.

Utensílios
- Aparelho de medição de extensões, deflectómetro comparador da marca F.F. Metzger & Son de 30 cm, precisão de 1 μ m (Figura 3.18 (a));
- Bacias de plástico;
- Massa-cola;
- Pastilhas metálicas.

Procedimento de ensaio como descrito na especificação do LNEC E 398

Na Figura 3.18 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a as variações dimensionais em estudo dos betões apresentados no Quadro 3.1.

Após a desmoldagem dos provetes (de acordo o descrito no subcapítulo 3.6) ao fim de 24 horas, colocaram-se duas pastilhas metálicas numa das faces retangulares laterais dos

provetes (Figura 3.18 (b)) para a determinação tanto da retração como da expansão. Durante a colocação das pastilhas, teve-se o cuidado de as distanciar entre si de 30 cm, e de as colocar no centro da aresta do provete. De forma a imobilizar e acondicionar as pastilhas, aplicou-se uma massa-cola no contorno das pastilhas metálicas.

As medições das extensões dos provetes foram efetuadas de acordo com a Especificação do LNEC E 398 [87]. A primeira leitura (dia 0) não foi efetuada imediatamente a seguir à colagem das pastilhas, de modo a garantir a secagem da massa-cola, tendo sido efetuada cerca de 6 horas após a colocação da massa-cola. Antes da realização de cada uma das leituras, procedeu-se à calibração do equipamento (Figura 3.18 (c)). O valor da distância inicial ente o centro das pastilhas metálicas designou-se de d_i (30cm) (Figura 3.18 (d-e)).

▪ **Avaliação da variação dimensional sem aplicação de tensões**

Após o registo da distância inicial entre o centro das pastilhas, os provetes foram colocados numa sala, onde permaneceram às condições de temperatura de 20 ± 2 °C e 50 ± 5 % de humidade relativa.

A avaliação dimensional consiste na medição da distância entre os centros das pastilhas considerando-se o primeiro registo como a leitura realizada 6 horas após a colocação das pastilhas no provete e sendo, depois, efectuadas leituras depois de passarem 1, 2, 3, 6, 7, 14, 28, 56, 63, 69, e 90 dias depois do primeiro registo. As distâncias entre os centros das pastilhas foram efetuadas com auxílio do aparelho de medições de extensões.

▪ **Avaliação da variação dimensional com aplicação de tensão permanente**

Após o registo da distância inicial entre o centro das pastilhas, colocaram-se os provetes dentro das bacias de plástico sobre apoios e introduziu-se água garantindo a imersão dos provetes, de modo a garantir que todas as faces estão em contacto com a água.

A avaliação dimensional consiste na medição da distância entre os centros das pastilhas considerando-se o primeiro registo como a leitura realizada 6 horas após a colocação das pastilhas no provete e sendo, depois, efectuadas leituras depois de passarem 1, 2, 3, 6, 7, 14, 28, 56, 63, 69, e 90 dias depois do primeiro registo. As distâncias entre os centros das pastilhas foram efetuadas com auxílio do aparelho de medições de extensões.

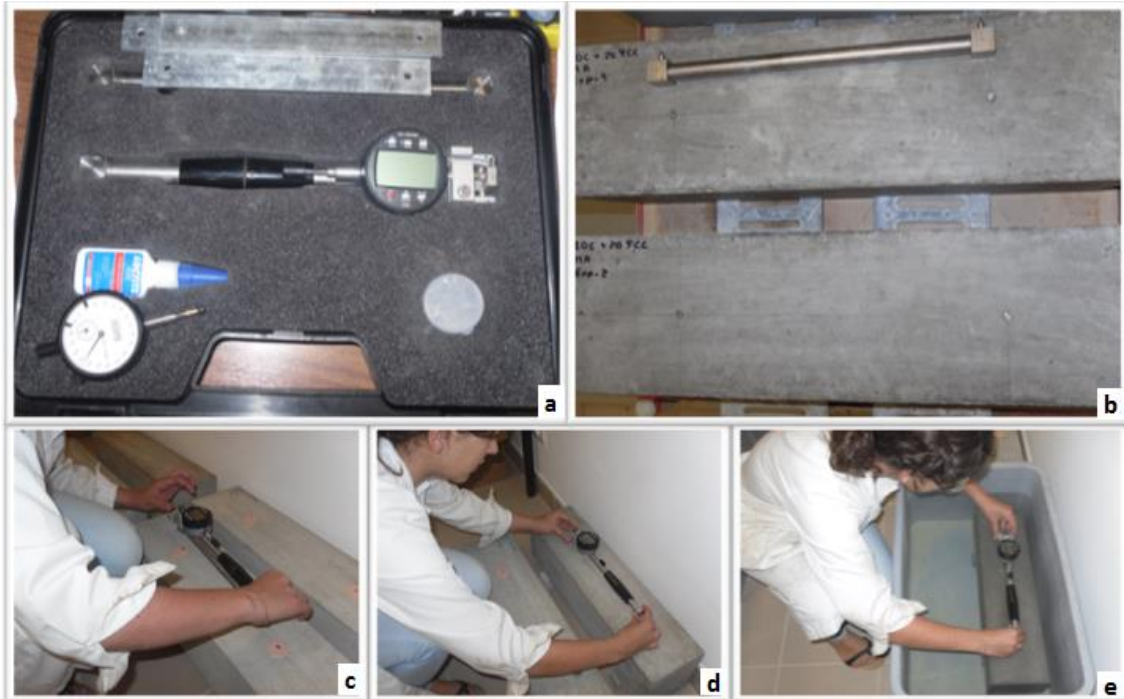


Figura 3.18 – Ensaio no estado endurecido, nomeadamente na ausência de tensões aplicadas e de variações de temperatura, e quando aplicado uma tensão (provocada pela água da cura dos provetes). a) Equipamento utilizado; b) Colocação das pastilhas metálicas; c) Calibração do equipamento; d) Posicionamento do equipamento sobre as pastilhas no provete de retração; e) Posicionamento do equipamento sobre as pastilhas no provete de expansão.

Expressão dos resultados

Os valores da retração e da extensão obtidos com os procedimentos experimentais descritos foram obtidos recorrendo à seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Sendo,

ε – valor da extensão (m/m);

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

d_f – distância medida entre as pastilhas metálicas no decorrer do ensaio (mm) até 90 dias depois da leitura do valor d_i .

APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios desenvolvidos durante a campanha experimental, e que foram descritos no capítulo anterior (capítulo 3). Os resultados apresentam-se sob forma de representações gráficas e quadros, concebidos de modo a que as suas apresentações sejam coerentes entre si, com o intuito de verificar o efeito de diferentes proporções de catalisador exausto de FCC incorporado no betão nas suas propriedades. Adicionalmente pretende-se avaliar, a viabilidade de utilização, do resíduo de FCC como adição de Tipo II na produção de betões.

Inicialmente apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados (Subcapítulo 4.2). Estes resultados de caracterização dos agregados finos e grossos, bem como as propriedades do cimento e do catalisador exausto de FCC (obtidos em trabalhos anteriores [38, 39, 58]) foram utilizados na determinação da composição dos betões produzidos.

Seguidamente, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios dos betões no estado fresco (Subcapítulo 4.3). Estes, além de poderem permitir avaliar a conformidade dos betões com as exigências normativas, podem permitir em algumas situações uma estimativa do desempenho real do betão no estado endurecido através da análise de determinados parâmetros do estado fresco, no entanto na presente dissertação a exploração destas relações não se incluem no âmbito da mesma.

Por fim, apresentam-se os resultados alcançados nos ensaios ao betão no estado endurecido (Subcapítulo 4.4), permitindo avaliar o efeito das diferentes taxas de substituição parcial, do cimento por catalisador exausto de FCC utilizadas, nas propriedades do betão. Adicionalmente avalia-se o enquadramento normativo dos betões produzidos e ainda o catalisador exausto de FCC da refinaria da Petrolgal de Sines (Subcapítulo 4.5).

Como forma de sistematização, a análise de resultados será realizada individualmente para cada propriedade avaliada comparando os resultados obtidos nos betões com incorporação de catalisador exausto de FCC com o respetivo betão de referência (100C) e, posteriormente, será feita uma análise crítica à luz de resultados obtidos por outros investigadores que desenvolveram trabalhos similares, sempre que possível.

O registo integral dos resultados obtidos para cada ensaio da campanha experimental, referentes a cada traço de betão é apresentado no Anexo F, e os resultados obtidos na caracterização dos agregados é apresentado no Anexo E.

4.2 ENSAIOS AOS AGREGADOS

A campanha experimental, incluiu a caracterização dos agregados utilizados, para determinar a composição dos betões (Subcapítulo 4.2.1 e 4.2.2), e de forma a compreender de que modo as suas propriedades condicionam o desempenho dos betões produzidos, nomeadamente o conhecimento de requisitos geométricos e físicos dos agregados.

Assim, neste subcapítulo, apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios de análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água, baridade e volume de vazios e índice de forma, a que os agregados foram submetidos. A descrição das metodologias de ensaio foi apresentada no subcapítulo 3.2.3.

Os resultados obtidos nos ensaios aos agregados são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados de três amostras de cada agregado.

4.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi determinada de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 933 - 1 (subcapítulo 3.2.3.). O ensaio de análise granulométrica do agregado disponibiliza a informação sobre a curva granulométrica, a máxima dimensão do agregado, o módulo de finura e a percentagem de finos dos agregados.

A relevância deste ensaio na campanha experimental está discriminado no subcapítulo 3.3, aquando da determinação das quantidades de agregados no betão pelo método de Faury, de forma a maximizar a compacidade dos betões produzidos.

Os resultados da distribuição de tamanho das partículas estão apresentados em conjunto - areia 0/2, areia 0/4, brita 1 e brita 2, no Quadro 4.1 e representado na Figura 4.1.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA
CAMPANHA EXPERIMENTAL

Quadro 4.1 – Análise granulométrica dos agregados finos e grossos, peneiros utilizados de acordo com a NP EN 933 - 2, percentagem do material retido no fundo (P), e o módulo de finura (MF).

Peneiro (mm)	% Acumulada do material retido em cada peneiro			
	Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
31,5	100	100	100	100
22,4	100	100	100	100
20,0	100	100	100	98,012
16,0	100	100	100	72,081
14,0	100	100	95,100	43,443
12,5	100	100	92,000	22,261
11,2	100	100	88,423	14,100
10,0	100	100	75,885	9,415
8,0	100	100	50,590	5,821
6,3	100	99,279	28,350	2,800
5,6	100	97,922	16,832	2,000
4,0	100	93,353	3,541	1,796
2,0	99,991	77,967	1,062	1,508
1,0	99,022	49,480	0,354	1,391
0,5	80,458	22,591	0,202	1,242
0,25	25,375	8,127	0,139	1,007
0,125	0,813	1,647	0,064	0,817
0,063	0,166	1,122	0,040	0,803
%f	0,24	1,47	0,10	1,15
MF	1,943	3,468	6,440	7,143

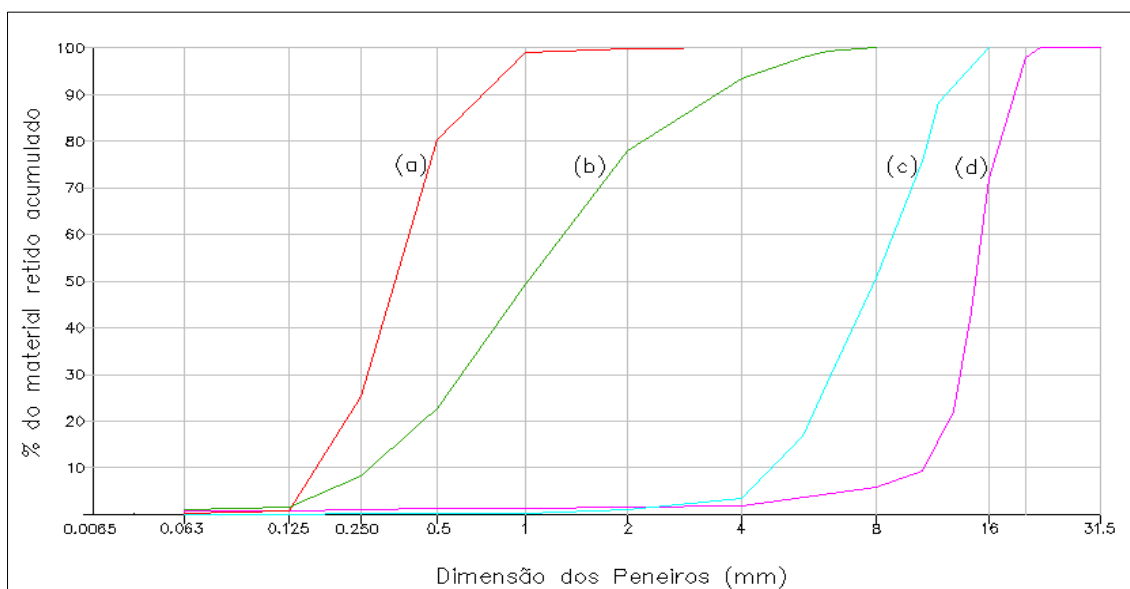


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados. (a) – Curva granulométrica da areia 0/2; (b) – Curva granulométrica da areia 0/4; (c) – Curva granulométrica da brita 1; (d) – Curva granulométrica da brita 2.

Da análise do Quadro 4.1, e segundo a norma NP EN 12620 [30] os agregados grossos e finos em termos de requisitos gerais da granulometria devem estar definidos por uma categoria (Quadro 2 da norma NP EN 12620 [30]). Nomeadamente, o agregado grosso Brita 1 enquadra-se na categoria $G_C85/20$ e a Brita 2 enquadra-se na categoria, $G_C85/20$. Enquanto o agregado fino Areia 0/4 enquadra-se na categoria G_F85 e a Areia 0/2 enquadra-se na categoria G_F85 .

Relativamente há percentagem de finos que passa no peneiro 0,063 mm, segundo a norma NP EN 12620 [30] o valor também deve ser definido pela correspondente categoria para os valores máximos do teor de finos. De acordo com a norma NP EN 12620 [30], a categoria dos agregados é atribuída pela percentagem de materiais que passa o peneiro de abertura de malha 0,063 mm (Quadro 11 da norma NP EN 12620 [30]). Assim, os agregados grossos, tanto a Brita 1 e como Brita 2, correspondem à categoria $f_{1,5}$, uma vez que a percentagem de material que passa no peneiro de abertura de malha de 0,063 mm é inferior a 1,5%. Os agregados finos, tanto a Areia 0/4 como a Areia 0/2, correspondem à categoria f_3 , uma vez que a percentagem de material que passa no peneiro de abertura de malha de 0,063 mm é inferior a 3%.

4.2.2 Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica e a absorção de água foram determinadas de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 1097- 6 (subcapítulo 3.2.3.), e que especifica procedimentos distintos para agregados finos e agregados grossos.

O Quadro 4.2 apresenta os resultados da massa volúmica impermeável (ρ_a), massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}), a massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (ρ_{ssd}), e a absorção de água registada após 24h de imersão (WA_{24}).

Quadro 4.2 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos e grossos obtidos de acordo com a norma NP EN 1097-6.

Agregados		ρ_a (kg/m ³)	ρ_{rd} (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	WA_{24} (%)
Agregado Fino	Areia 0/2	2646,5	2616,4	2616,3	0,434
	Areia 0/4	2613,5	2615,7	2614,9	0,030
Agregado Grosso	Brita 1	2696,0	2618,2	2647,0	1,100
	Brita 2	2713,0	2632,0	2661,8	1,135

ρ_a - massa volúmica impermeável; ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa; ρ_{ssd} - massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca; WA_{24} - absorção de água registada após 24h de imersão.

A determinação dos valores das massas volúmicas (Kg/m³) foram necessários para a determinação da dosagem dos agregados, em massa, a incorporar no betão, uma vez que através do método de Faury obtém-se a quantidade dos agregados a incorporar no betão em volume (Anexo D.1). Da análise dos resultados verifica-se que os agregados possuem valores de absorção de água (WA_{24}) inferiores a 2%.

4.2.3 Baridade e volume de vazios

A baridade e o volume de vazios foram determinados de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 1097- 3 (subcapítulo 3.2.3.).

Os resultados obtidos nestes ensaios estão apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Baridade (ρ_b) e percentagem de volume de vazios (%v) dos agregados finos e grossos obtidos de acordo com a norma NP EN 1097 - 3.

Agregados		ρ_b (kg/m ³)	%v
Agregado Fino	Areia 0/2	1500	42,7
	Areia 0/4	1530	41,5
Agregado Grosso	Brita 1	1400	46,5
	Brita 2	1379	47,6

Dos valores apresentados no Quadro 4.3, constata-se que a areia 0/4 possui o resultado mais elevado de baridade, seguido da areia 0/2, da brita 1 e finalmente, da brita 2. De referir que a baridade depende da forma das partículas do agregado, do arranjo das partículas no recipiente e do grau de compactação.

Relativamente ao volume de vazios, conforme o Quadro 4.3 os agregados finos são os menos porosos.

Face ao exposto verifica-se que os agregados da campanha experimental são agregados densos (normal) [29], uma vez que as areias têm uma baridade entre 1200 a 1600 Kg/m³ e as britas entre 1300 a 1500 Kg/m³ [29].

4.2.4 Índice de forma

O índice de forma foi determinado de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 933 - 3 (subcapítulo 3.2.3.). Dado que a norma é aplicável unicamente às frações granulométricas compreendidas entre 4 e 63 mm, apenas se determinou o índice de forma para os agregados grossos, nomeadamente a Brita 1 e a Brita 2. No Quadro 4.4 apresenta-se o valor do índice de forma para a Brita 1 e Brita 2.

Quadro 4.4 – Índice de Forma (SI) em percentagem do agregado grosso de acordo com a norma NP EN 933 – 4.

Agregados		SI (%)
Agregado grosso	Brita 1	16%
	Brita 2	19%

Dos valores apresentados no Quadro 4.4, constata-se que a brita 1 e a brita 2 têm valores de índice de forma inferiores a 20%. De acordo com a norma NP EN 12620 [30], a categoria dos agregados para os valores máximos do índice de forma é atribuído pelo valor do índice de

forma, nomeadamente a percentagem de agregados não cúbicos (Quadro 9 da norma NP EN 12620 [30]). Neste sentido, a brita 1 e a brita 2 enquadram-se na categoria Sl_{20} , para os valores máximos do índice de forma para o betão [30].

4.3 ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Neste subcapítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos, nos ensaios dos betões com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC e do betão sem substituição de cimento (Quadro 3.1) no estado fresco. As descrições das metodologias de ensaio foram apresentadas no subcapítulo 3.5.

4.3.1 Ensaio de abaixamento – Cone de *Abrams*

O ensaio de abaixamento (cone de *Abrams*) foi determinado de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 12350 - 2 (subcapítulo 3.5.1). Nos pressupostos assumidos para a formulação da composição dos betões definiu-se que se pretendia produzir betões com classe de consistência mole (“S3”) pelo método do Cone de *Abrams* (subcapítulo 3.3), que corresponde a resultados de abaixamentos do betão neste ensaio entre 100 e 150 [3]. No entanto para que os resultados experimentais obtidos com os betões sejam comparáveis entre si com mais rigor impôs-se como gama admissível de variação dos resultados deste ensaio os contidos no intervalo de 130 ± 15 mm (Subcapítulo 3.3).

No Quadro 4.5 apresentam-se os resultados obtidos pelo ensaio de abaixamento – cone de *Abrams* – e que estão representados na Figura 4.2.

Quadro 4.5 – Abaixamento pelo cone de *Abrams*, respetiva relação água/ ligante (A/L) e classe de abaixamento obtida de acordo com a norma NP EN 206 - 1 dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.

Betão	Abaixamento (mm)	A/L	Classe
100C	137	0,44	S3
90C+10FCC	135	0,44	S3
80C+20FCC	131	0,44	S3
70C+30FCC	120	0,44	S3

De notar, que se pretendia obter uma consistência mole (“S3”) pelo método do Cone de *Abrams*, onde, com limites entre de 130 ± 15 mm. Concomitantemente, pela análise da representação da Figura 4.2, verifica-se que os betões em estudo se situam dentro dos limites impostos.

Da análise dos resultados (Quadro 4.5 e Figura 4.2) verifica-se que existe perda de consistência dos betões com substituição de cimento por catalisador exausto de FCC. Isto é, o betão de referência (100C) apresenta maior abaixamento e, conseqüentemente, maior fluidez do que, os betões com incorporações de catalisador exausto de FCC. Ainda se verifica, que

quanto maior a incorporação do catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento (90C+10FCC, 80C+20FCC, 70C+30FCC) maior a perda de consistência. Da análise da representação gráfica da Figura 4.2 verifica-se ainda, que o traçado da reta de ajuste tem uma boa correlação linear ($R^2=0,94$), entre a consistência do betão e o aumento da percentagem de substituição do cimento pelo catalisador exausto de FCC.

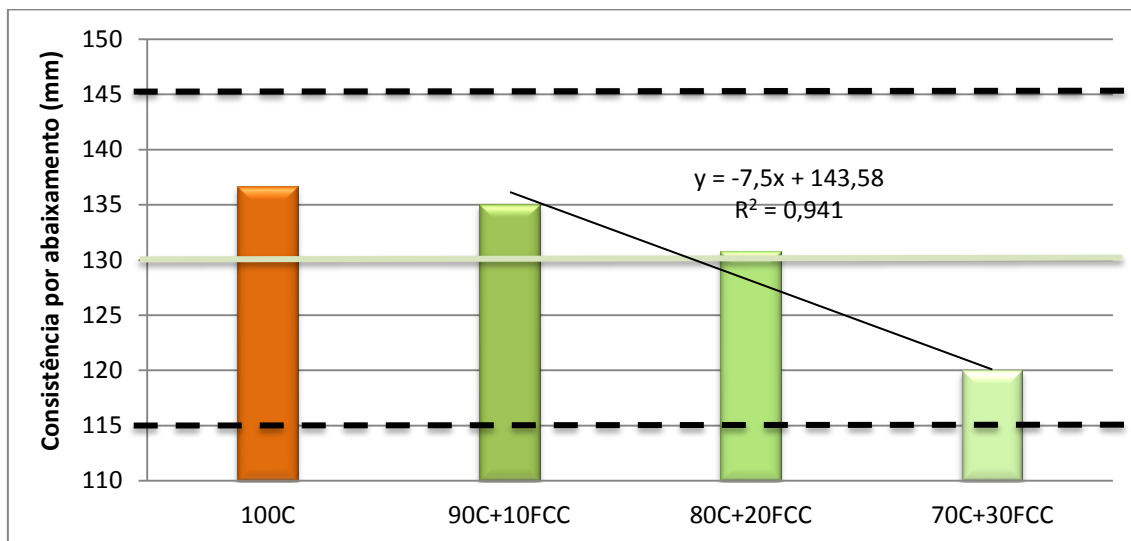


Figura 4.2 – Abaixamento pelo cone de *Abrams*, dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a consistência pelo método de abaixamento em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).

A diminuição da consistência com o aumento do teor de resíduo incorporado pode ser atribuído sobretudo ao facto de o catalisador exausto de FCC ser um aluminossilicato que apresenta uma elevada área de superfície com muita afinidade para a água [46] (subcapítulo 2.4.).

A perda de consistência dos betões associada à incorporação do catalisador exausto de FCC no betão está de acordo com resultados previamente publicados no âmbito do mesmo projeto, em relação à perda de consistência de argamassas nos quais o cimento também foi parcialmente substituído por catalisador exausto de FCC com a mesma origem – a refinaria de Sines [9, 10, 11, 13].

4.3.2 Massa Volúmica

As massas volúmicas dos betões no estado fresco foram determinadas de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 12350 - 6 (subcapítulo 3.5.2).

No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados da massa volúmica dos betões em estudo, referidos no Quadro 3.1. e representados na Figura 4.3. No Anexo F.1 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção da massa volúmica dos betões.

Quadro 4.6 – Massa volúmica dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.

Betão	D (kg/m ³)	D* (kg/m ³)	Limites
100C	2331	2340	≥2000 e <2600
90C+10FCC	2325	2330	
80C+20FCC	2304	2310	
70C+30FCC	2279	2280	

Legenda: D – massa volúmica obtida para o betão no estado fresco; D* - massa volúmica para o betão no estado fresco arredondada à décima mais próxima; Limites – limites impostos pela norma NP EN 206 - 1 para o betão normal.

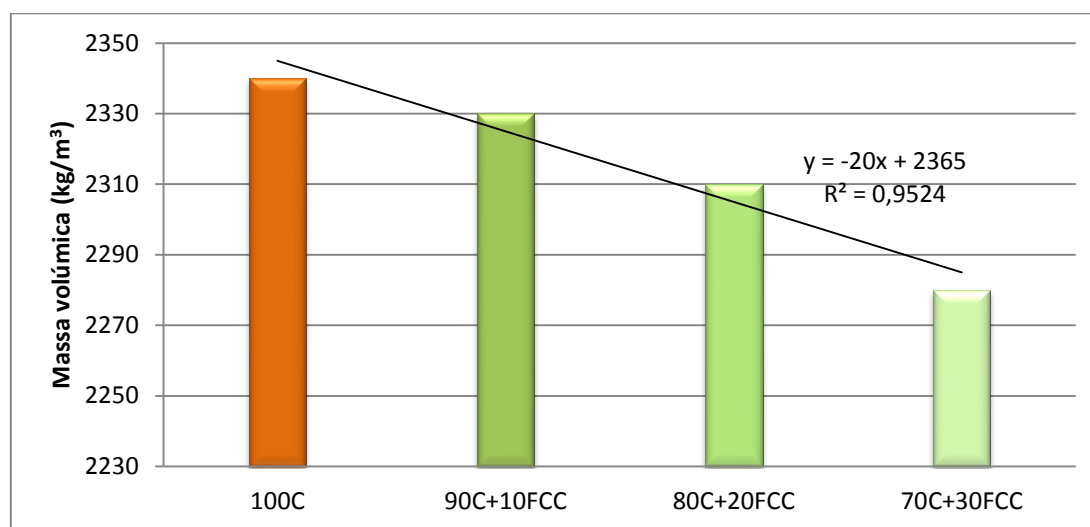


Figura 4.3 – Massa volúmica (kg/m³) e respetiva linha de regressão linear, dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).

Pela análise dos resultados referentes à massa volúmica dos betões (Quadro 4.6), observa-se que o betão de referência (100C) tem massa volúmica superior aos betões com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC. Ao comparar os resultados dos betões com diferentes teores de incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que à medida que se aumenta a quantidade de catalisador na constituição do betão, o valor da massa volúmica diminui. Estes resultados, podem ser atribuídos ao facto do resíduo de FCC apresentar uma estrutura interna muito porosa que se traduz na diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de substituição. Ainda se verifica, uma elevada correlação linear ($R^2=0,95$), muito próxima da unidade, entre a diminuição da massa volúmica dos betões e o aumento de incorporação de catalisador exausto de FCC.

A Figura 4.4 apresenta a correlação entre a massa volúmica e a determinação da consistência por abaixamento (Cone de Abrams) dos betões com diferentes taxas de substituição de cimento.

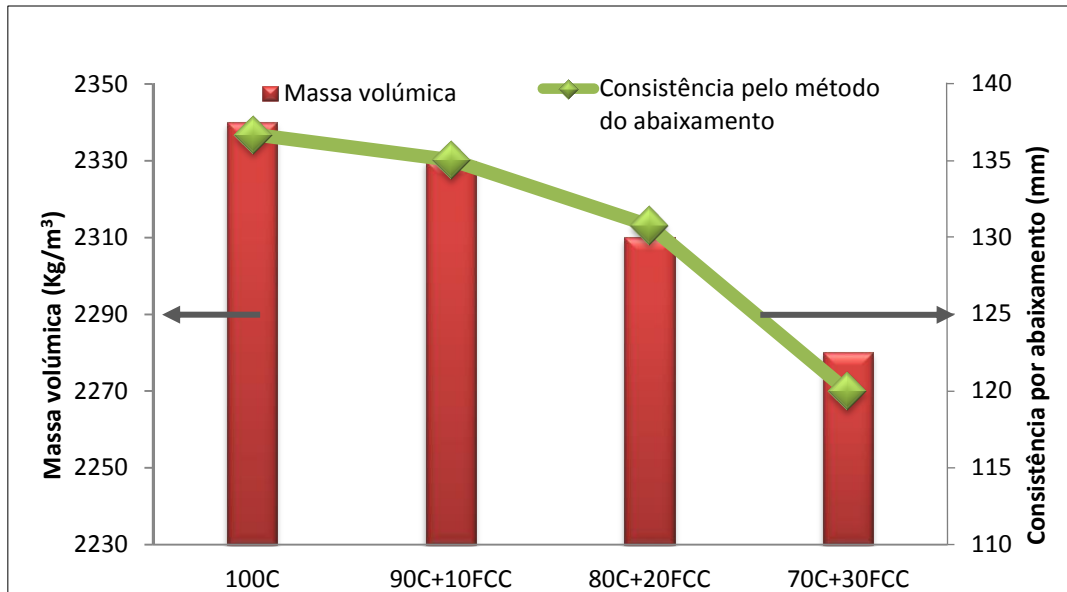


Figura 4.4 – Relação entre a massa volúmica (kg/m^3) e a consistência por abaixamento (mm) (Cone de Abrams), dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.

Da observação dos resultados representados na Figura 4.4 verifica-se que, para além da diminuição da massa volúmica se traduzir na diminuição da consistência dos betões, o andamento da tendência de variação destas duas propriedades é muito parecida.

4.3.3 Teor de ar – Método pressiométrico

O ensaio do teor de ar no betão no estado fresco foi determinado de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 12350 - 7 (subcapítulo 3.5.3).

Na Figura 4.5 representa-se os valores médios de teor de ar (%) obtidos para os 4 traços de betões em estudo (Quadro 3.1).

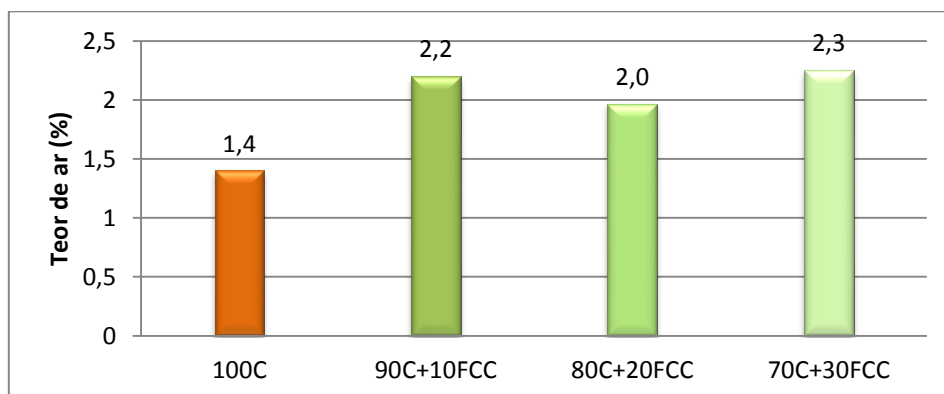


Figura 4.5 – Teor de ar (%) dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.

Da análise da representação gráfica da Figura 4.5 constata-se que o betão de referência apresenta um valor inferior de teor de ar em relação aos betões com incorporação de catalisador exausto de FCC (90C+10FCC, 80C+20FCC, 70C+30FCC). Por outro lado, verifica-

se que o aumento da percentagem de resíduo incorporado no betão não apresenta uma tendência definida na variação do teor de ar, no estado fresco. Embora, se verifique que existe uma ligeira tendência para o aumento do teor de ar, com o aumento da percentagem de substituição de cimento.

De notar, que sendo os resultados obtidos inferiores a 3%, os betões em estudo apresentam uma estrutura fechada, depois da compactação [84]. Isto porque, os agregados utilizados têm dimensão máxima superior a 16 mm, e neste sentido o teor de ar em volume não deve exceder 3% [84].

A Figura 4.6 apresenta a correlação entre o teor de ar e a massa volúmica dos diferentes betões.

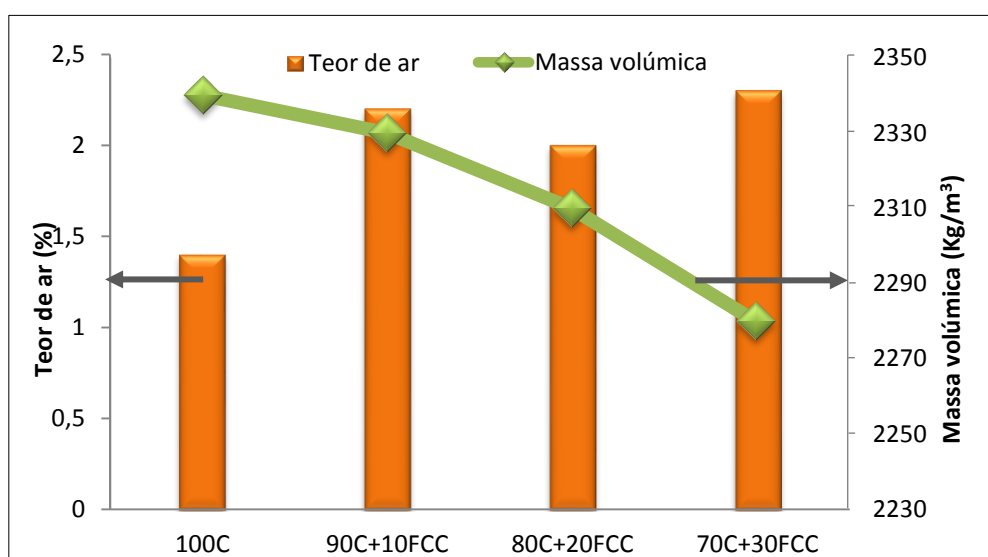


Figura 4.6 – Relação entre o teor de ar (%) e massa volúmica (kg/m^3) dos 4 traços de betões em estudo, no estado fresco.

Analisando os resultados expostos na Figura 4.6 observa-se que tipicamente nos betões em estudo quanto maior o valor de massa volúmica menor o valor de teor de ar. Os resultados obtidos estão de acordo com resultados previamente publicados em argamassas, no âmbito do mesmo projeto, no qual o cimento foi parcialmente substituído por este catalisador exausto de FCC [11] da mesma refinaria - refinaria de Sines.

4.4 ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Neste subcapítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos, nos ensaios dos betões produzidos com incorporação de catalisador exausto de FCC e do betão sem incorporação (Quadro 3.1) no estado endurecido. A descrição dos procedimentos dos ensaios foi apresentada no subcapítulo 3.7.

4.4.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de medição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pode permitir conhecer vários aspectos do betão, como referido no subcapítulo 3.7.1.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi avaliada em provetes cúbicos, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.1. Como referido no subcapítulo 3.7.1 os valores da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram realizadas para idades de cura de 3, 7, 14 e 28 dias. Os resultados apresentados neste ensaio são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados em três provetes diferentes do mesmo betão.

Uma das vantagens da utilização deste método não-destrutivo, é poder permitir o acompanhamento do estágio de endurecimento do material e inferir sobre a resistência mecânica apresentada por este mantendo a integridade do material. Assim, ao longo do tempo de hidratação, é esperada, uma densificação da matriz cimentícia, a qual deve corresponder a velocidades de propagação de ondas ultrassônicas superiores e também a resistências mecânicas mais elevadas. A correlação entre os resultados destes ensaios – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência mecânica, nomeadamente a resistência à compressão – foi analisada, e é apresentada no subcapítulo 4.4.2.

No Quadro 4.7 apresentam-se os resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para o betão de referência e para os betões com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, e representados na Figura 4.7. Na Figura 4.7 representa-se ainda as expressões da equação logarítmica dos betões (gráficos apresentados no Anexo G.2), observando-se o incremento logarítmico da velocidade ao longo do processo de endurecimento. No Anexo F.2 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas dos betões.

Quadro 4.7 – Velocidade média, v , (m/s) de propagação de ondas ultrassônicas (média \pm desvio padrão), avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Idade (dias)	3		7		14		28	
	N	v (m/s)	N	v (m/s)	N	v (m/s)	N	v (m/s)
100C	3	4836 \pm 136	3	4870 \pm 41	3	4872 \pm 21	3	4883 \pm 43
90C+10FCC	3	4766 \pm 68	3	4897 \pm 33	3	4907 \pm 27	3	4927 \pm 46
80C+20FCC	3	4450 \pm 56	3	4730 \pm 10	3	4908 \pm 61	3	4888 \pm 8
70C+30FCC	3	4447 \pm 8	3	4848 \pm 52	3	4784 \pm 18	3	4874 \pm 76

N – número de provetes ensaiados.

Através da análise dos resultados do Quadro 4.7 e da Figura 4.7 verifica-se que tipicamente, o aumento da idade de cura dos betões conduz ao aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Porém, o betão 80C+20FCC aos 28 dias de idade e o betão 70C+30FCC

aos 14 dias de idade registam uma diminuição da velocidade de propagação. Estes resultados podem ser explicados devido aos erros acidentais de operação e manuseamento do equipamento, ou devido à presença de vazios e fissuras que poderão ter constituído numa descontinuidade ao atravessamento das ondas no interior do provete, responsáveis pela redução da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. Como se disse anteriormente, estas diminuições não eram expectáveis, uma vez que, teoricamente, com o aumento do tempo de hidratação ocorre uma densificação da matriz dos materiais à base de cimento, originando um betão mais compacto na qual a propagação da onda ultrassónica é facilitada pelo que a velocidade da onda aumenta [11].

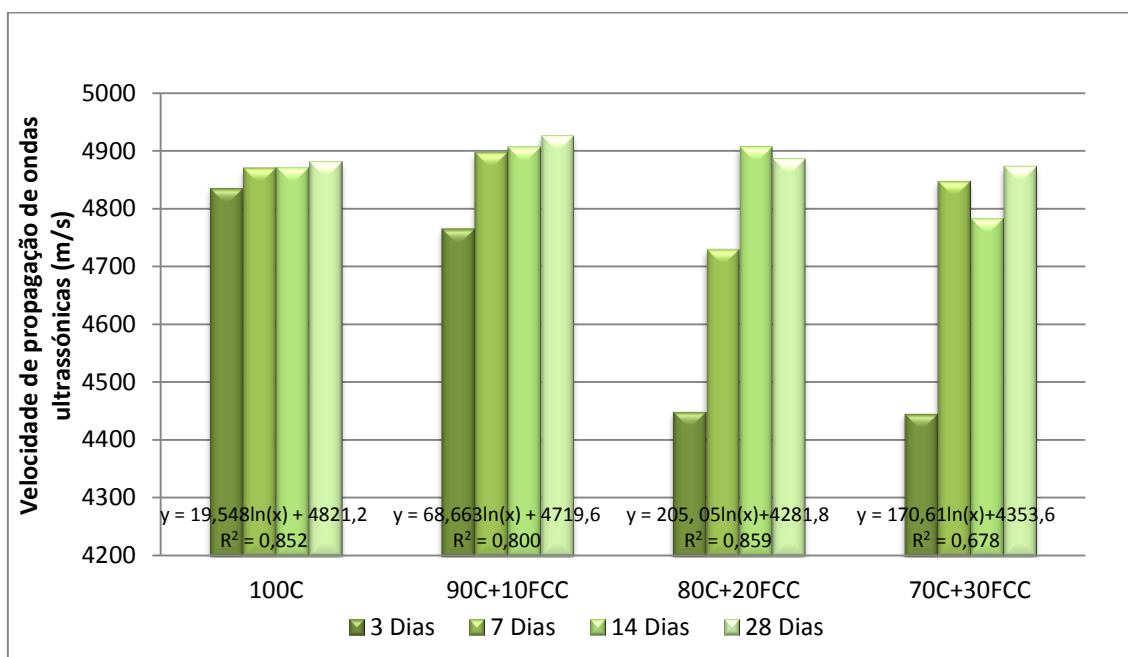


Figura 4.7 – Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultrassónicas avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem aos ajustes logarítmicos que se verificaram entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas em função do tempo de hidratação).

Segundo a observação dos registos incluídos no Quadro 4.7, verifica-se que o betão com 10 % de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC tem uma velocidade de propagação de onda superior aos betões com 20 e 30% de substituição. Estes resultados serão correlacionados com os valores da resistência mecânica, nomeadamente a resistência à compressão, no subcapítulo 4.4.2.1 concluindo-se que os resultados obtidos estão de acordo com os resultados da resistência à compressão.

Note-se que, tal como descrito no subcapítulo 3.7.1, na determinação deste ensaio, foram obtidas as representações da componente longitudinal das ondas ultrassónicas através do osciloscópio, cujo tratamento matemático sai fora do âmbito desta dissertação. A título de exemplo apresentam-se as ondas longitudinais obtidas no betão 100C no Anexo G.1, para as idades de 3 e 7 e 14 dias.

4.4.2 Resistência à compressão

O conhecimento das resistências mecânicas - que diz respeito à capacidade de suportar os esforços mecânicos que sobre eles atuam - constitui um dado essencial na caracterização dos betões no estado endurecido.

Como já foi referido atrás (Subcapítulo 4.4.1), teoricamente existe uma correlação entre os resultados de resistência mecânica e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, uma vez que associado ao aumento da resistência está tipicamente associada uma maior densidade do betão e conseqüentemente, maior velocidade de propagação das ondas (subcapítulo 4.4.1). A análise da relação destas duas grandezas apresenta-se no subcapítulo 4.4.2.1.

A determinação dos valores de resistência à compressão permite também a determinação do índice de atividade (IA) pozolânica, que se apresenta no subcapítulo 4.4.2.2. No subcapítulo 4.4.3 apresenta-se a relação entre a resistência à compressão estimada pelo índice de esclerométrico e a resistência à compressão determinada neste subcapítulo.

O ensaio de resistência à compressão foi avaliada em provetes cúbicos, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.2. Como já referido anteriormente, este ensaio foi realizado para as seguintes idades de cura, 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias. Os resultados apresentados neste ensaio são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados em três provetes diferentes do mesmo betão.

Os valores de resistência à compressão dos betões em estudo com adição de catalisador exausto de FCC, bem como o respetivo betão de referência, apresentam-se no Quadro 4.8 e estão representados na Figura 4.8. A Figura 4.9, constitui outra representação da Figura 4.8 – para ilustrar a evolução da resistência média à compressão dos betões ao longo do tempo de hidratação. No Anexo F.3 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção da resistência à compressão dos betões.

Quadro 4.8 – Resistência à compressão, Rc, (MPa) (média ± desvio padrão) avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Idade (dias)	3		7		14		28		56		90	
Betão	N	Rc (MPa)	N	Rc (MPa)	N	Rc (MPa)	N	Rc (MPa)	N	Rc (MPa)	N	Rc (MPa)
100C	3	52,3 ± 0,9	3	56,3 ± 0,7	3	56,6 ± 0,6	3	62,0 ± 1,9	3	65,0 ± 1,4	3	70,7 ± 1,0
90C+10FCC	3	59,4 ± 2,3	3	64,7 ± 1,8	3	68,3 ± 1,4	3	68,9 ± 2,0	3	79,2 ± 2,2	3	75,4 ± 1,4
80C+20FCC	3	55,0 ± 1,0	3	65,4 ± 1,0	3	72,8 ± 0,8	3	76,2 ± 1,7	3	83,2 ± 1,8	3	84,5 ± 0,9
70C+30FCC	3	44,6 ± 0,6	3	55,2 ± 0,2	3	66,3 ± 1,2	3	68,8 ± 1,4	3	76,2 ± 1,5	3	78,4 ± 2,5

Legenda: N – número de provetes ensaiados.

Segundo a observação dos registos do Quadro 4.8, verifica-se um aumento da resistência à compressão ao longo do tempo de cura dos betões.

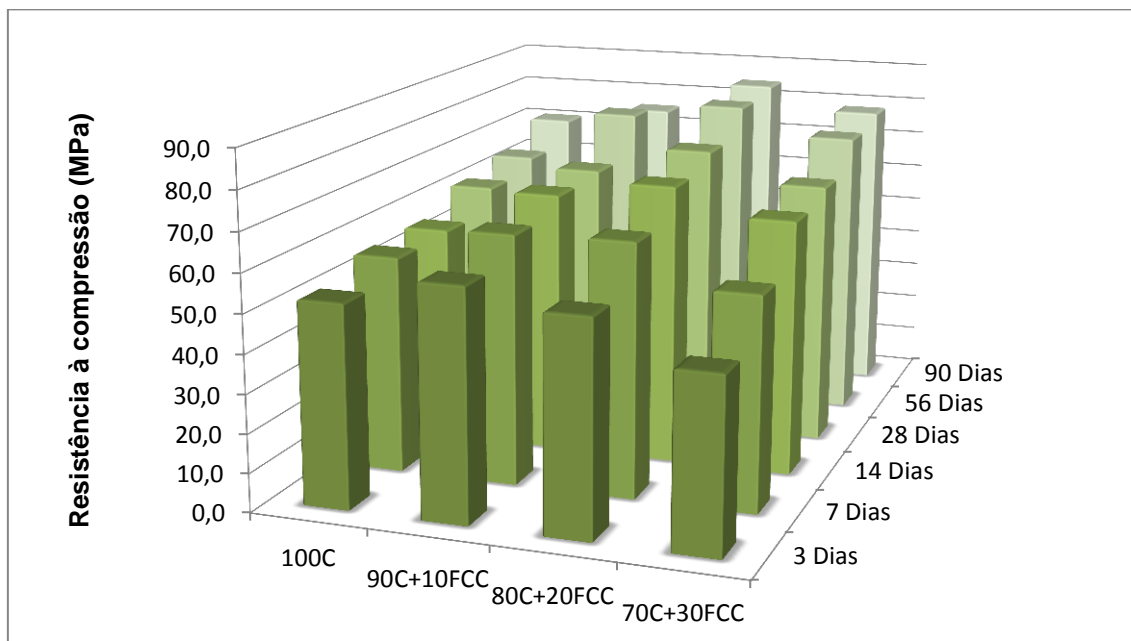


Figura 4.8 – Resistência à compressão média (MPa) avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Através da análise dos resultados do Quadro 4.8 e da Figura 4.8, verifica-se que os betões com 10 e 20 % de adição de catalisador exausto de FCC têm uma resistência à compressão superior ao betão de referência (100C) logo a partir dos 3 dias de cura. Tal pode ser atribuído ao facto do catalisador ser uma pozolana muito ativa desde as primeiras idades de cura (subcapítulo 2.4). Relativamente ao betão com 30% de substituição de cimento (70C+30FCC) ocorre um desenvolvimento da resistência compressão mais lento, como se pode constatar nos resultados obtidos aos 3 e 7 dias de idade. A partir dos 14 dias de idade, comparativamente ao betão de referência, verifica-se que todos os betões com adição de catalisador exausto de FCC apresentam uma resistência à compressão superior. Assim, de entre as composições estudadas com substituição de cimento por catalisador exausto de FCC a mistura 80C+20FCC conduz a maior resistência à compressão.

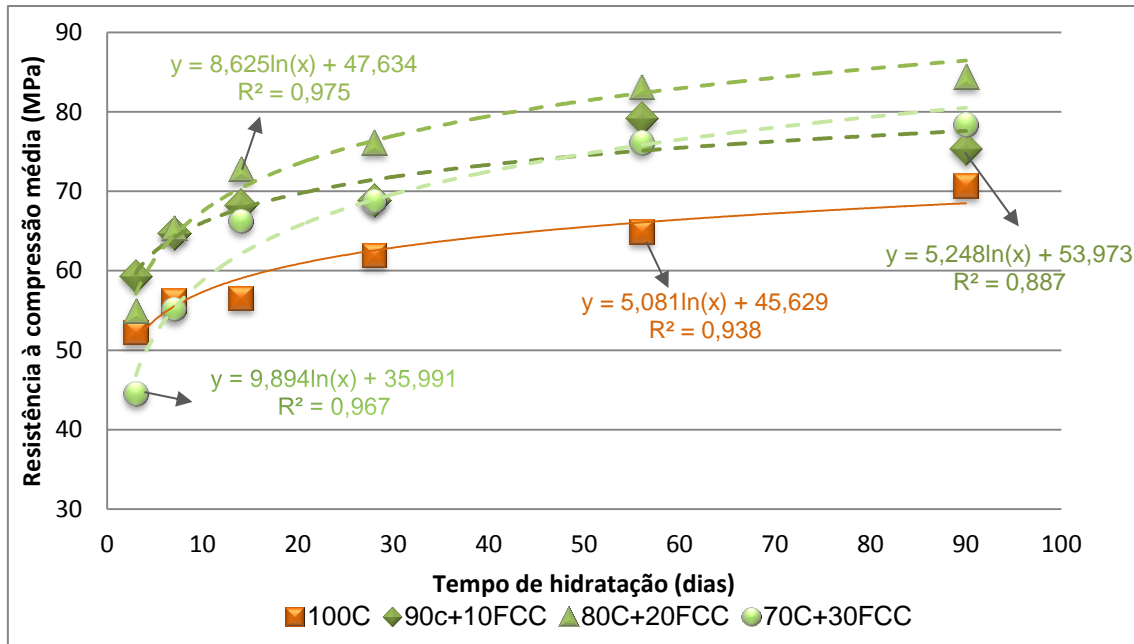


Figura 4.9 – Resistência à compressão média (MPa), avaliada em provetes cúbicos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).

Atendendo às equações das linhas de tendência logarítmicas, apresentadas na Figura 4.9, verifica-se a existência de correlação da resistência à compressão em função do tempo de hidratação.

Os resultados obtidos estão de acordo com resultados previamente publicados - no âmbito do mesmo projeto - em argamassas nos quais o cimento foi parcialmente substituído por catalisador exausto de FCC com a mesma origem – a refinaria da Petrogal, em Sines [9, 10, 11, 13]. Relativamente à substituição do cimento por este catalisador exausto de FCC na produção de betões autocompactáveis verificou-se que o betão com 10% de substituição conduz a valores mais elevados de resistência à compressão, comparativamente ao betão sem incorporação de catalisador exausto e os betões com 20 e 25% de substituição [12].

Os resultados observados estão também coerentes com os resultados obtidos por outros autores em estudos realizados anteriormente em betões, com incorporação de catalisador exausto de FCC de origem diferentes. Estes trabalhos também revelaram melhoria da resistência à compressão para percentagens de substituições de cimento por catalisador exausto de FCC de 10, 15, 20, 25%, mesmo com quantidades de cimento e relação água/ligante diferentes da presente dissertação [4, 5, 50]. No entanto, a substituição de 30 % de cimento por catalisador exausto de FCC, conduziram, estudos realizados, à diminuição da resistência à compressão comparativamente ao betão de referência e para betões com substituição de cimento de 10 e 20% por catalisador exausto de FCC [53]. De referir, que o resíduo estudado por estes autores não provém da mesma refinaria, originando em características mecânicas diferentes.

4.4.2.1 Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é normalmente correlacionado com o ensaio de resistência à compressão. Esta correlação é determinada pela diminuição de vazios ao longo do tempo, associada à hidratação do ligante, que se traduz no aumento da resistência à compressão e na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. O aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas depende das características do material que atravessa, nomeadamente a presença de vazios e fissuras.

Como referido no subcapítulo 4.4.1 o ensaio para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade de hidratação dos betões. Assim, a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão foi realizado para os dias referidos. A Figura 4.10 apresenta a relação entre a resistência à compressão (MPa) e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s).

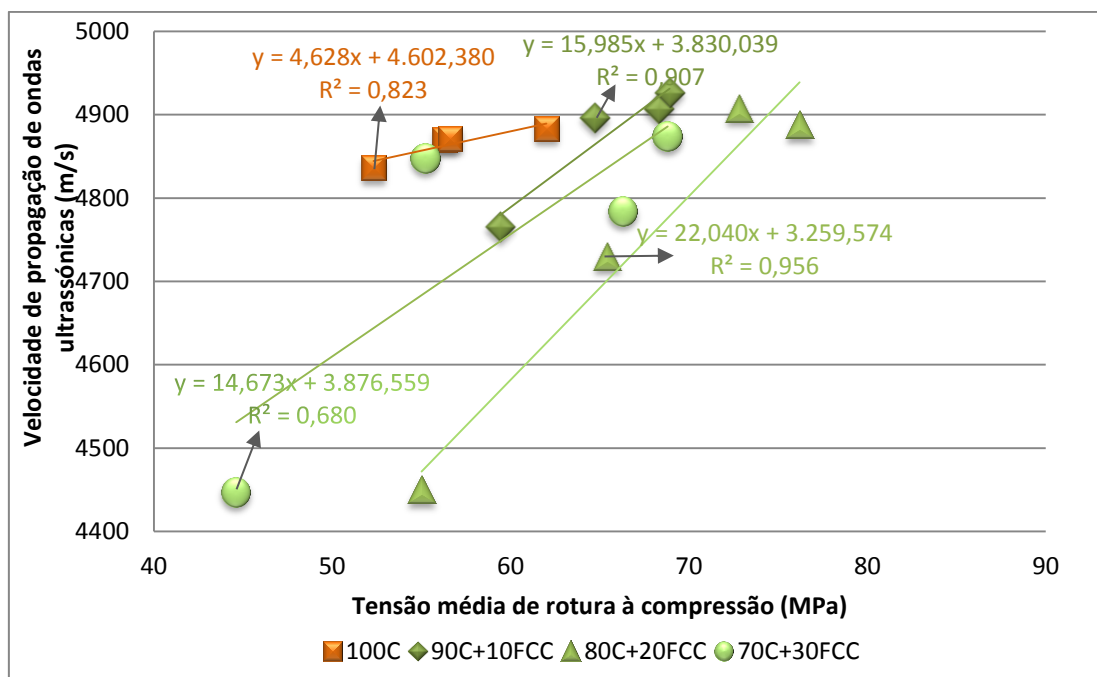


Figura 4.10 – Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão até aos 28 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão).

De uma forma geral, a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão foi expresso por uma função linear, sendo o fator de correlação elevado ($R^2 > 0,90$) para o betão com 10 e 20% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC. No entanto o betão de referência apresenta um valor de correlação aproximadamente de 0,80 e o betão com 30% de substituição apresenta um valor de correlação inferior a 0,70. Adicionalmente conclui-se pelas correlações obtidas, que o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pode ser utilizado para avaliar a

resistência à compressão dos betões, uma vez que à medida que a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas aumenta, aumenta também a resistência à compressão.

4.4.2.2 Índice de Atividade

Como forma de avaliar a atividade pozolânica dos betões em estudo procedeu-se à determinação do índice de atividade (IA). Segundo a norma americana ASTM C311 [86], o IA é definido como sendo a relação entre a resistência de uma argamassa com 20% de substituição, aos 28 dias de hidratação e a resistência à compressão da argamassa de referência, aos 28 dias, e sujeito às mesmas condições.

No presente trabalho extrapolou-se a aplicação desta norma americana, definida para argamassas, para os betões em estudo, e optando-se também por considerar o índice de atividade pozolânica como sendo a razão entre a resistência à compressão do betão para outras percentagens de substituição de cimento, e outras idades de cura e a resistência à compressão do betão de referência, para a mesma idade. Seguindo este raciocínio, o índice de atividade pozolânica é determinado pela seguinte equação:

$$IA = \frac{A_{Rc}}{B_{Rc}} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo,

IA – índice de atividade pozolânica;

A_{Rc} – valor médio da resistência à compressão do betão para uma determinada substituição e idade de cura;

B_{Rc} – valor médio da resistência à compressão do betão de referência para a mesma idade de cura de A_{Rc} .

No Quadro 4.9 apresentam-se os valores obtidos do índice de atividade pozolânica para os betões em estudo.

Quadro 4.9 – Índice de atividade (IA%) das misturas com diferentes teores de adição de catalisador exausto de FCC, com base na resistência à compressão, dos 4 traços de betões em estudo.

Betão \ Idade (dias)	3	7	14	28	56	90
100C	100	100	100	100	100	100
90C+10FCC	114	115	121	111	122	107
80C+20FCC	105	116	129	123	128	120
70C+30FCC	85	98	123	111	117	111

A substituição de cimento por outro material não reativo – efeito de diluição – tipicamente traduz-se na diminuição da resistência à compressão dos betões proporcional à quantidade de substituição que ocorresse. Contudo, isto se o material que substitui parcialmente o cimento

apresentar atividade pozolânica, esta propriedade - que contribui para o aumento da resistência à compressão - pode compensar a perda de resistência conferida pelo efeito diluição. A atividade pozolânica é a capacidade que uma determinada pozolana tem em reagir com o hidróxido de cálcio, ou seja, quanto maior o valor de hidróxido de cálcio consumido na reação pozolânica, maior é o seu índice de atividade [26].

Segundo o Quadro 4.9, o catalisador exausto de FCC apresenta atividade pozolânica, desde os 3 dias de hidratação para substituições de 10%, 20% e 30% uma vez que os valores do índice de atividade pozolânica (IA) são superiores aos expectáveis se se considerasse apenas o efeito de diluição, pois os diferentes IA apresentam valores superiores à percentagem de cimento presente no betão.

Pela análise do Quadro 4.9 conclui-se, que os valores mais elevados de IA obtêm-se para os 20% de substituição, em massa, de cimento por catalisador exausto de FCC. Confirmando o referido anteriormente, em que o betão com 20% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC, detém de valores de resistência à compressão superiores que o betão de referência e os betões com incorporação de adição como substituição de 10 e 30% de cimento. O betão com 30% de incorporação de catalisador exausto como substituto de cimento, como verificado no ensaio de resistência à compressão (Subcapítulo 4.4.2), tem um desenvolvimento mais lento da sua resistência, sendo que aos 14 dias de idade de cura recupera a sua resistência, esta constatação verifica-se no Quadro 4.9.

4.4.3 Índice de esclerómetro

O ensaio de índice de esclerómetro permite medir a dureza superficial dos materiais. No presente trabalho avaliou-se a dureza superficial dos betões com o intuito de tentar relacionar com as suas resistências à compressão. No entanto, os resultados mostraram dificuldade em correlacionar quantitativamente estes resultados, sendo mais seguro utilizar este equipamento de forma qualitativa, nomeadamente para análises comparativas e deteção de zonas críticas [76, 87].

O ensaio de índice de esclerómetro foi avaliado em provetes cúbicos, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.3. Como referido no subcapítulo 3.7.3 os betões foram ensaiados à compressão nas idades de cura de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias. Os resultados deste ensaio foram realizados unicamente num provete para cada traço de betão preparado e para cada idade de cura avaliada, uma vez que se pretendia conhecer o comportamento dos betões quando incorporados com catalisador exausto de FCC. No entanto, em cada provete, numa das faces realizaram-se 16 leituras conforme o descrito no subcapítulo 3.7.3.

O equipamento utilizado foi um aparelho digital que estima e apresenta um resultado de resistência à compressão, obtido a partir da dureza superficial - índice esclerométrico - que o equipamento avalia. O fornecedor não disponibiliza, contudo, a expressão de cálculo subjacente.

No Quadro 4.10, apresentam-se os valores obtidos pelo ensaio do índice de esclerómetro, nomeadamente o índice esclerométrico obtido (IE) e a resistência à compressão (R_{CIE}) estimada pelo equipamento de medição da dureza superficial (índice de esclerómetro) e representados na Figura 4.11. No Anexo F.4 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção do índice esclerométrico e resistência à compressão dos betões.

Quadro 4.10 – Índice esclerométrico (IE) e resistência à compressão (R_{CIE} - MPa) estimada pelo índice esclerométrico avaliado em provetes cúbicos, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Betão	3		7		14		28		56		90	
	IE	R_{CIE} (MPa)	IE	R_{CIE} (MPa)	IE	R_{CIE} (MPa)	IE	R_{CIE} (MPa)	IE	R_{CIE} (MPa)	IE	R_{CIE} (MPa)
100C	40	42,5	41	44,3	42	46,2	44	50,1	45	52	46	54
90C+10FCC	42	46,2	48	58	48	58	48	58	50	62,1	49	60,1
80C+20FCC	39	40,6	45	52	48	58	49	60,1	50	62,1	50	62,1
70C+30FCC	35	33,5	43	48,2	45	52	49	60,1	49	60,1	49	60,1

Da análise do Quadro 4.10, verifica-se que o índice esclerométrico aumenta ao longo da idade de cura, para os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC e para o betão de referência.

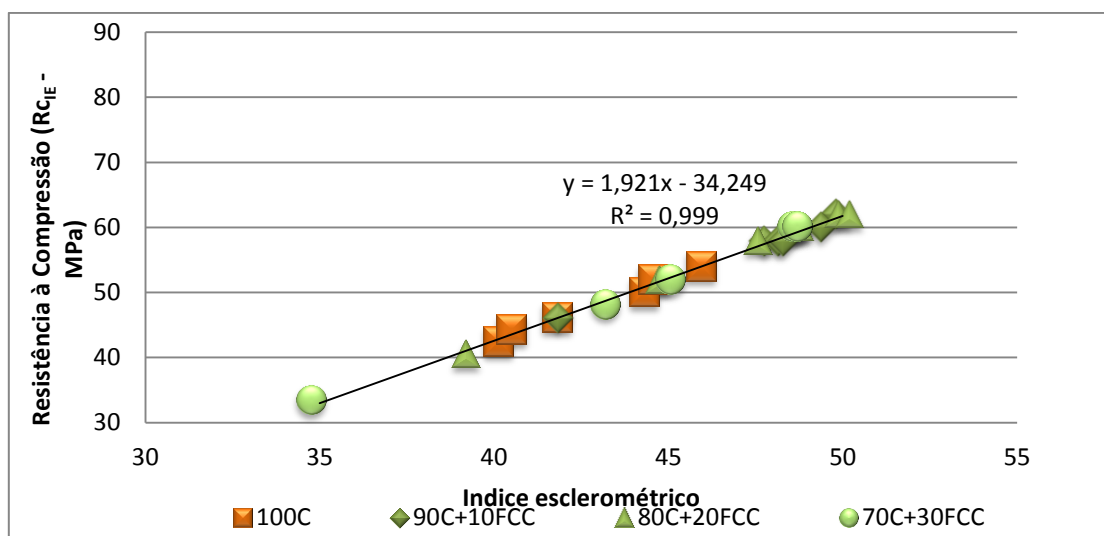


Figura 4.11 – Relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo equipamento utilizado na determinação do índice de esclerómetro, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (A linha representada, e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou na relação o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro ao longo do período de ensaio para os 4 traços de betão).

Os resultados observados pelo Quadro 4.10 estão coerentes com os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão (método destrutivo – Subcapítulo 4.4.2), que se concluiu, que a incorporação de catalisador exausto de FCC no betão como adição aumenta a resistência à compressão ao longo do período de ensaio. No entanto, de referir que os dados estimados da resistência à compressão pelo índice esclerométrico foram estimados pelos

critérios do fabricante, apresentando-se a título de exemplo na Figura 4.12 uma expressão possível do fabricante para a determinação da resistência à compressão pelo índice esclerométrico. Assim, de entre as composições estudadas com substituição de cimento por catalisador exausto de FCC o betão 80C+20FCC apresenta maior resistência à compressão, quando estimado através da dureza superficial.

De forma a analisar os resultados entre os dois métodos de determinação da resistência à compressão, na Figura 4.12 apresenta-se a relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão determinada no Subcapítulo 4.4.2.

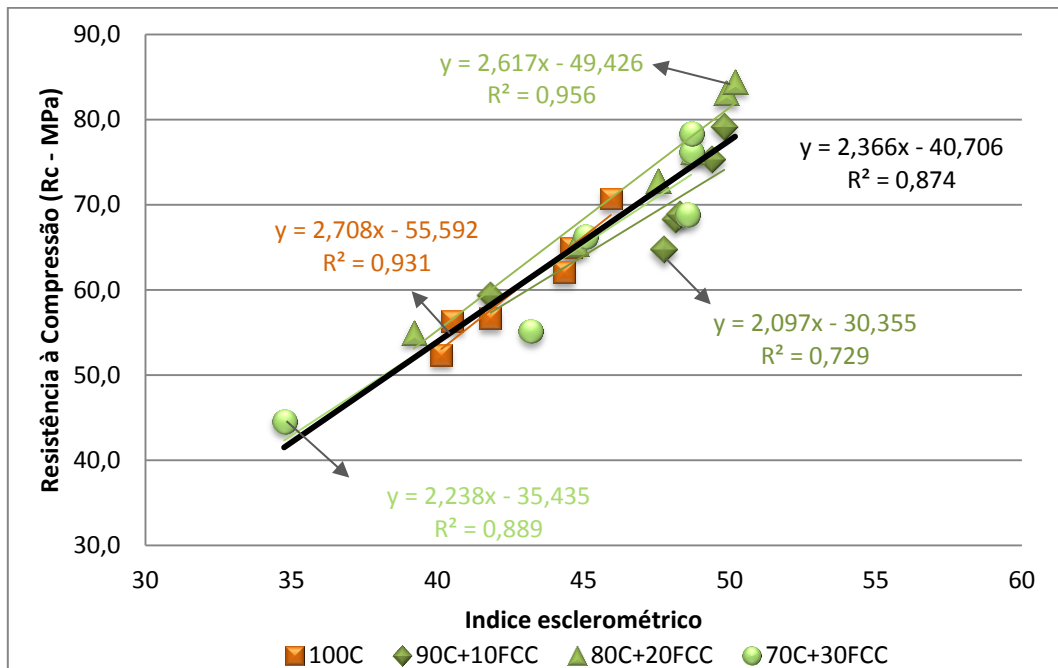


Figura 4.12 – Relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada pelo método destrutivo do subcapítulo 4.4.2, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões da equação, correspondem à correlação potencial que se verificou na relação o índice esclerométrico e a resistência à compressão pelo método destrutivo ao longo do período de ensaio).

Da análise da Figura 4.12, verifica-se que existe alguma discrepância entre os resultados em relação à Figura 4.11. No entanto, verifica-se correlação superior a 0,90 para o betão de referência, e para os betões com 10 e 30% de catalisador exausto de FCC, enquanto para o betão com 20% de substituição de cimento verifica-se uma correlação inferior a 0,80. Ainda se verifica, uma correlação de 0,87 para o conjunto dos traços de betão. Adicionalmente conclui-se pelas correlações obtidas, que existe uma tendência definida, uma vez que à medida que o índice esclerométrico aumenta, aumenta a resistência à compressão. De notar, que os resultados da resistência à compressão determinada pelo método destrutivo são superiores à resistência à compressão estimada pelo índice de esclerómetro. Contudo, verifica-se que a resistência à compressão estimada pelo índice de esclerómetro não deve ser usada como informação fiável para todos os betões, uma vez que efetivamente a resistência à compressão estimada depende da composição do betão.

Como referido no subcapítulo 3.7.3, com a realização do ensaio de índice de esclerómetro que consiste na medição da dureza superficial, através do valor do índice esclerométrico, pretendia-se comparar a resistência à compressão estimada por este ensaio com a resistência à compressão obtido pelo método destrutivo (subcapítulo 4.4.2). Neste sentido no Quadro 4.11 apresenta-se a comparação das resistências à compressão e representado na Figura 4.13. A variação entre as duas resistências obtidas, em relação à resistência à compressão obtida no subcapítulo 4.4.2 é dada pela expressão de cálculo:

$$\Delta\% = \frac{R_{cIE} - R_c}{R_c} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Quadro 4.11 – Comparação dos valor de resistência à compressão obtidos pelo método destrutivo, subcapítulo 4.4.2, e estimados pelo índice esclerométricos e a sua variação.

Dia de ensaio	Mistura	R _{cIE} (MPa)	R _c (MPa)	Δ (%)
3	100C	42,5	52,3	-19%
	90C+10FCC	46,2	59,4	-22%
	80C+20FCC	40,6	55	-26%
	70C+30FCC	33,5	44,6	-25%
7	100C	44,3	56,3	-21%
	90C+10FCC	58	64,7	-10%
	80C+20FCC	52	65,4	-20%
	70C+30FCC	48,2	55,2	-13%
14	100C	46,2	56,6	-18%
	90C+10FCC	58	68,3	-15%
	80C+20FCC	58	72,8	-20%
	70C+30FCC	52	66,3	-22%
28	100C	50,1	62	-19%
	90C+10FCC	58	68,9	-16%
	80C+20FCC	60,1	76,2	-21%
	70C+30FCC	60,1	68,8	-13%
56	100C	52	65	-20%
	90C+10FCC	62,1	79,2	-22%
	80C+20FCC	62,1	83,2	-25%
	70C+30FCC	60,1	76,2	-21%
90	100C	54	70,7	-24%
	90C+10FCC	60,1	75,4	-20%
	80C+20FCC	62,1	84,5	-27%
	70C+30FCC	60,1	78,4	-23%

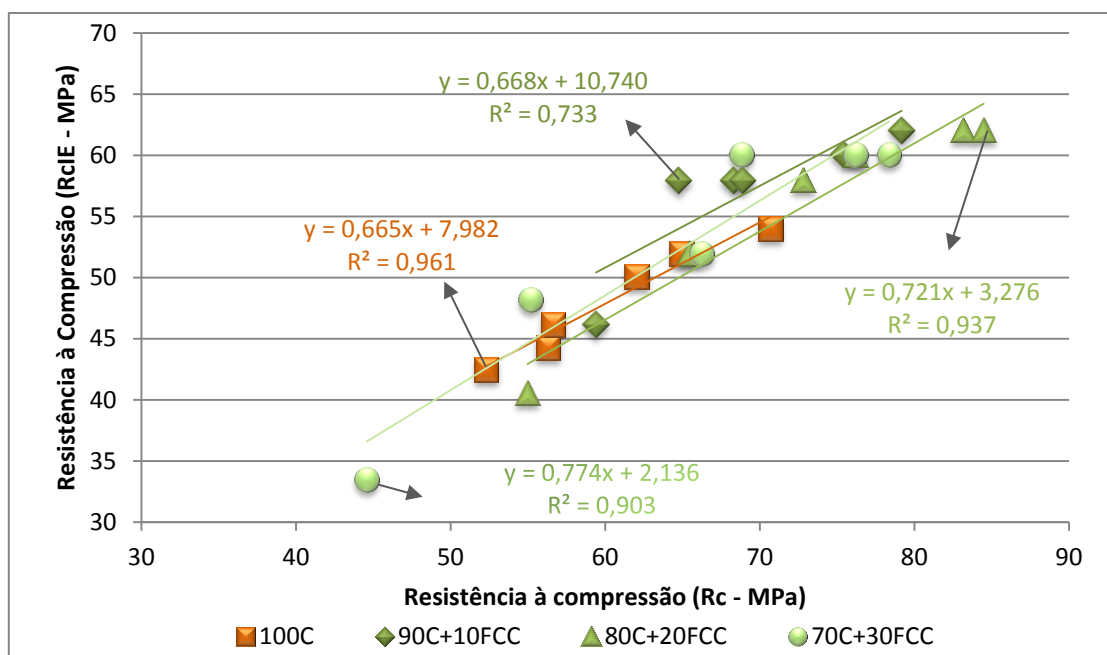


Figura 4.13 – Relação entre a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro e a resistência à compressão obtida pelo método destrutivo, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a resistência à compressão estimada pelo ensaio de índice de esclerómetro e a resistência à compressão obtida pelo método destrutivo ao longo do período de ensaio).

Através da análise do Quadro 4.11 e da Figura 4.13 verifica-se uma diferença de resultados entre 10 a 27% nos valores de resistência à compressão estimados pelo equipamento de medida do índice esclerométrico e os valores resistência à compressão obtidos experimentalmente (no subcapítulo 4.4.2). Ainda se verifica, que os valores de resistência à compressão estimados pelo equipamento de medida do índice esclerométrico são sempre inferiores, aos obtidos pelo método destrutivo obtido experimentalmente, como concluído anteriormente pela Figura 4.12 (subcapítulo 4.4.2). No entanto, a diferença verificada encontra-se dentro dos limites espectáveis para o betão, para este método (subcapítulo 3.7.3) entre 15 a 30% [72]. Ainda se verifica, pelas equações das linhas de tendência lineares obtidas, um fator de correlação superior a 0,90 para os betões com 20 e 30% de substituição de cimento e o betão de referência, enquanto o betão com 10% de substituição apresenta um fator de correlação inferior a 0,80.

Da bibliografia estudada [70, 76, 87], referem que, mesmo para provetes ensaiados em laboratório, curados e ensaiados em condições idênticas deve-se realizar a correção do índice esclerométrico, nos casos em que o esclerómetro não verifica o valor mínimo recomendado pelo fabricante de cada esclerómetro, quando se está a efetuar a calibração. A correção do índice esclerométrico é referida, uma vez que os valores estimados pelo fabricante do equipamento podem ter como base, outros materiais e condições de ensaio não similares ao betão em estudo. No entanto, optou-se por não realizar essa correção uma vez que se

pretendia conhecer o efeito da incorporação do catalisador exausto de FCC quando incorporado no betão, e não obter o valor exato da resistência à compressão.

4.4.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade contribui para a caracterização do betão, em particular, permitindo inferir aspetos relacionáveis com a sua durabilidade, uma vez que a durabilidade de uma estrutura de betão é influenciada pela presença, e facilidade de difusão de água, com eventual presença de substâncias dissolvidas e gases, através dos poros e fendas existentes.

A absorção de água por capilaridade é definida como sendo a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares. Estas podem resultar da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão, da sua superfície nos poros capilares e depende do diâmetro capilar.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi avaliado em provetes cilíndricos aos 28 dias de cura, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.4. Os provetes foram retirados da estufa aos 28 dias e iniciou-se o ensaio após esse período, retirando as massas dos provetes e a altura de ascensão capilar aos 0, 10 min, 1h, 3h, 4h, 6h, 24h e 72h. Os resultados apresentados neste ensaio são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados obtidos em três provetes diferentes de betão. Por fim determinaram-se os coeficientes de capilaridade (subcapítulo 3.7.3), como sendo o declive da reta que melhor se ajusta à curva de absorção capilar (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo ($t^{0.5}$), expresso em minutos. O coeficiente de absorção capilar foi determinado para as primeiras 6 horas ($K_{C_{6h}}$) usando os valores de absorção capilar obtidos às 0, 3 e 6 horas de ensaio, e ao fim das 72 horas ($K_{C_{72h}}$) usando os valores de absorção capilar obtidos às 0, 3 e 6, 24 e 72 horas de ensaio.

Na Figura 4.14 apresenta-se a evolução, ao longo do tempo, da absorção capilar para os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC e para o betão de referência, com o intuito de facilitar a comparação das alterações ocorridas pela incorporação no betão de catalisador exausto de FCC como substituição do cimento ao longo do tempo. No Anexo F.5 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção da absorção de água por capilaridade dos betões.

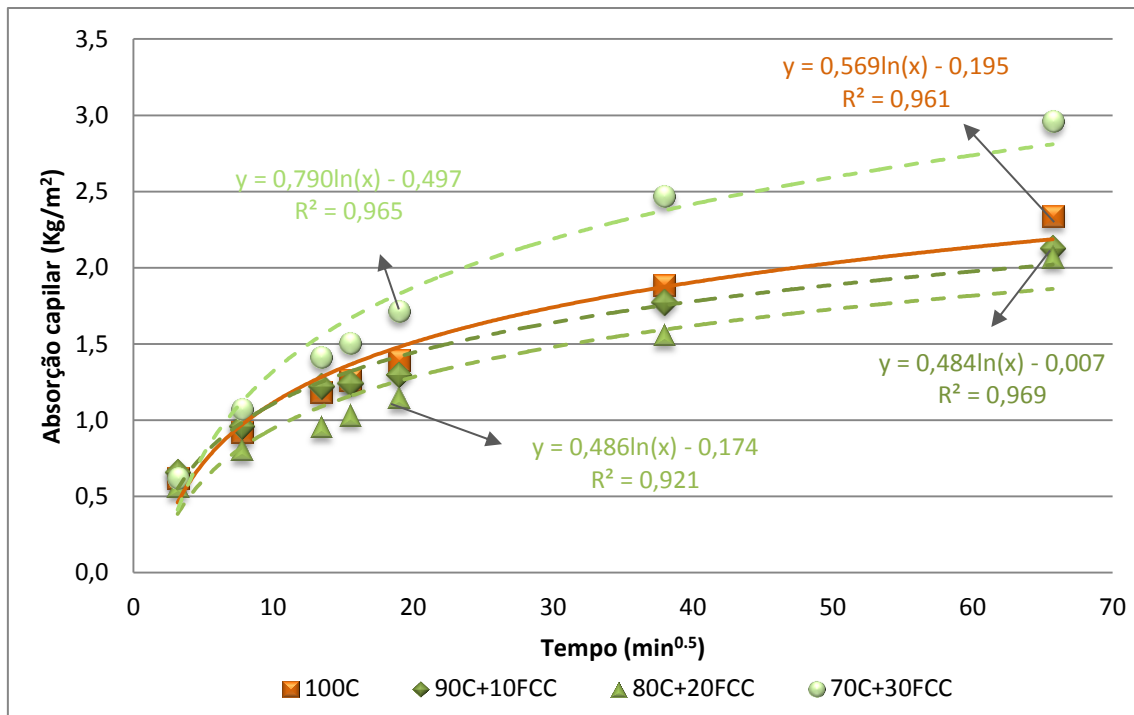


Figura 4.14 – Curva de absorção de água média por capilaridade determinada em provetes cilíndricos, ao longo do período de ensaio, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou entre a absorção capilar ao longo da raiz quadrada do tempo durante o ensaio).

Através de uma análise da representação gráfica ilustrada na Figura 4.14, pode observar-se que o betão com maior absorção capilar é o betão com incorporação de 30% de catalisador de FCC (70C+30FCC). Nos betões com 10 e 20% de incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que o aumento do teor de resíduo, diminui a absorção capilar, sendo a absorção inferior ao betão de referência.

Adicionalmente, a absorção de água por capilaridade pode relacionar-se com a resistência à compressão dos betões, isto é, tipicamente quanto maior o valor de resistência à compressão menor é o coeficiente de absorção capilar. Neste sentido, verifica-se que o betão 70C+30FCC apresenta menor resistência à compressão do que o betão 90C+10FCC e o betão 80C+20FCC e por sua vez maior coeficiente de absorção de água por capilaridade. Relativamente ao betão com 10 e 20% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC verifica-se também uma boa correlação.

No Quadro 4.12 apresentam-se os resultados referentes aos valores dos coeficientes de capilaridade obtidos pela curva de absorção de água por capilaridade, a absorção de água média até às 6 e 72 horas e a altura de ascensão de água média às 72 horas para o betão de referência e os betões com adição de catalisador exausto de FCC. Como referido, com base na Figura 4.14 obteve-se os valores dos coeficientes de capilaridade (determinado como descrito no subcapítulo 3.7.4), e os gráficos referentes à determinação dos coeficientes de capilaridade apresentam-se no Anexo G.3 e os resultados estão representados na Figura 4.15.

Quadro 4.12 – Absorção capilar aos 28 dias: absorção capilar média às 72 horas (Kg/m^2), coeficientes de capilaridade (K_c) e altura de ascensão de águas às 72 horas, avaliado em provetes cilíndricos dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Idade (dias)	28				
	Betão	N	Altura de ascensão às 72 horas (h_i) (mm)	Absorção Capilar às 72 horas (Kg/m^2)	K_{C6h} ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$)
100C	3	21	2,34	0,076	0,032
90C+10FCC	3	20	2,13	0,073	0,028
80C+20FCC	3	18	2,07	0,063	0,028
70C+30FCC	3	20	2,96	0,093	0,041

Legenda: N – número de provetes ensaiados.

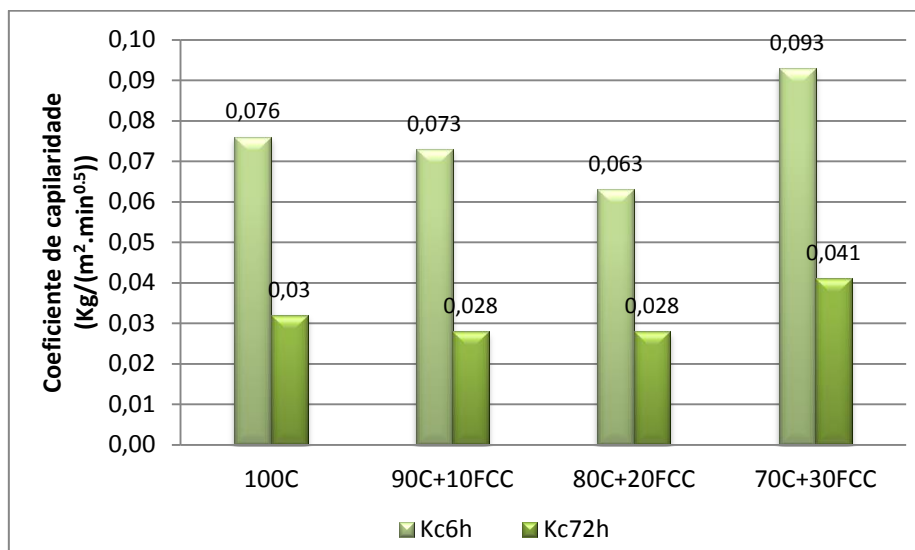


Figura 4.15 – Coeficientes de capilaridade ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

De acordo com os resultados obtidos para os coeficientes de capilaridade (Quadro 4.12), e representados na Figura 4.15, verifica-se que nas primeiras 6 horas (K_{C6h}) os betões com 10 e 20 % de catalisador, quanto maior a quantidade de catalisador exausto de FCC incorporado no betão menor é o coeficiente de capilaridade. Enquanto que o valor do coeficiente de capilaridade às 72 horas (K_{C72h}) praticamente se mantém. Verifica-se, ainda, que o betão com 30% de substituição de cimento por catalisador tem coeficientes de absorção capilar superiores tanto em relação ao betão de referência como aos betões com 10 e 20% de incorporação de resíduo catalítico. De referir, que o coeficiente de absorção capilar representa a massa ou o volume de água absorvida por unidade de área, em função do tempo.

Os resultados obtidos estão de acordo com resultados previamente publicados - no âmbito do mesmo projeto - em argamassas nos quais o cimento foi parcialmente substituído por

catalisador exausto de FCC [9, 10, 11, 13]. Estes resultados está coerente pelos encontrados por outro autor com incorporação de cinzas volantes, isto é quanto maior a substituição (>20%) maior é o coeficiente de capilaridade [2].

Relativamente à comparação entre os coeficientes de capilaridade para as primeiras 6 horas de ensaio (K_{c6h}), e os coeficientes para as 72 horas de ensaio (K_{c72h}), verifica-se que a taxa de absorção capilar para os betões é superior nas primeiras horas quando em contacto com a água, uma vez que nas primeiras horas em contacto com a água o betão tem tendência a absorver uma grande quantidade de água.

A Figura 4.16 evidencia a relação obtida entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão dos betões em estudo aos 28 dias.

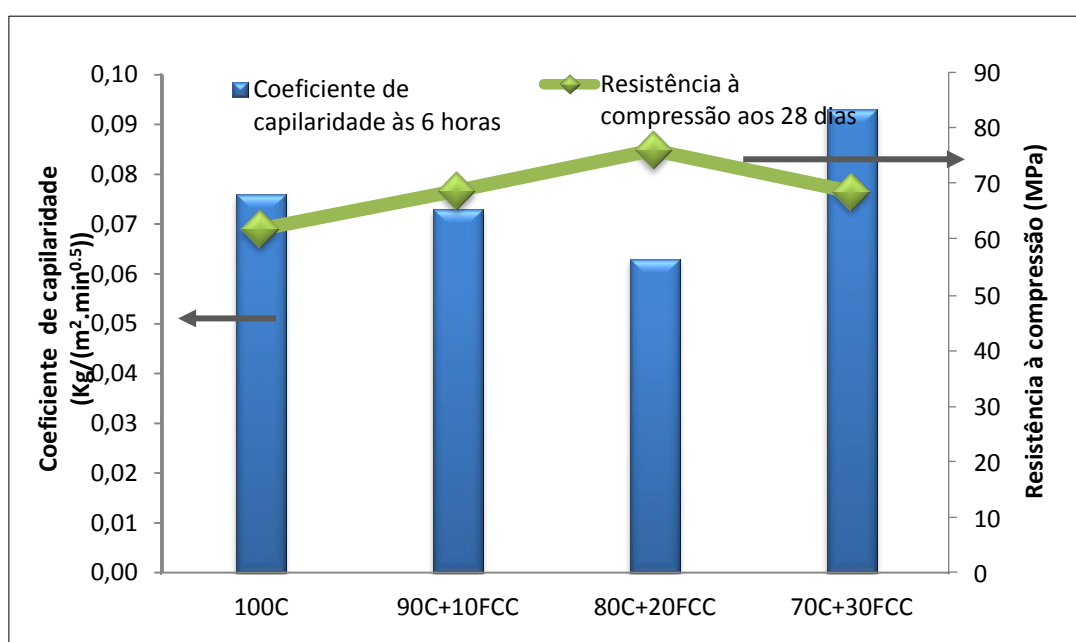


Figura 4.16 – Relação entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade ($\text{Kg}/(\text{m}^2.\text{min}^{0,5})$) e a resistência à compressão média (MPa) dos 4 traços de betões em estudo, aos 28 dias de hidratação.

Segundo a análise da Figura 4.16, verifica-se que tipicamente, a um menor valor de absorção de água por capilaridade está associado um maior valor de resistência à compressão e consequentemente maior compacidade como mencionado neste subcapítulo. Esta observação pode ser explicada pela existência de menos vazios internos no betão com adição de catalisador exausto de FCC até aos 20% de incorporação, proporcionando uma densificação da matriz de cimento que concomitantemente conduz à existência de menores capilares, originando desta forma um menor fluxo capilar da água no interior da argamassa. A constatação evidenciada em princípio é favorável para a durabilidade do betão, uma vez que o coeficiente de capilaridade constitui um indicador do ponto de vista da degradação do betão. No entanto verifica-se que para 30% de substituição de cimento por catalisador exausto de

FCC a resistência à compressão diminui para um valor de coeficiente de capilaridade acima de 0,09.

A Figura 4.17 representa a relação da altura média de ascensão capilar na face lateral do provete pela média de 4 pontos nas 4 geratrizes representadas no provete, ao longo do período de ensaio, para os betões em estudo.

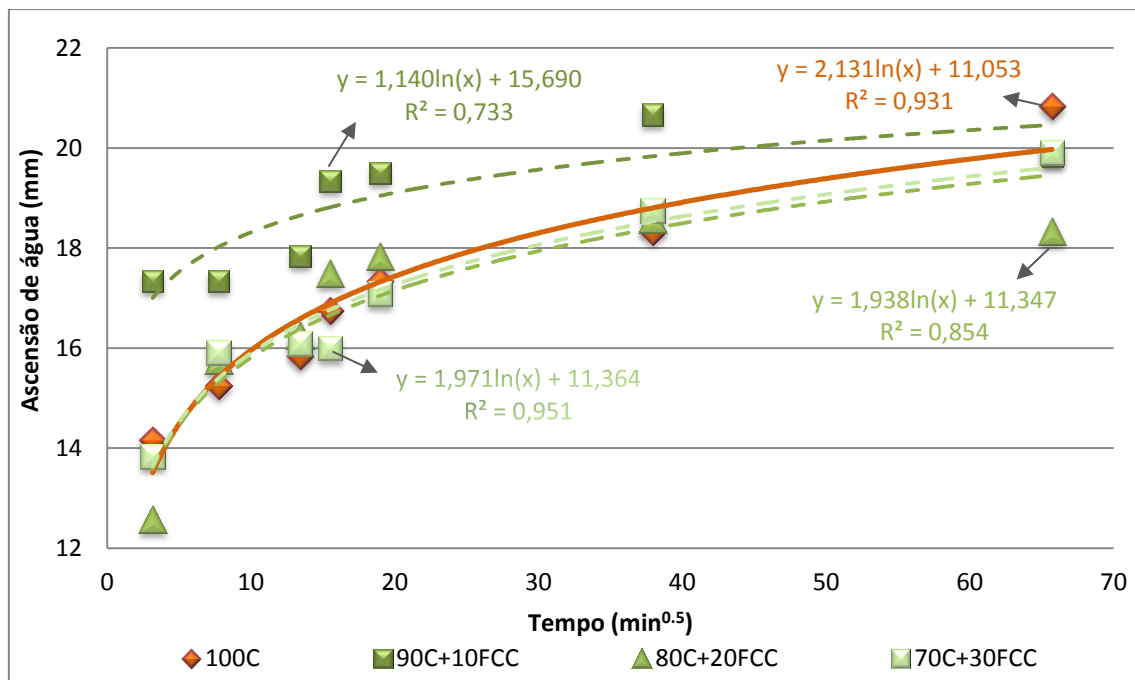


Figura 4.17 – Ascensão de água (mm) determinada em provetes cilíndricos, ao longo do período de ensaio, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (As linhas representadas, e as respetivas expressões das equações, corresponde à correlação logarítmica que se verificou na relação entre a ascensão de água por capilaridade ao longo do período de ensaio).

Pela análise da Figura 4.17, observa-se que, o betão que revela menor ascensão de água por capilaridade é o betão com 20% de incorporação de catalisador exausto de FCC. Também se verifica que o betão com 10% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC apresenta maior ascensão de água capilar ao longo do período de ensaio, comparativamente ao betão de referência e aos betões com 20 e 30% de catalisador como adição. Por fim às 72 horas de ensaio a ascensão de água por capilaridade é superior para o betão de referência (100C).

Analisando a Figura 4.14 e a Figura 4.17, respetivamente a absorção capilar e a ascensão capilar dos betões a estudo, verifica-se não conformidade entre estas. Nomeadamente, o betão com absorção capilar superior é o betão com 30% de substituição, enquanto o betão que apresenta maior ascensão capilar é o betão com 10% de substituição de cimento. No entanto o betão de referência e o betão com 20% de substituição apresentam conformidade.

4.4.5 Absorção de água por imersão

A determinação da absorção de água por imersão contribui para a caracterização do betão relativamente, à porosidade aberta na matriz cimentícia do betão, aos 28 dias, complementando a informação acerca da porosidade capilar obtida com o ensaio da absorção de água por capilaridade. A porosidade aberta pode ser originada, principalmente, pela adição excessiva de água na amassadura, que não é consumida nas reações de hidratação do cimento, ou pelo ar retido na mistura de betão após o processo de vibração e pela absorção de água dos respetivos agregados.

O ensaio de absorção de água por imersão foi avaliado em provetes cúbicos aos 28 dias de acordo, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.5. Os resultados apresentados neste ensaio são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados em três provetes diferentes do mesmo betão.

Os valores de absorção de água por imersão aos 28 dias apresentam-se no Quadro 4.13 e estão representados na Figura 4.18, para o betão de referência e os betões com adição de catalisador exausto de FCC. A variação entre a absorção de água por imersão obtida para os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC, e o betão de referência é dada pela expressão de cálculo:

$$\Delta\% = \frac{A_{iC+jFCC} - A_{100C}}{A_{iC+jFCC}} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Sendo,

$A_{iC+jFCC}$ – Absorção de água por imersão do betão com i de incorporação de cimento e j de incorporação de catalisador exausto de FCC;

A_{100C} – Absorção de água por imersão do betão de referência.

No Anexo F.6 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados na obtenção da absorção de água por imersão dos betões.

Quadro 4.13 – Absorção de água por imersão, avaliado em provetes cúbicos aos 28 dias dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido.

Idade (dias)	28			
	Betão	N	Absorção por imersão (%)	Δ (%)
100C	3	11,32 %	-	
90C+10FCC	3	12,52 %	9,54 %	
80C+20FCC	3	13,18 %	14,12 %	
70C+30FCC	3	13,74 %	17,58 %	

Legenda: N – número de provetes ensaiados.

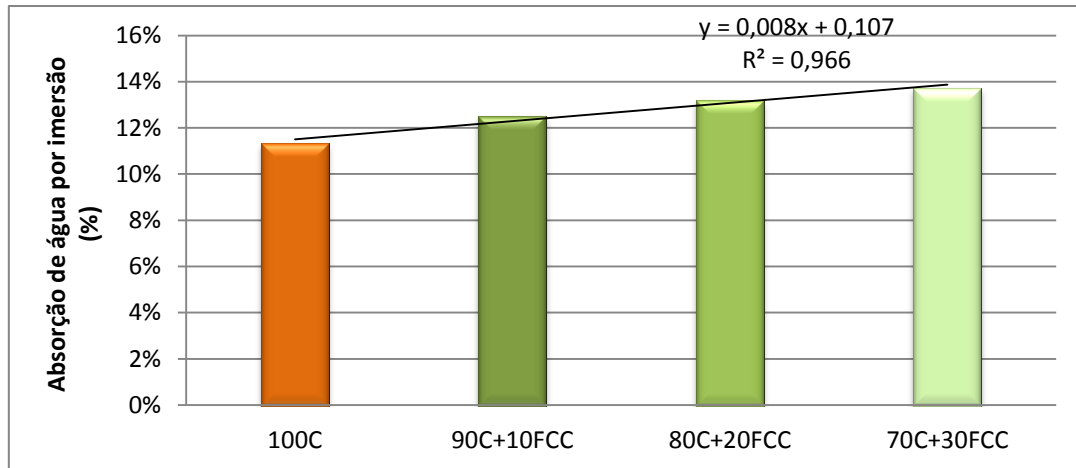


Figura 4.18 – Absorção média de água por imersão (%) aos 28 dias de hidratação, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido. (A linha representada e a respetiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou na relação entre a ascensão de água por imersão em função da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC).

De acordo com os resultados obtidos relativamente à absorção de água por imersão, apresentados no Quadro 4.13 e representados na Figura 4.18, verifica-se que quanto maior a incorporação de catalisador exausto de FCC maior a absorção de água por imersão. Ainda se verifica, uma correlação linear de 0,97 entre a absorção de água por imersão dos betões e o aumento de incorporação de catalisador exausto de FCC.

Da análise dos valores da absorção de água por imersão, o betão conducente a maior absorção de água por imersão é o betão com incorporação de 30 % de catalisador exausto de FCC (70C+30FCC). Neste sentido, de acordo com o constatado no subcapítulo 4.4.4, em que o betão com maior absorção de água por capilaridade é o betão 70C+30FCC, evidencia que este betão conduz a maior absorção tanto por imersão como capilaridade. No entanto, o betão com menor valor de absorção por imersão é o betão de referência (100C), enquanto o menor valor de absorção por capilaridade é o betão com 20 % de incorporação de catalisador exausto de FCC, que poderá estar relacionado com a elevada área superficial específica do catalisador exausto de FCC (subcapítulo 2.4). Neste sentido a comparação dos resultados dos 2 ensaios em estudo não é direta.

A absorção de água por imersão pode estar relacionada, como a absorção de água por capilaridade, com a resistência à compressão dos betões [61]. Neste sentido, avaliou-se a relação da absorção de água por imersão com a resistência à compressão obtida no subcapítulo 4.4.2, para os 28 dias de hidratação, representado na Figura 4.19.

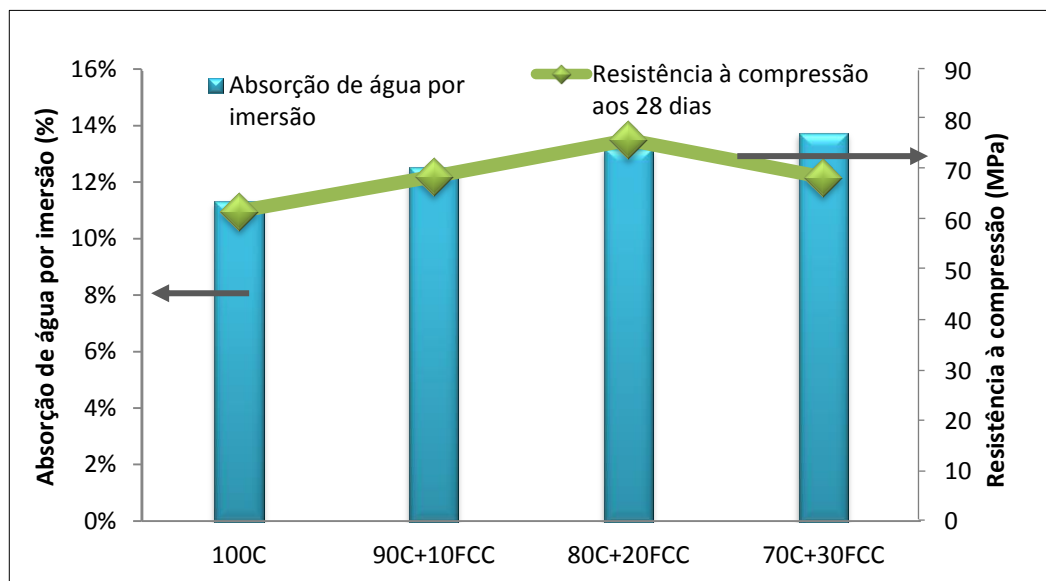


Figura 4.19 – Relação entre a absorção de água por imersão (%) e a resistência à compressão média (MPa) dos 4 traços de betões em estudo, aos 28 dias de hidratação.

Segundo a análise da Figura 4.19, verifica-se que tipicamente, quanto maior o valor de absorção de água por imersão maior o valor de resistência à compressão e assim maior compacidade, para os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC e o betão de referência. Relativamente ao betão 70C+30FCC, evidencia-se o referido anteriormente em que, o betão 70C+30FCC apresenta maior valor de absorção de água por imersão, menor resistência à compressão, e menor valor de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.

4.4.6 Variações dimensionais

As variações dimensionais dos materiais à base de cimento podem ser avaliadas, como referido no subcapítulo 3.7.6 por dois métodos distintos: na ausência de tensões aplicadas e variações de temperatura que se verifica tipicamente a retração do betão ou aplicando uma tensão (provocada pela água da cura, dos provetes imersos em água) que se verifica tipicamente a expansão do betão.

A retração ou a expansão podem ser definidas como as deformações diferidas ou variações volumétricas que ocorrem após a compactação de betões, independentemente de existirem tensões aplicadas ou variações de temperatura nas peças de betão [82].

Os ensaios para a determinação das variações dimensionais foram avaliados em provetes prismáticos, de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo 3.7.6. O primeiro registo considerou-se como a leitura realizada 6 horas após a colocação das pastilhas no provete e sendo, depois, efectuadas leituras depois de passarem 1, 2, 3, 6, 7, 14, 28, 56, 63, 69, e 90 dias depois do primeiro registo.

Os resultados apresentados neste ensaio são obtidos a partir do cálculo da média aritmética dos resultados em dois provetes diferentes do mesmo betão.

- **Avaliação da variação dimensional sem aplicação de tensões**

Na Figura 4.20 apresentam-se os valores da variação dimensional ($m/m \cdot 10^{-6}$) ao longo dos 90 dias de ensaio, para o betão de referência e os betões com adição de catalisador exausto de FCC à temperatura ambiente de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $50 \pm 5\%$, nomeadamente na avaliação da retração do betão (no Anexo F.7 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados).

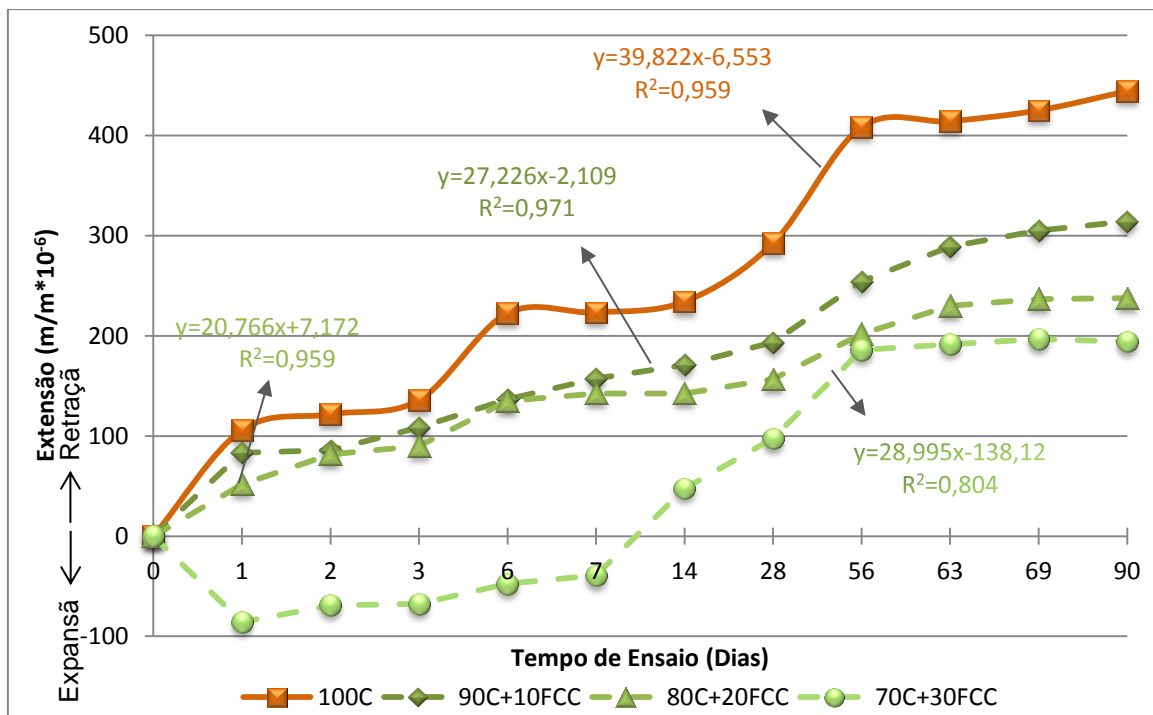


Figura 4.20 – Variação dimensional, ao longo de 90 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido na avaliação da retração. (As expressões das equações representadas, correspondem à correlação linear que se verificou na extensão obtida ao longo do período de ensaio).

De uma forma geral, pela análise da Figura 4.20, verifica-se que à medida que se aumenta a incorporação de catalisador exausto de FCC (10, 20 e 30%) no betão verifica-se uma diminuição da retração. Como referido no subcapítulo 3.7.6, a retração por secagem consiste na evaporação de água ao longo do tempo, diminuindo a quantidade de água na microestrutura do betão, no entanto já referido anteriormente o catalisador exausto de FCC é muito absorvente (subcapítulo 2.4.1), absorvendo a água da amassadura. Neste sentido quanto maior a percentagem de incorporação maior a absorção de água, diminuindo a evaporação de água. Evidenciado na Figura 4.21 aos 90 dias de ensaio, pela correlação linear, com uma alta correlação de aproximadamente 1.

De notar pela análise da Figura 4.20, que o betão com 10 e 20% de adição de catalisador exausto de FCC verifica-se que a retração ocorre de uma forma mais rápida nos primeiros 14

dias de cura, e possuem valores de retração mais elevados, comparativamente ao betão de referência (100C). Enquanto o betão com 30% de substituição apresenta valores de expansão das peças ensaiadas até aos 14 dias de ensaio, especificamente os provetes de betão expandiram até aos 14 dias. Ainda se verifica, a existência de correlação entre a expansão ao longo do tempo.

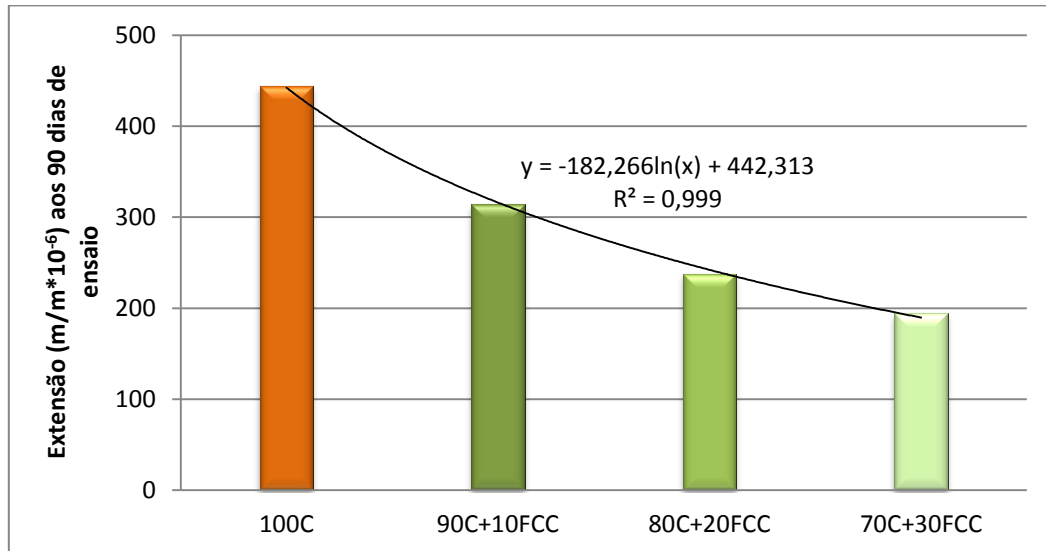


Figura 4.21 – Variação dimensional de retração média aos 90 dias de ensaio para diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição dos betões. (A linha representada, e as respetiva expressão da equação, corresponde à correlação logarítmica que se verificou na relação entre a retração e a percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC ao longo do período de ensaio).

A Figura 4.22 realça a relação entre a absorção de água por imersão e a retração dos vários betões.

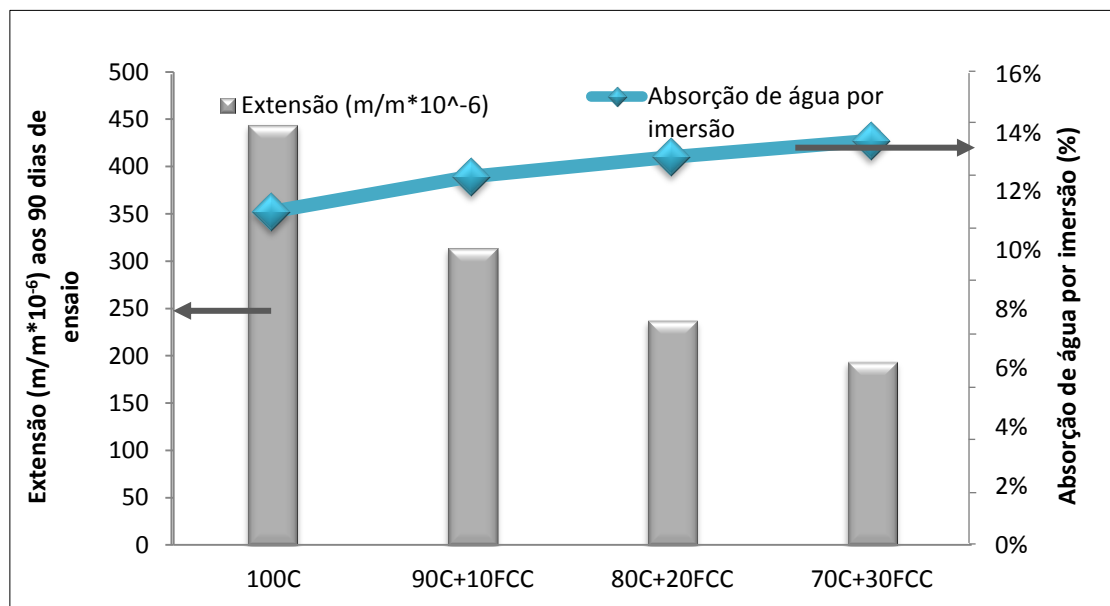


Figura 4.22 – Relação entre a variação dimensional na avaliação da retração (m/m*10⁻⁶) aos 90 dias de ensaio e a absorção de água por imersão (%) dos 4 traços de betões em estudo.

Como é possível observar pela Figura 4.22, existe correlação entre estas propriedades, nomeadamente a retração e a absorção de água por imersão, sendo que, para maiores absorções de água e subseqüentes maiores permeabilidades, os betões estudados apresentam menor retração aos 90 dias de cura. Isto pode ser atribuído ao facto de a absorção no betão resultar da evaporação do excedente de água no seu interior.

- **Avaliação da variação dimensional com aplicação de tensão permanente**

Na Figura 4.23 apresentam-se os valores da variação dimensional ($m/m \cdot 10^{-6}$) ao longo de 90 dias de ensaio, para o betão de referência e os betões com adição de catalisador exausto de FCC quando imersos dentro de água, nomeadamente na avaliação da expansão do betão (no Anexo F.7 apresentam-se as medições experimentais e cálculos efetuados). Após a avaliação da expansão das peças de betão, verificou-se que não existe correlação entre a extensão determinada ao longo do período de ensaio significativo.

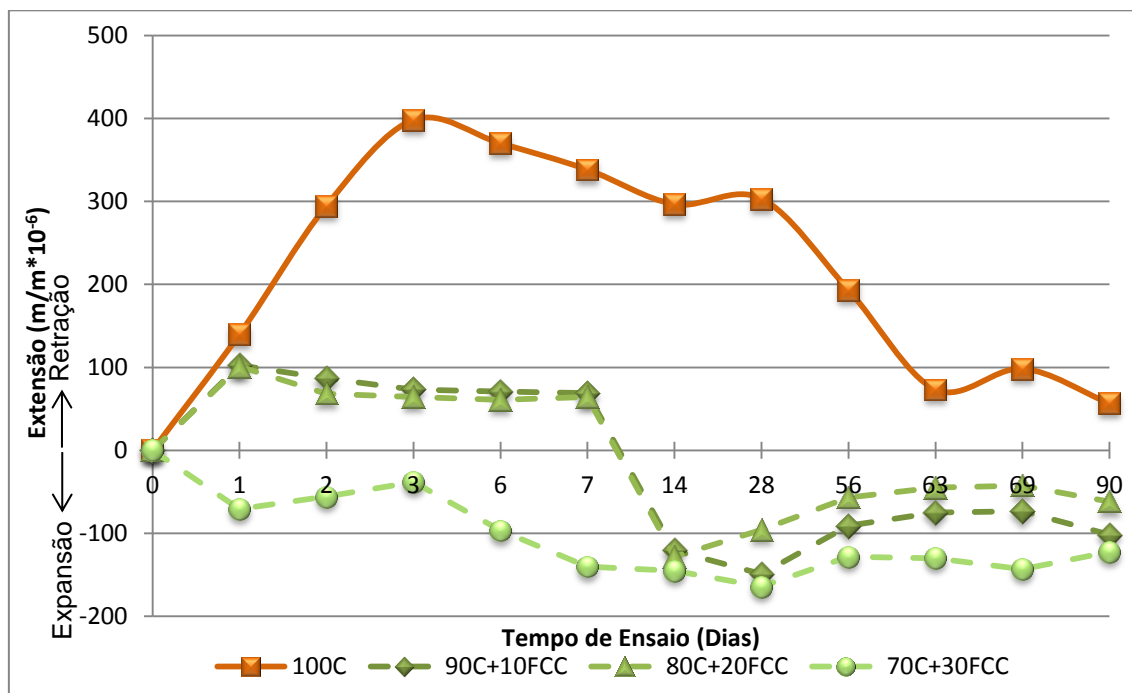


Figura 4.23 – Variação dimensional, ao longo de 90 dias, dos 4 traços de betões em estudo, no estado endurecido, na avaliação da expansão.

Através da análise da Figura 4.23, verifica-se que à medida que se aumenta a incorporação de catalisador exausto de FCC (10, 20 e 30%) no betão ocorre um aumento da expansão depois dos 14 dias. Tal pode ser atribuído ao facto do catalisador exausto de FCC ser muito absorvente, diminuindo a quantidade de água na amassadura do betão como referido para o ensaio da retração (subcapítulo 2.4). Evidenciado na Figura 4.24 aos 90 dias de ensaio, pela correlação logarítmica, com um valor de correlação inferior a 0,80. Neste sentido, verifica-se também que os betões com 10 e 20% até aproximadamente 10 dias de ensaio retraem, sendo

que até aos 90 dias de ensaio expande. Relativamente ao betão de referência, este até aos 90 dias de ensaio retraiu, no entanto após esse período pode expandir, como se pode verificar pela observação da Figura 4.23.

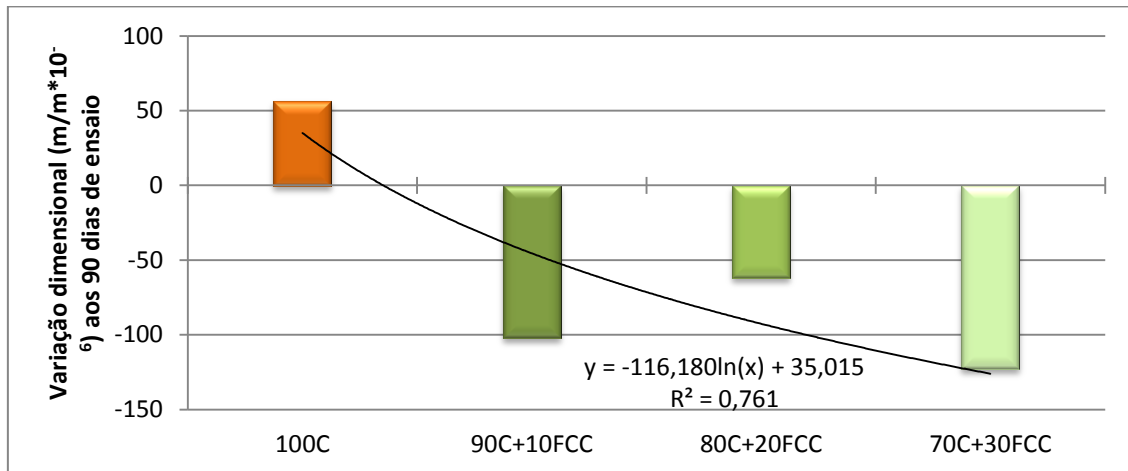


Figura 4.24 – Variação dimensional média aos 90 dias de ensaio para diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição dos betões, na avaliação da expansão.

A Figura 4.25 realça a relação entre a absorção de água por imersão e a expansão nos vários betões.

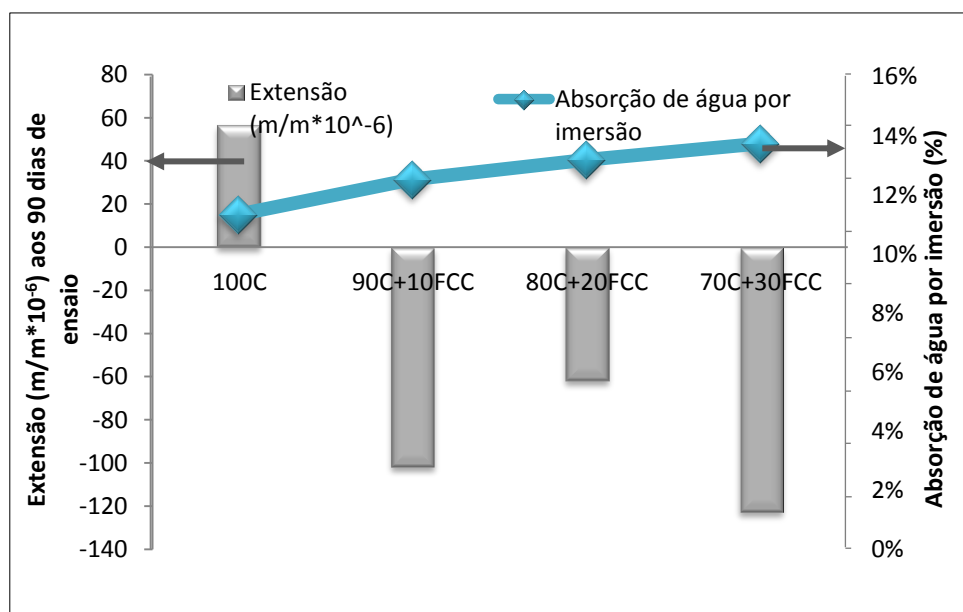


Figura 4.25 – Relação entre a extensão provocada pela expansão (m/m*10⁻⁶) aos 90 dias de ensaio e a absorção de água por imersão (%) dos 4 traços de betões em estudo.

Como é possível observar pela Figura 4.25, existe correlação na tendência entre estas propriedades, sendo que, para maiores absorções de água e subsequentes maiores permeabilidades, os betões estudados apresentam maior expansão aos 90 dias de cura. Tal pode ser atribuído ao facto do catalisador exausto de FCC ser muito absorvente.

4.5 AVALIAÇÃO DO CATALISADOR EXAUSTO DE FCC DE ACORDO COM AS NORMAS EM VIGOR

A comercialização de betão no mercado europeu, exige que sejam verificados os requisitos especificados na norma NP EN 206 - 1, quer para o estado fresco bem como para o estado endurecido [3]. O objetivo da presente dissertação, como referido anteriormente no subcapítulo 1.2, é a avaliação da viabilidade de utilização como adição do tipo II do resíduo de FCC no betão. Assim de forma a sistematizar, com o presente subcapítulo pretende-se realizar o enquadramento normativo dos betões produzidos, relativamente à norma NP EN 206 - 1.

De notar, que se pretende avaliar uma possível adição do tipo II, à qual ainda não se encontra estabelecida uma norma europeia.

Neste sentido, realiza-se a verificação dos requisitos exigidos pela norma NP EN 206 - 1 [3], nomeadamente requisitos da classe de exposição do betão, os requisitos do betão no estado fresco e no estado endurecido (subcapítulo 4.5.1). De seguida, realiza-se também a verificação dos requisitos exigidos pelas normas NP 4220 (“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”) [54], norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”) [55], e norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) [56], uma vez que não existe ainda uma norma para o catalisador exausto de FCC (subcapítulo 4.5.2).

4.5.1 Verificação dos requisitos especificados na norma NP EN 206-1

Segundo o exposto no subcapítulo 2.5 o betão a produzir deve estar de acordo com os requisitos especificados na norma NP EN 206 - 1, nomeadamente: (i) requisitos para os materiais constituintes; (ii) requisitos para a composição de betão; (iii) requisitos relacionados com a classe de exposição do betão; (iv) requisitos para o estado fresco do betão; (v) e requisitos para o estado endurecido do betão [3]. Na campanha experimental considerou-se:

- O teor máximo de cloretos de 1,0% por massa de cimento que corresponde à classe CI 1,0 (Anexo B.2);
- Que se pretendia produzir betões para ambientes ciclicamente húmidos e secos, classificação que corresponde à classe de exposição XC4;
- A classe de consistência avaliada pelo método de abaixamento pelo cone de *Abrams*, S3;
- A classe de resistência do betão de C30/37.

Ainda, na análise de conformidade da resistência à compressão do betão segundo os requisitos para o estado endurecido do betão exigidos pela norma NP EN 206-1 (como referido no subcapítulo 2.5) é necessário que o betão apresente aos 28 dias de hidratação um valor de resistência igual ou superior ao requerido inicialmente. Neste sentido, tendo em conta que se estabeleceu a classe de resistência C30/37 para os betões e que, experimentalmente, os

betões produzidos apresentam os seguintes valores de resistência à compressão em provetes cúbicos aos 28 dias de hidratação (conforme já apresentado no Quadro 4.8):

- 100C – $f_{cm}=62 \text{ N/mm}^2$;
- 90C+10FCC – $f_{cm}=69 \text{ N/mm}^2$;
- 80C+20FCC – $f_{cm}=76 \text{ N/mm}^2$;
- 70C+30FCC – $f_{cm}=69 \text{ N/mm}^2$.

Assim, verifica-se que os betões produzidos apresentam valores superiores ao requerido inicialmente de 37 N/mm^2 (f_{ck}) pelo que estão conforme a norma.

A razão por os betões produzidos apresentarem valores de resistência tão elevados em relação ao requerido inicialmente, poderá residir na quantidade de ligante utilizado, uma vez que se assumiu o valor de $455,71 \text{ Kg/m}^3$ (Anexo D.1), com um limite inferior imposto de 280 Kg/m^3 , de acordo com a especificação do LNEC E 464 [57].

Como descrito no subcapítulo 2.5, após a avaliação dos requisitos especificados na norma NP EN 206 - 1 e tendo em conta os pressupostos impostos para os betões a produzir (subcapítulo 3.1), a designação do betão deve incluir [3]:

- referência à norma NP EN 206 - 1;
- classe de resistência à compressão – obtida aos 28 dias de hidratação, segundo o Quadro 7 da norma NP EN 206 - 1;
- classe de exposição ambiental seguida do código do país – XC4(P);
- classe de teor de cloretos – CI1,0 (Anexo B.2 – e verificou-se que o mesmo é inferior a 1,0% (Quadro 3.3));
- máxima dimensão do agregado mais grosso – $D_{\text{máx}}20\text{mm}$;
- classe de consistência S3.

Neste sentido, as designações dos betões produzidos são:

100C – NP EN 206-1: C50/60•XC4(P)•CI1,0•Dmáx20•S3

90C+10FCC – NP EN 206-1: C55/67•XC4(P)•CI1,0•Dmáx20•S3

80C+20FCC – NP EN 206-1: C60/75•XC4(P)•CI1,0•Dmáx20•S3

70C+30FCC – NP EN 206-1: C55/67•XC4(P)•CI1,0•Dmáx20•S3

4.5.2 Verificação dos requisitos especificados na norma NP 4220, na norma NP EN 450 - 1 e na norma NP EN 13263 - 1

Uma vez que ainda não existe uma norma específica para o catalisador exausto de FCC, optou-se por verificar os requisitos especificados pela norma NP 4220 (“Pozolanas para betão,

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA
CAMPANHA EXPERIMENTAL

argamassas e caldas”) [54], pela norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”) [55], e pela norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) [56] tendo em conta os valores já determinados em trabalhos anteriores e que estão apresentados no Quadro 3.3 e no Quadro 3.4 [38, 39, 58].

No Quadro 4.14, apresentam-se os requisitos químicos exigidos pelas normas referidas no parágrafo anterior, e os dados já obtidos anteriormente para o catalisador exausto de FCC [38, 39, 58].

Quadro 4.14 – Requisitos químicos e critérios de aceitação exigidos pela norma NP 4220 (“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”), norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”), e norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) e os dados do catalisador exausto de FCC.

Propriedades	Critérios de aceitação			Catalisador exausto de FCC (% mássica)
	NP 4220 (% mássica)	NP EN 450 - 1 (% mássica)	NP EN 13263 - 1 (% mássica)	
Perda ao fogo	≤ 9,0%	Categoria A ≤5,0% Categoria B ≤7,0% Categoria C ≤9,0%	≤ 4,0%	1,49%
Cloretos (Cl)	≤ 0,10%	≤ 0,10%	≤ 0,30%	0,01%
Trióxido de enxofre (SO₃)	≤ 3,0 %	≤ 3,0 %	≤ 2,0 %	0,23%
Alcális (expresso em Na₂O_{eq})	≤ 5,0%	≤ 5,0%	-	0,68%
Óxido de cálcio reativo	≤ 10,0%(a)	≤ 10,0%(a)	-	CaO_{Total} = 0,09
Óxido de cálcio livre	≤ 2,5%	≤ 1,5%	≤ 1,0%	-
Dióxido de silício reativo	-	≥ 25%	-	-
Dióxido de silício (SiO₂)	-	A soma deve ser ≥ 70%	Classe 1 ≤ 85% Classe 2 ≤ 80%	39,59%
Óxido de alumínio (Al₂O₃)	-		-	52,81%
Óxido de ferro (Fe₂O₃)	-		-	0,55%
Óxido de magnésio (MgO)	-	≤ 4,0%	-	0,19%
Fosfato (P₂O₅)	-	≤ 5,0%	-	0,06%
Silício (Si)	-	-	≤ 0,4%	-

(a) - Se o total de óxido de cálcio (**CaO_{Total}**) não exceder 10,0% em massa, considera-se que este requisito do óxido de cálcio reativo está satisfeito.

Pela análise do Quadro 4.14, verifica-se que os valores do catalisador exausto de FCC, já determinados anteriormente, estão de acordo com os requisitos químicos exigidos e especificados para as pozolanas, cinzas volantes e sílica de fumo.

No Quadro 4.15, apresenta-se os requisitos físicos exigidos pelas normas referidas acima, e os dados já determinados anteriormente para o catalisador exausto de FCC [38, 39, 58].

Quadro 4.15 – Requisitos físicos e critérios de aceitação exigidos pela norma NP 4220 (“Pozolanas para betão, argamassas e caldas”), norma NP EN 450 - 1 (“Cinzas volantes para betão”), e norma NP EN 13263 - 1 (“Sílica de fumo para betão”) e os dados do catalisador exausto de FCC.

Propriedades	Critérios de aceitação			Catalisador exausto de FCC
	NP 4220	NP EN 450 - 1	NP EN 13263 - 1	
Finura	≤ 40,0%	Categoria N ≤ 40,0% Categoria S ≤ 12,0%	-	-
Massa volúmica das partículas	(a)	(a)	-	2710 Kg/m³
Índice de atividade	(b1)	(b2)	(b3)	90C+10FCC 28d - 105,5% 90C+10FCC 90d - 101,2% 75C+25FCC 28d - 109,2% 75C+25FCC 90d - 105,6%
Expansibilidade	≤ 10 mm	≤ 10 mm (c)	-	80C+20FCC - 0 mm
Tempo de início de presa	(d1)	(d2)	-	100C - 310 min 80C+20FCC - 220 min
Necessidade de água	± 20% (e)	Categoria S - não deve exceder 95% da utilizada para o cimento (e)	-	100C - 24,2% 80C+20FCC - 30,0%
Superfície específica	-	-	≥15,0 m ² /g ≤ 35,0 m ² /g	150,07m²/g
Teor do extrato seco das suspensões	-	-	(f)	-

a - Não deve diferir mais de ± 200 Kg/m³ do valor declarado pelo produtor.

b1 - O índice de atividade deve ser ≥ à percentagem do cimento correspondente à classe de pozolanicidade.

b2 - O índice de atividade aos 28 dias e aos 90 dias não deve ser inferior a 75% e 85%, respetivamente e com 25% de cinzas volantes e 75% de cimento.

b3 - O índice de atividade deve ser no mínimo 100% nas argamassas ensaiadas aos 28 dias, com 90% de cimento e 10% de sílica de fumo.

c - A expansibilidade deve ser determinada numa pasta preparada com 30% de cinzas volantes e 70% de cimento.

d1 - O tempo de início de presa deve ser determinado numa pasta preparada com 25% de cinzas volantes e 75% de cimento, e não deve ser inferior a 120 minutos mais o tempo de início de presa (minutos) de provetes com 100% de cimento.

d2 - O tempo de início de presa deve ser determinado numa pasta preparada com 25% de cinzas volantes e 75% de cimento, e não deve exceder mais de duas vezes o tempo de início de presa de uma pasta de cimento constituída por 100% de cimento.

e - Preparado numa argamassa com 30% de substituição.

f - O teor de extrato seco não deve diferir do valor indicado pelo fornecedor em mais do que ± 2% em massa.

Pela análise do Quadro 4.15 verifica-se exceto a superfície específica, que os valores do catalisador exausto de FCC estão de acordo com a norma genérica para pozolanas, a das cinzas volantes para betão e da sílica de fumo para betão. De notar, que a expansibilidade deveria ter sido obtida numa pasta com 30% de substituição, no entanto à presente data ainda não tinha sido determinada para a respetiva substituição por catalisador exausto de FCC, optando-se por verificar para 20% de substituição. O mesmo se verifica para o tempo de início de presa e necessidade de água.

Neste sentido, o catalisador exausto de FCC está de acordo com os requisitos exigidos pelas normas em análise neste subcapítulo.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente capítulo são expostas as conclusões retiradas da realização deste estudo que consistiu na avaliação dos efeitos da incorporação do catalisador exausto de FCC, como adição do tipo II, nas propriedades de betões tanto no estado fresco e como no estado endurecido. A realização da campanha experimental englobou a preparação de betões com quatro traços diferentes correspondentes à substituição parcial de cimento por 0, 10, 20 e 30% (em massa) de catalisador exausto de FCC.

De seguida, apresentam-se as conclusões do efeito da substituição de cimento por catalisador exausto de FCC, para os betões no estado fresco e no estado endurecido. Por fim, propõem-se as sugestões de atividades a realizar em desenvolvimentos futuros no âmbito da investigação da utilização do catalisador exausto de FCC como adição, no subcapítulo 5.1.

Ensaio no estado fresco

Dos resultados dos ensaios de estado fresco pode reter-se as seguintes conclusões:

- Nos betões preparados com diferentes percentagens de substituição de cimento verifica-se que o aumento do teor de catalisador na mistura de betão, traduz-se na diminuição da consistência do betão pelo método de abaixamento;
- Em termos gerais verifica-se que o aumento da substituição de cimento por catalisador exausto de FCC origina betões com massas volúmicas inferiores, quando comparados com o betão de referência. Adicionalmente, um maior valor de massa volúmica está tipicamente associado um maior valor de consistência por abaixamento;
- O aumento da substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC nos betões verifica-se que existe uma ligeira tendência para o aumento do teor de ar. Embora se verifique que o aumento da percentagem de resíduo incorporado no betão, não apresenta uma tendência definida na variação do teor de ar, no estado fresco. Adicionalmente verifica-se, tipicamente, que o maior valor de massa volúmica está associado um menor valor de teor de ar.

Ensaio no estado endurecido

No que se referem às conclusões das propriedades avaliadas no estado endurecido, destacam-se as seguintes:

- Os valores da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, avaliada em provetes cúbicos, evidenciam que, os betões com substituição de cimento de 10% (em massa) por catalisador exausto de FCC, são mais compactos. Adicionalmente verifica-se

tipicamente, o aumento da idade de cura dos betões conduz ao aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas;

- O ensaio de resistência à compressão, revela que o betão com 30% de catalisador exausto de FCC apresenta uma evolução da resistência à compressão mais lenta em relações aos betões com substituição e o betão de referência, nas idades de 3 e 7 dias, aumentando aos 14 dias. Enquanto o betão com 10 e 20 % de substituição verifica-se que têm uma resistência à compressão superior ao betão de referência (100C) e ao betão com 30% de substituição, logo a partir dos 3 dias de cura. Adicionalmente verifica-se o aumento da resistência à compressão dos betões ao longo do tempo;
- A incorporação de catalisador exausto de FCC nos betões, verifica-se que proporciona ganhos de resistência à compressão, em particular para o betão com 20% (em massa) de catalisador exausto de FCC;
- Os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que apresentam índice de atividade pozolânica desde os 3 dias de idade, apresentando valores de IA superiores para os betões com 10 e 20% de incorporação de catalisador exausto de FCC, comparativamente ao betão com 30% de substituição;
- No que respeita ao ensaio de índice de esclerómetro (dureza superficial) verifica-se, um incremento do índice esclerométrico ao longo do tempo, tal como a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas;
- Na avaliação da resistência à compressão, de forma indireta, pelo método do índice de esclerómetro, verifica-se que existe uma tendência definida na evolução da resistência à compressão, uma vez que à medida que o índice esclerométrico aumenta, aumenta a resistência à compressão. Contudo, verifica-se que a resistência à compressão estimada pelo índice de esclerómetro não deve ser usada como informação fiável para todos os betões;
- Na análise da resistência à compressão obtida experimentalmente e pelo índice de esclerómetro, verifica-se, que os valores de resistência à compressão estimados pelo equipamento de medida do índice esclerométrico são sempre inferiores, aos obtidos pelo método destrutivo experimentalmente;
- No que diz respeito ao comportamento face à absorção de água por capilaridade, verifica-se que, ocorre a diminuição da absorção de água por capilaridade para nos betões com 10 e 20% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC, e o aumento para no betão com 30% de substituição de cimento. Adicionalmente, verifica-se que tipicamente a um menor valor de absorção de água por capilaridade está associado um maior valor de resistência à compressão;
- Os resultados obtidos pelo ensaio de absorção de água por imersão, evidenciam que, o aumento de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição do betão, aumenta linearmente a absorção de água por imersão. Adicionalmente, verifica-se que quanto menor o valor da absorção de água por imersão, maior a resistência à compressão;

- Pelos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão, verifica-se que o betão com 30% de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC é o betão mais poroso, uma vez que apresenta maior valor de absorção de água por imersão e por capilaridade e conseqüentemente menor valor de resistência à compressão, e menor valor de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas;
- No que diz respeito às variações dimensionais dos betões em estudo, na ausência de tensões aplicadas e variações de temperatura do qual tipicamente ocorre retração, verificou-se que a retração diminui à medida que aumenta a incorporação de catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento. Enquanto, aplicando uma tensão (provocada pela água da cura, dos provetes imersos em água), do qual tipicamente ocorre a expansão do betão, a expansão aumenta;
- Adicionalmente, verifica-se que perante a ausência de tensões aplicadas e variações de temperatura para menores retrações do betão maior a absorção de água por imersão, enquanto perante a aplicação uma tensão (provocada pela água da cura, dos provetes imersos em água) para maiores expansões do betão maior a absorção de água por imersão, exceto o betão com 20% de adição de catalisador exausto de FCC.

Avaliação do catalisador exausto de FCC de acordo com as normas em vigor

No que se referem às conclusões dos betões com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC de acordo com a norma NP EN 206 - 1 [3], destacam-se as seguintes:

- Dos requisitos exigidos pela norma verifica-se que os betões produzidos com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC estão de acordo com os mesmos, nomeadamente: (i) requisitos para os materiais constituintes; (ii) requisitos para a composição de betão; (iii) requisitos relacionados com a classe de exposição do betão; (iv) requisitos para o estado fresco do betão; (v) e requisitos para o estado endurecido do betão [3].
- O betão de referência e os betões com adição de catalisador exausto de FCC satisfazem os requisitos mecânicos para os ensaios iniciais exigidos pela na norma NP EN 206 - 1 [3], uma vez que a classe de resistência do betão pretendida na campanha experimental era de C30/37 e os valores experimentais de resistência à compressão obtidos aos 28 dias de cura são superiores a $37+12 \text{ N/mm}^2$;

No que se referem às conclusões do catalisador exausto de FCC de acordo com a norma NP 4220 [54], pela norma NP EN 450 - 1 [55], e pela norma NP EN 13263 - 1 [56], destacam-se as seguintes:

- Dos requisitos químicos exigidos pelas respetivas normas e os critérios de aceitação, verifica-se que o catalisador exausto de FCC da refinaria de Sines da Petrogal encontra-se de acordo com o critério de aceitação;

- Dos requisitos físicos exigidos pelas respetivas normas e os critérios de aceitação, verifica-se que o catalisador exausto de FCC da refinaria de Sines da Petrogal encontra-se de acordo com o critério de aceitação. No entanto a superfície específica do catalisador é superior à exigida para sílica de fumo, e a finura exigida para as pozolanas e cinzas volantes não foi determinada.

A principal conclusão a retirar desta dissertação pela análise e observação dos resultados obtidos, é que se verifica um grande potencial de utilização do catalisador exausto de FCC enquanto adição ao betão, pois a sua incorporação fez aumentar a sua resistência mecânica. Assim a viabilidade da incorporação catalisador estudado fornece ainda a possibilidade de reutilizar um resíduo da indústria petrolífera e a diminuição da necessidade de recorrer à extração de recursos naturais para a fabricação do clínquer/cimento.

5.1 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a conclusão desta dissertação subsistem, ainda, questões que poderão ser esclarecidas através da realização de estudos futuros. Neste sentido apresentam-se de seguida algumas propostas para trabalhos futuros:

- Mantendo as mesmas características desta campanha experimental, analisar o efeito de incorporação da adição para a percentagem de 25 % de substituição de cimento;
- Realizar mantendo as mesmas características desta campanha experimental, ensaios de aferição de durabilidade, tais como: migração de iões de cloro, permeabilidade ao oxigénio, resistividade elétrica, difusão de cloretos, resistência à carbonatação, etc;
- Realizar outros ensaios mecânicos, tais como: compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à flexão, etc, mantendo as mesmas características desta campanha experimental;
- Avaliar o processo da corrosão das armaduras no betão utilizando catalisador exausto de FCC oriundo da refinaria de Sines;
- Avaliar o comportamento acústico e térmico de betões com incorporação de catalisador exausto de FCC;
- Avaliar a contribuição do betão com adição de catalisador exausto de FCC na mitigação do impacto ambiental causado pela indústria cimentícia, em termos de ciclos de vida;
- Avaliar os custos associados à reutilização do resíduo (transporte, deposição de subprodutos, licenças, entre outros).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COUTINHO, J – Betões eco-eficientes com resíduos. Porto: 1as Jornadas de Materiais na Construção, 2011. pp. 171-214.
- [2] REIS, R – Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino. Minho: Universidade do Minho, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [3] NP EN 206 – 1. Junho 2007, Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Caparica: IPQ.
- [4] PAYÁ, J. et al – Reusing of spent FCC catalyst as a very reactive pozzolanic material: formulation of high performance concretes. Espanha: Valencia.
- [5] PACEWSKA, B. et al. – Modification of properties of concrete by a new pozzolan a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. 32ª ed.: Cement and Concrete Research, 2002. pp. 145-152.
- [6] CUNHA, A. – Caracterização e estudo de aplicação de rejeito catalítico de unidade FCC como material pozolânico. Brasil, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Química, 2012. Dissertação de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.
- [7] ZORNOZA, E. et al. – Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement. 3ª ed.: Advances in Cement Research v. 19, 2007. pp 117-124.
- [8] TSENG, Y. et al. – The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. 11ª ed.: Cement and Concrete Research v. 29, 2005. pp. 782-787.
- [9] CONCEIÇÃO, M. – Reutilização do Catalisador exausto da Industria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [10] FAUSTINO, R. – Produção de Argamassas de Cimento com Incorporação de um Resíduo da Refinação de Petróleo. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [11] AFONSO, D. – Efeito da moagem do catalisador exausto de cracking catalítico nas propriedades de argamassas de cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [12] ANTÓNIO, J. – Estudo de viabilidade da produção de betões auto-compactáveis com incorporação de catalisador exausto da indústria petroquímica. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

- [13]BRITO, N. – Efeito da incorporação de resíduo da indústria petrolífera na durabilidade de argamassas de reparação de estruturas de betão. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [14]FERREIRA, C. – Os gases de efeito de estufa e a problemática da responsabilidade social e ambiental das empresas portuguesas: o caso das cimenteiras. Lisboa: Instituto Superior de Contabilidade e Administração, 2010. Dissertação de Mestrado em Contabilidade e Administração.
- [15]LACASTA, N.; BARATA,P. – O protocolo de quioto sobre alterações climáticas : análise e perspectivas. Programa: Clima e Eficiência Energética, Julho 1999. pp. 1-23.
- [16]TORGAL, F.; JALALI, S. – Eco-eficiência dos materiais de construção. Revista APCMC nº 147 ISSN 8443-4194, Janeiro 2010. pp 47-71.
- [17]CIMPOR, CIMENTOS DE PORTUGAL, SGPS, S.A. Relatório de Sustentabilidade '09. Lisboa: [s.n.], 2010. pp. 1-161.
- [18]NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association – Concrete CO2 Fact cheet. Publication Number 2PCO2 February 2012. Pp. 1-13.
- [19]WORRELL, E. et al. – Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. 1ª.ed. v.26,2001. pp. 303-329.
- [20]USA, World Business Council for Sustainable Development. International Energy Agency – Home/By Topic/Technology Roadmaps [em linha]. North America: BN, 2009- Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmmap.pdf (bom para a cena de 2050)> [Acedido em 25 09 2013]
- [21]IAPMEI – Rede de Gabinetes de Empresa – Branca Soares. Contributo para o conhecimento no contexto internacional do sector OPMNM - vidro e artigos de vidro, produtos cerâmicos e do barro, cimento e betão, trabalho de pedra e OPMNM diversos. s.l. : IAPMEI - Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas, 2007.
- [22]GALLY,C. – Desenvolvimento de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental contendo resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo. Brasil, Salvador: Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana.
- [23]AZEVEDO, A. – Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes. Minho: Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2002. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor.
- [24]FRAGATEIRO, P. – Influência do Ligante no Desempenho do Betão. Porto: Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

- [25] NEVILLE, M.; AND AİTCIN, P. – High-performance concrete – an overview, *Materials and structures / Matériaux et constructions*. 1998, v. 31, Number 206, March. pp. 111-117;
- [26] COUTINHO, J. – *Materiais de Construção 2*. Porto: Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2002 (actualizado em 2006) pp. 36-137.
- [27] NP EN 197-1 Abril 2001, Cimento – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Caparica: IPQ.
- [28] COSTA, C. – Ligantes Hidráulicos (2012) in “CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO”, M. Clara Gonçalves • Fernanda Margarido (Ed.), ISTPress.
- [29] COUTINHO, J. – *Materiais de Construção 1*. Porto: Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 1999.
- [30] NP EN 12620: 2004, Agregados para o betão, Caparica: IPQ.
- [31] NP EN 934-1: 2008, Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem, Caparica: IPQ.
- [32] NP EN 934-2: 2009, Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Requisitos gerais, Caparica: IPQ.
- [33] UZAL, B.; TURANLI, L. – “Blended Cements Containing High Volume of Natural Zeolite: Properties, Hydration and Paste Microstructure,” *Cement and Concrete Composites*, v. 34, 2012. pp. 101-109.
- [34] SAMPAIO, J.; COUTINHO, J.; SAMPAIO, M. – Melhoria do desempenho de betões por metacaulino. Foz do Iguaçu, Brasil: Instituto Brasileiro do Concreto, Agosto de 2001. 43º Congresso Brasileiro do concreto.
- [35] SILVA, A. – Estudo da durabilidade de betão estrutural com resíduos agroindustriais. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [36] TORGAL, F.; JALALI, S. – Betão Eco- Eficiente: O Futuro da Indústria do Betão Pronto. APEB- Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, Abril 2011. pp 22 -27.
- [37] KRUGER, F. et al. – Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto. Brasil: Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão. Coordenação do Curso de Tecnologia em: 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química.

- [38] COSTA, C.; MARQUES, P. – “Low-Carbon Cement with Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation, San Antonio - Texas, EUA : IEEE/PCA Cement Industry Conference, Maio 2012.
- [39] COSTA, C.; MARQUES, P.; CARVALHO, P. – Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Binary Blended Cement Mortars Containing Waste Oil-Cracking Catalyst, Trondheim, Norway: International Congress on Durability of concrete CDC2012-D-11-00106R1, Junho 2012.
- [40] GOOGLE docs, Portugal. Disponível em: < <http://www.fcmc.es.gov.br/download/Petroleo.pdf> > [Acedido em 25 8 2013].
- [41] Portal laboratórios virtuais de processos químicos – Caso de estudo. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=415>. [Acedido em 4 9 2013].
- [42] PORTUGAL, Galp Energia – Pesquisa/Fundamentos de Refinação. Lisboa: BN, 2010. Disponível em: < <http://www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/Paginas/Didatico-Refinacao.aspx>>. [Acedido em 5 09 2013].
- [43] DIRECTÓRIO DE ARTIGOS GRATUITOS – Artigonal. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/educacao-online-artigos/a-refinacao-do-petroleo-4168842.html>>. [Acedido em 5 09 2013].
- [44] COSTA, R. – Utilização de Catalisadores de Cracking catalítico na despolimerização do poli (metracrilato de metilo). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de ciências e Tecnologias, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.
- [45] MARTÍNEZ, L. – Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC). Espanha Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2007. Tesis Doctoral
- [46] PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. – Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures. 29^a ed.: Cement and Concrete Research, 1999. pp. 1773-1779.
- [47] AL-JABRI, k. et al – Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand in cement mortars. Construction and Building Materials, ELSEVIER, 2012.
- [48] PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.; VELÁZQUEZ, S. – Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Termogravimetric analysis studies on FC3R- Portland cement pastes. 33^a ed.: Cement and Concrete Research, 2003. pp. 603-609.

- [49] TROCHEZ, J.; AGREDO, J.; GUTIÉRREZ, R. – Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas com catalisador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refineria colombiana. Ver.Fac. Ing. Univ Antioquia. V.55, 2010 pp. 26-34.
- [50] PACEWSKA, B.; WILINSKA, I.; KUBISSA, J. – Use of spent catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive. 322^a.ed: Thermochemica acta, 1998. pp. 175-181.
- [51] PINTO, C.; BUCHLER, P.; DWECK, J. – Pozzolanic proprieties of a residual FCC catalyst during the early stages of cement hydrataion. Evaluation by thermal analysis. Journal of a Thermal Analysis and Calorimetry, v.87, 2007. pp. 715.
- [52] WU, J.; Wu, W.; HSU, K. – The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars, 33.Cement and Concrete Research. 2003. pp. 245-253.
- [53] CASTELLANOS, N.; AGREDO, J.; GUTIÉRREZ, R. – Performance under sulfate attack of concrete additioned with fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC) and metakaolin (MK). Ingenieria e Investigación. V.33. No.1. April 2013. pp. 18-22.
- [54] NP 4220: 2010, Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade. Caparica: IPQ.
- [55] NP EN 450 – 1: 2012, Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Caparica: IPQ.
- [56] NP EN 13263 – 1: 2005+A1 2009, Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Caparica: IPQ.
- [57] E464, 2007, Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais. Documentação normativa – Especificação LNEC, MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [58] COSTA, C.J.M.; FERREIRA, P.; CARVALHO, P. A. Microstructural Analysis of Cement Pastes Blended With Waste Catalysts from Oil Refinery. Glasgow, UK.: European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, 2009.
- [59] NEPOMUCENO, M. - Estudo da composição de betões. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica para carreira de docente universitário. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 1999.
- [60] NP EN 933 - 1: 2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração, Caparica: IPQ.
- [61] NP EN 933 - 2: 1999, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas, Caparica: IPQ.

- [62] NP EN 1097 - 6: 2003, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, Caparica: IPQ.
- [63] GAMEIRO, F. – Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados finos de resíduos da indústria do mármore. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [64] NP EN 1097 - 3: 2002, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e volume de vazios, Caparica: IPQ.
- [65] NP EN 933 - 4: 2002, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de Forma, Caparica: IPQ.
- [66] NP EN 12350 - 2: 2009, Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento, Caparica: IPQ.
- [67] ANDRÉ, A. – Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [68] NP EN 12350 - 6: 2009, Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica, Caparica: IPQ.
- [69] NP EN 12350 - 7: 2009, Ensaio do betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos, Caparica: IPQ.
- [70] NEPOMUCENO, M. – Ensaio não-destrutivos em betão. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica para carreira de docente universitário. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 1999.
- [71] MOREIRA, A. – Aplicação de ultrasons na análise de materiais à base de cimento. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [72] NP EN 12504 - 4: 2007, Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, Caparica: IPQ.
- [73] NP EN 12390 - 1: 2012, Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes, Caparica: IPQ.
- [74] NP EN 12390 - 2: 2009 Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, Caparica: IPQ.
- [75] NP EN 12390 - 3: 2009 Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes, Caparica: IPQ.
- [76] SAMPAIO, C. – Caracterização do betão através de técnicas não-destrutivas. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

- [77] NP EN 12504 – 2: 2012, Ensaios do betão nas estruturas. Parte 4: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico, Caparica: IPQ.
- [78] E 393: 1993, Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Documentação normativa – Especificação LNEC, MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [79] E 394: 1993, Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. Documentação normativa – Especificação LNEC, MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [80] BOGAS, J. – Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida. Volume II. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2011. Dissertação para obtenção do grau de doutor em engenharia civil.
- [81] NSAMBU, R; GOMES, A. – Avaliação da retracção de argamassas de reparação para betão armado.
- [82] Nunes, A.; Gonçalves, A; Ribeiro, B.; Esteves, P.; Silva J. – Atenuar os efeitos da retracção do betão. *Arte&Construção*, Nº 170, Novembro 2004, pp54-66.
- [83] SILVA, P. – Avaliação da durabilidade de betões autocompactáveis (BAC). Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2013. Dissertação para obtenção do grau de doutor em engenharia civil.
- [84] COSTA, A.; APPLETON, J. – Estruturas de betão I. Parte II – Materiais. Instituto Superior Técnico. Departamento de engenharia civil, 2002.
- [85] E 398: 1993, Betões. Determinação da retracção e da expansão. Documentação normativa – Especificação LNEC, MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [86] ASTM C311-07: 2007, Standard Test Methods for Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland – cement concrete. [EUA]: American Society for Testing and Materials International, 1-10p.
- [87] BOTTEGA, F. – Análise do ensaio esclerométrico, um ensaio não destrutivo, nas estruturas de concreto. Criciúma: Universidade do extremo sul catarinense – UNESC, 2010. Trabalho de conclusão de curso para obtenção de grau de Engenheiro Civil.

ANEXOS

ANEXO A – PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A.1 – CALENDARIZAÇÃO DAS ATIVIDADES



ABRIL 2013		AM - Amassadura E.F. - Ensaios no estado fresco E.R/E - Ensaio de retração e expansão E. R.C - Ensaio de resistência à compressão/Velocidade de Ultrasons/ Índice esclerômetro			Colocar CAP em estufa - colocar os provetes de capilaridade em estufa E. Cap - Ensaio de capilaridade E. Im - Ensaio de imersão		
		Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.
1	2	3	4	5	6	7	
8	9	10	11	12	13	14	
15	16	17	18	19	20	21	
22	23	24	25	26	27	28	
	Recepção do cimento						
29	30	1	2	3	4	5	
Ensaios experimentais no estado fresco dos betões: 100C; 90C+10FCC; 80C+20FCC; 70C+30FCC.		FERIADO					

MAIO 2013

AM - Amassadura
 E.F. - Ensaios no estado fresco
 E./E - Ensaio de retração e expansão
 E. R.C - Ensaio de resistência à compressão/Velocidade de Ultrasons/ Índice esclerômetro

Colocar CAP em estufa - colocar os provetes de capilaridade em estufa
 E. Cap - Ensaio de capilaridade
 E. Im - Ensaio de imersão

Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
29	30	1	2	3	4	5
		FERIADO				
6	7	8	9	10	11	12
	100C - AM - E.F. (73l)(14:00) 90C+10FCC - AM - E.F. (20l)(14:30) 80C+20FCC - AM - E.F. (20l)(15:00) 70C+30FCC - AM - E.F.(20l)(15:30)	Desmoldar 100C (14:00) Desmoldar 90C+10FCC (14:30) Desmoldar 80C+20FCC(15:00) Desmoldar 70C+30FCC (15:30) 100C E. R/E (1d) (17:00)	100C E. R/E (2d) (17:00)	100C E. R/E (3d) (17:00)		
13	14	15	16	17	18	19
	90C+10FCC - AM - E.F. (109l)(15:00) 100C E. R/E (7d)(17:00)	Desmoldar 90C+10FCC (15:00) 90C+10FCC E. R/E (1d) (18:00)	90C+10FCC E. R/E (2d) (18:00)	90C+10FCC E. R/E (3d) (18:00) 90C+10FCC E. R.C (3d) (15:00)		
20	21	22	23	24	25	26
80C+20FCC - AM - E.F. (111l)	70C+30FCC - AM - E.F. (111l)(14:00) Desmoldar 80C+20FCC(15:00) Colocar CAP 100 C em estufa 90C+10FCC E. R.C (7d)(15:00) 80C+20FCC E. R/E (1d) (17:00) 100C E. R/E (14d)(17:00)	Desmoldar 70C+30FCC (14:00) 80C+20FCC E. R/E (2d) (17:00)	80C+20FCC E. R.C (3d) (15:00) 80C+20FCC E. R/E (3d) (17:00)	70C+30FCC E. R.C (3d) (14:00)		
27	28	29	30	31	1	2
80C+20FCC E. R.C (7d)(15:00) 80C+20FCC E. R/E (7d)(17:00)	100C - AM - E.F. (44l)(11:30) 70C+30FCC - AM - E.F. (71l)(12:00) Colocar CAP 90C+10 FCC em estufa 70C+30FCC E. R.C (7d)(14:00) 90C+10FCC E. R.C (14d)(15:00) 90C+10FCC E. R/E (14d)(18:00)	Desmoldar 100C (11:30) Desmoldar 70C+30FCC (12:00) 70C+30FCC E. R/E (1d) (17:00)	70C+30FCC E. R/E (2d) (17:00)	100C E. R.C (3d) (11:30) 70C+30FCC E. R/E (3d) (17:00)		

JUNHO 2013

AM - Amassadura
 E.F. - Ensaios no estado fresco
 E.R/E - Ensaio de retração e expansão
 E. R.C - Ensaio de resistência à compressão/ Velocidade de Ultras-
 sons/ Índice esclerômetro

Colocar CAP em estufa - colocar os provetes de
 capilaridade em estufa
 E. Cap - Ensaio de capilaridade
 E. Im - Ensaio de imersão

Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9
80C+20FCC E. R.C (14d)(15:00) 80C+20FCC E. R/E (14d)(17:00) Colocar CAP 80C+20FCC em estufa	100C E. R.C (7d) (11:30) 70C+30FCC E. R.C (14d)(14:00) 100C E.Cap (10min, 1,3,4,6h) (15:20) 100C E. R/E (28d)(17:00) 70C+30FCC E. R/E (7d) (17:00)	100C E.Cap (24h) (15:20)		100C E.Cap (72h) (15:20)		
10	11	12	13	14	15	16
FERIADO	100C E. R.C (14d) (11:30) 90C+10FCC E.Im (28d)(14:00) 90C+10FCC E. R.C (28d)(15:00) 90C+10FCC E.Cap (10min, 1,3,4,6h) (16:00) 70C+30FCC E. R/E (14d) (17:00) 90C+10FCC E. R/E (28d)(18:00) Colocar CAP 70C+30FCC em estufa	90C+10FCC E.Cap (24h)(16:00)	FERIADO	90C+10FCC E.Cap (72h) (16:00)		
17	18	19	20	21	22	23
80C+20FCC E.Cap (10min, 1,3,4,6h) (14:00) 80C+20FCC E.Im (28d)(15:00) 80C+20FCC E. R.C (28d)(15:00) 80C+20FCC E. R/E (28d)(17:00)	80C+20FCC E.Cap (24h)(14:00) 70C+30FCC E. R.C (28d)(14:00)		80C+20FCC E.Cap (72h)(14:00)			
24	25	26	27	28	29	30
	100C E. R.C (14d) (11:30) 100C E.Im (28d)(12:00) 70C+30FCC E. R/E (28d) (17:00) 70C+30FCC E.Cap (10min, 1,3,4,6h) (11:00) 70C+30FCC E.Im (28d)(12:00)	70C+30FCC E.Cap (24h)(11:00)		70C+30FCC E.Cap (72h)(11:00)		

JULHO 2013

AM - Amassadura
 E.F. - Ensaios no estado fresco
 E.R/E - Ensaio de retração e expansão
 E. R.C - Ensaio de resistência à compressão/ Velocidade de
 Ultra-sons/ Índice esclerómetro

Colocar CAP em estufa - colocar os provetes de
 capilaridade em estufa
 E. Cap - Ensaio de capilaridade
 E. Im - Ensaio de imersão

Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
1	2	3	4	5	6	7
	100C E. R.C (56d) (14:00) 90C+10FCC E. R.C (56d)(14:30) 80C+20FCC E. R.C (56d)(15:00) 70C+30FCC E. R.C (56d)(15:30) 100C E. R/E (56d) (17:00)					
8	9	10	11	12	13	14
	100C E. R/E (63d) (17:00) 90C+10FCC E. R/E (56d)(18:00)					
15	16	17	18	19	20	21
80C+20FCC E. R/E (56d)(17:00) 100C E. R/E (69d) (17:00) 90C+10FCC E. R/E (63d)(18:00)						
22	23	24	25	26	27	28
90C+10FCC E. R/E (69d)(18:00) 80C+20FCC E. R/E (63d)(17:00)	70C+30FCC E. R/E (56d) (17:00)					
29	30	31	1	2	3	4
80C+20FCC E. R/E (69d)(17:00)	70C+30FCC E. R/E (63d) (17:00)					

AGOSTO 2013

AM - Amassadura
 E.F. - Ensaio no estado fresco
 E.R/E - Ensaio de retração e expansão
 E. R.C - Ensaio de resistência à compressão/Velocidade de Ultra-sons/ Índice esclerómetro

Colocar CAP em estufa - colocar os provetes de capilaridade em estufa
 E. Cap - Ensaio de capilaridade
 E. Im - Ensaio de imersão

Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
100C E. R.C (90d) (14:00) 90C+10FCC E. R.C (90d)(14:30) 80C+20FCC E. R.C (90d)(15:00) 70C+30FCC E. R.C (90d)(15:30) 100C E. R/E (90d) (17:00) 70C+30FCC E. R/E (69d) (17:00)						
12	13	14	15	16	17	18
90C+10FCC E. R/E (90d)(15:00)			FERIADO			
19	20	21	22	23	24	25
80C+20FCC E. R/E (90d)(16:00)						
26	27	28	29	30	31	1
70C+30FCC E. R/E (90d) (16:00)						

ANEXO B – TABELA DA ESPECIFICAÇÃO DO LNEC

B.1 – LIMITES PARA AS CARACTERÍSTICAS DO BETÃO (EXTRAÍDO DE: E464: 2007)

B.2 – MÁXIMO TEOR DE CLORETOS DO BETÃO (EXTRAÍDO DE: NORMA NP EN 206 -1:
2007)

B.1 – LIMITES PARA AS CARACTERÍSTICAS DO BETÃO (EXTRAÍDO DE: E464: 2007)

Limites para as características do betão						
Tipo de Cimento ⁽¹⁾	Classe de exposição	Recobrimento Mínimo [mm]	Dosagem de cimento mínima [kg/m ³]	Razão A/C Máxima	Classe de resistência mínima	
					Betão normal	Betão leve
---	X0	---	---	---	C12/15	---
CEM I CEM III/A ⁽²⁾	XC1	25	240	0,65	C25/30	LC25/28
	XC2	35				
	XC3	35	280	0,60	C30/37	LC30/33
	XC4	40				
	XS1/XD1 ⁽⁴⁾	45	360	0,45	C40/50	LC40/44
	XS2/XD2 ⁽⁴⁾	50				
	XS3/XD3 ⁽⁴⁾	55	380	0,40	C50/60	LC50/55
	XF1	---	280	0,60	C30/37	LC30/33
	XF2 ⁽⁵⁾	---		0,55		
	XA1 ⁽⁴⁾	---	340	0,50	C35/45	LC35/38
	XA2 ⁽⁴⁾	---	360	0,45	C40/50	LC40/44
XA3 ⁽⁴⁾	---	380				
CEM III/B ⁽²⁾ CEM III/A ⁽³⁾ CEM IV ⁽³⁾ CEM V/A ⁽³⁾	XC1	25	260	0,65	C25/30	LC25/28
	XC2	35				
	XC3	35	300	0,55	C30/37	LC30/33
	XC4	40				
	XF1	---				
XF2 ⁽⁵⁾	---		0,50			
CEM IV/A CEM IV/B CEM III/A CEM III/B CEM V CEM III/B CEM III/A-D	XS1/XD1	45	320	0,55	C30/37	LC30/33
	XS2/XD2	50				
	XS3/XD3	55	340	0,45	C35/45	LC35/38
	XA1	---	320	0,55	C30/37	LC30/33
	XA2	---	340	0,50	C35/45	LC35/38
	XA3	---	360	0,45		

(1) de acordo com a especificação E 464, em vez dos cimentos indicados, podem ser utilizadas misturas, obtidas pela junção de um cimento do tipo CEM I ou CEM III/A com adições, cuja composição resultante seja equivalente à de um dos cimentos indicados;
(2) não aplicável aos cimentos III/A-T e III/A-W e aos cimentos III/B-T e III/B-W, respectivamente;
(3) não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer portland, em massa;
(4) não aplicável aos cimentos II-T, II-W, III/B-L e III/B-LL;
(5) teor mínimo de ar de 4%.



B.2 – MÁXIMO TEOR DE CLORETOS DO BETÃO (EXTRAÍDO DE: NORMA NP EN 206 -1: 2007)

Utilização do betão	Classe do teor de cloretos ^{a)}	Máximo teor de Cl ⁻ por massa de cimento ^{b)}
Sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	1,0 %
Com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Com aço de pré-esforço	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %
<p>^{a)} Para um uso específico do betão, a classe a aplicar depende das disposições válidas no local de utilização do betão **.</p> <p>^{b)} Quando forem utilizadas adições do tipo II e quando estas forem consideradas para a dosagem de cimento, o teor de cloretos é expresso em percentagem de íões cloreto por massa de cimento mais massa total das adições consideradas.</p>		



ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS

C.1 – CIMENTO PORTLAND (CEM I 42,5 R)

C.2 – SIKAPLAST 898



Cimento Portland CEM I 42,5R



NP EN 197-1 0856

▶ Constituintes

Clínquer $\geq 95\%$
 Constituintes adicionais minoritários $\leq 5\%$
 Sulfato de cálcio regulador de presa



▶ Características

▶ Químicas

Perda ao fogo (P.F.) $\leq 5,0\%$
 Resíduo insolúvel (R.I.) $\leq 5,0\%$
 Sulfatos (SO_3) $\leq 4,0\%$
 Cloretos (Cl) $\leq 0,10\%$

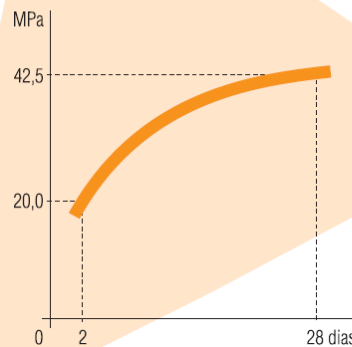
▶ Físicas

Início de presa (min) ≥ 60
 Expansibilidade (mm) ≤ 10

▶ Mecânicas

Resistência à compressão
 Valores mínimos
 2 dias: 20,0 MPa
 28 dias: 42,5 MPa

Resistência mecânica à compressão
 Curva de crescimento mínimo



▶ Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento

- ▶ Desenvolvimento rápido das resistências mecânicas
- ▶ Elevadas resistências a todas as idades
- ▶ Particularmente adequado para Classes de Exposição XC

Cimento Portland
 CEM I 42,5R



► Utilizações recomendadas

- **Betão armado**
Indicado indistintamente para todas as classes de resistência com especial vantagem nas de C30/37 a C45/55
Com desempenho mecânico elevado a 28 dias
- **Pré-fabricação**
Elementos estruturais em betão armado e pré-esforçado
- **Pavimentos rodoviários**
Camadas de desgaste para pavimentos fortemente solicitados
- **Caldas de injeção de uso generalizado**

► Acondicionamento



Pallet
49 Sacos de 35 kg - 1715 kg



Pacote
55 Sacos de 35kg - 1925 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



Granel
25 toneladas

► Precauções na aplicação

- Evitar tempos de transporte elevados no caso de betão pronto
- Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- Assegurar uma cura e proteção adequadas de acordo com as disposições normativas
- Betonagem em tempo quente e seco

► Contra-indicações

- Contacto com ambientes agressivos (águas e solos)
- Betonagem em grandes massas
- Argamassas de uso geral

► Ambiente e Segurança

- Usar vestuário de proteção, luvas e equipamento protector para a vista/face adequados
- Quando ensacado contém redutor de crómio (VI) cujo período de eficácia é de dois meses após a data de ensacagem
- Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança



SERVIÇO COMERCIAL
Av. Severiano Felício, 6 - Edifício CIMPOR - 2589-524 PÓVOA VELHA
TEL: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 60

SERVIÇO TÉCNICO-COMERCIAL
Av. Severiano Felício, 6 - Edifício CIMPOR - 2589-524 PÓVOA VELHA
TEL: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 54

SERVIÇO DE CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO
S. Pedro Fino - Mira - Apartado 1025 - 4449-609 ERVIMENSE
TEL: 22 868 80 00 - Fax: 22 867 18 38

www.cimpor-portugal.pt
Dcomercio@cimpor.com

Ficha de Produto
 Edição de Dezembro 2009
 Nº de identificação: 1.91 FC
 Versão nº 1
 SikaPlast® 898



SikaPlast® 898

Powered by ViscoCrete®

Superplastificante de elevado desempenho

Construction

Descrição do produto SikaPlast® 898 é um superplastificante para betão e argamassa que resulta dos últimos desenvolvimentos da tecnologia ViscoCrete®. Cumpre os requisitos da Norma NP EN 934-2: T 3.1/3.2, como superplastificante forte redutor de água para betão.

Utilizações SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.
 SikaPlast® 898 permite a fabricação de:

- Betões plásticos a fluidos.
- Betões com diferentes razões A/C.
- Betão bombeado para longas distâncias.
- Betão com agregados britados.
- Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.

Nos betões fluidos, SikaPlast® 898 confere à composição uma boa robustez às variações da água e dos diferentes constituintes e assim melhora a estabilidade, limitando os riscos de segregação, comparando com os adjuvantes inicialmente desenvolvidos à base de poliacrilatos.

Características / Vantagens O SikaPlast® 898 é um superplastificante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:

- Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.
- Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daí resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compactidade elevada e de permeabilidade muito baixa.
- Boas resistências iniciais e finais.
- Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.
- Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.
- Bom aspecto da superfície na descofragem
- Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências.

SikaPlast® 898 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.

Certificados / Boletins de ensaio Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.

Dados do produto

Aspecto / Cor Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.

Fornecimento 200 litros; 1000 litros (1 m³); granel.



SikaPlast® 1/3

Armazenagem e conservação	O produto deve estar armazenado nas embalagens de origem não encetadas e não deterioradas, ao abrigo da radiação do sol e da geada, a temperaturas entre +5 °C e +35 °C. Conserva-se 1 ano após a data de fabrico.
Dados técnicos	
Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.
Massa volúmica (23 ± 2 °C)	1,07 ± 0,02 kg/dm ³ .
pH (23 ± 2 °C)	5,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	32,0 ± 2 %.
Teor em iões cloreto	< 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo / Dosagem	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> ■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento. ■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de $\frac{2}{3}$ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energicamente cerca de 1 minuto/m ³ ; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.
Aplicação	SikaPlast® 898 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação, a cura do betão e validada a sua aplicabilidade às condições locais.
Compatibilidade	SikaPlast® 898 pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Rapid. ■ Sikacrete®. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Com água.

Importante	<p>Recomenda-se a realização de ensaios prévios sempre para se verificar da adequabilidade do adjuvante ao fim a que se destina, para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere algum componente na composição do betão.</p> <p>Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.</p> <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
Nota	<p>Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaios realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.</p>

Risco e segurança

Medidas de segurança	<p>Mercadoria não perigosa para transporte.</p> <p>Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE.</p> <p>Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.</p>
-----------------------------	--

"O produto está seguro na C² Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.



Sika Portugal, SA
 R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
 4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12
 Portugal www.sika.pt



ANEXO D – METODOLOGIA UTILIZADA PARA O CÁLCULO DOS BETÕES

D.1 – MÉTODO DE FAURY

D.1 – MÉTODO DE FAURY

1º Passo – Fixação dos pressupostos do betão a produzir

A produção de um determinado betão deve ter em conta vários pressupostos, nomeadamente: o ambiente a que estrutura ficará exposta; a consistência que se pretende; a classe de resistência à compressão; o tipo de cimento; qualquer requisito para agregados expostos; qualquer requisito relacionado com o recobrimento das armaduras; entre outras tendo em conta a norma NP EN 206-1: 2007 [3].

Após a fixação dos pressupostos, recorre-se à especificação do LNEC E464: 2007, tendo em conta a durabilidade e retira-se: a dosagem de cimento mínima, a razão a/c (água/cimento) máxima, a classe de resistência à compressão mínima e o recobrimento mínimo do betão [57].

2º Passo – Fixação da máxima dimensão do agregado

A máxima dimensão corresponde à menor abertura do peneiro que retém no máximo 10% da massa dos agregados.

Segundo Faury, o efeito de parede pode ser desprezado quando a relação entre a máxima dimensão do agregado e o raio médio do molde em que o betão será colocado (R) respeita a seguinte equação [59, 67]:

$$\frac{R}{D_{\text{máx}}} > 0,75 \leftrightarrow D_{\text{máx}} < \frac{4}{3}R \quad \text{Eq. D.4}$$

Sendo,

R – Raio médio do molde ou raio hidráulico (mm), determinado pela equação seguinte:

$$R = \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante desse volume de betão}} \quad \text{Eq. D.5}$$

$D_{\text{máx}}$ – Dimensão máxima do agregado (mm).

Relativamente ao efeito de segregação é contabilizado pela relação entre a máxima dimensão do agregado ($D_{\text{máx}}$), e o raio médio da malha da armadura ou de uma fenda (ρ). Se não se conhecer o projeto estrutural admite-se $R/D_{\text{máx}} = 1$ e que não existe segregação [59, 67].

3º Passo – Estimativa do valor médio da tensão de rotura à compressão (f_{cm})

Uma vez definida a classe de resistência pretendida, o valor da resistência média compressão aos 28 dias pode ser determinado recorrendo à seguinte equação:

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda \cdot S_n \quad \text{Eq. D.6}$$

Sendo,

f_{cm} – valor médio da rotura à compressão (Mpa);

f_{ck} – valor característico de resistência à compressão (Mpa);

λ - Parâmetro estatístico que depende do nível de probabilidade associado ao número de amostras, este parâmetro assume o valor de 1,64 quando este número é suficientemente elevado [59];

S_n – Desvio padrão em função das condições de produção do betão (Quadro D.1).

Segundo Nepomuceno (1999) [59] os valores expectáveis para o desvio padrão para betões com resistências médias à compressão superior a 35 Mpa estão descritos no Quadro D.1. Dado que a campanha experimental decorreu em ambiente de laboratório, os constituintes do betão obtêm-se a partir da sua massa, considerou-se adotar o valor de 4,4 para o desvio padrão, correspondente a um bom grau de controlo de produção.

Quadro D.1- Desvios padrão em função das condições de produção do betão. Fonte: [59].

Medição dos componentes		Grau de controlo da produção	Desvio padrão (Mpa)
Cimento	Agregados		
Massa (servomecanismo)	Massa (servomecanismo)	Fraco	5,6
		Normal	4,6
		Bom	3,6
Massa	Massa	Fraco	6,5
		Normal	5,4
		Bom	4,4
Massa	Volume	Fraco	7,2
		Normal	6,0
		Bom	4,7
Volume	Volume	Fraco	7,6
		Normal	6,5
		Bom	5,2

4º Passo – Índice de vazios (I_v)

O índice de vazios descreve a proporção entre os constituintes não sólidos e a totalidade do betão. Assim, corresponde à soma dos volumes de água e ar presentes por unidade de volume de betão após betonagem.

Segundo Faury, pode ser estimado recorrendo à expressão seguinte (Eq.D.4):

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}}} + \frac{K'}{D_{m\acute{a}x} - 0,75} \quad \text{Eq. D.7}$$

Sendo,

I_v – Índice de vazios (l/m^3);

K e K' – parâmetros que dependem da natureza dos agregados, trabalhabilidade e dos meios de colocação (Quadro D.2);

R – Raio médio do molde ou raio hidráulico (mm);

D_{máx} – máxima dimensão do agregado (mm).

Quadro D.2 - Parâmetro K e K' para a determinação do índice de vazios. Fonte: [59]

Consistência	Meios de colocação	Valores de K			Valores de K'
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado	Agregado grosso britado	
Terra Húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 0,24	≤ 0,25	≤ 0,27	0,002
Seca	Vibração potente	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
Plástica	Vibração média	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,34	0,003
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,39 a 0,40	0,003
Fluída	Sem nada	≥ 0,36	≥ 0,38	≥ 0,40	0,004

5º Passo – Volume de vazios e quantidade de água necessária (A)

O betão no estado fresco necessita de ser vibrado para remover o excesso de ar presente na sua matriz e, apesar de este processo demonstrar bons resultados, é impossível retirá-lo completamente. O volume ocupado pelo ar existente no interior do betão denomina-se por volume de vazios (V_v), e é necessário conhecê-lo para uma correta caracterização do betão a produzir, no entanto este é um valor difícil de estimar. O *American Concrete Institute* (ACI), na sua norma 613, propõe valores médios para o volume de vazios através de relações empíricas, exclusivamente em função da máxima dimensão do agregado, bem como Sousa Coutinho como se pode observar no Quadro D.3. [67]

Quadro D.3 - Valores do volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado

Volume de vazios do betão compactado							
Máxima dimensão dos agregados (mm)	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	76,2
Volume de vazios (litros de ar/m ³ de betão)	30	25	20	15	10	5	3

Como os valores tabelados são resultados de relações obtidas empiricamente, é admissível a interpolação de valores para estimativa do volume de vazios.

Como descrito, o índice de vazios (I_v) traduz a necessidade de água e o volume de ar presentes por unidade de volume de betão. Deste modo, a dosagem de água (A) necessária para a produção de betão por unidade de volume pode ser determinada, sem erro significativo, pela expressão:

$$I_v = A + V_v \Leftrightarrow A = I_v - V_v \quad \text{Eq. D.8}$$

Sendo,

A - dosagem de água de amassadura (l/m^3);

l_v - índice de vazios, determinado no 4º passo (l/m^3);

V_v - volume de vazios (l/m^3).

6º Passo – Quantidade de ligante (L)

Como o método de Faury não permite determinar a dosagem de material cimentício (L) necessária para obter o valor de resistência à compressão pretendida aos 28 dias, foi necessário recorrer a outros autores para garantir valores coerentes para este parâmetro. Optou-se por impor uma dosagem de cimento através da fórmula de Bolomey:

$$f_c = 0,55f_{cm} \left(\frac{L}{A+V_v} - 0,5 \right) \quad \text{Eq. D.9}$$

Sendo,

f_c – valor estimado da resistência do betão aos 28 dias (Mpa);

f_{cm} – valor médio da rotura à compressão (Mpa);

L – dosagem de material cimentício (kg/m^3);

A – dosagem de água (kg/m^3);

V_v – volume de vazios (l/m^3).

A dosagem de material cimentício (L) pode ser retirada por interpolação pelo Quadro D.4.

Quadro D.4 - Ordens de grandeza para as dosagens de material cimentício pela fórmula de Bolomey (kg/m^3).

Classes Dmáx	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
12,7	330	335	385	420	490	540	560
19,1	310	325	360	400	460	510	550
25,4	290	315	340	380	430	480	530
38,1	270	300	325	360	400	450	500

7º Passo – Dosagem de adjuvante e redução da água de amassadura (A')

A dosagem necessária de adjuvante a introduzir no betão deve ser de acordo com a ficha técnica do fabricante.

Pela Eq.D.7 obtém-se a redução de água de amassadura:

$$A' = A - Ae \quad \text{Eq. D.10}$$

Sendo,

A' – dosagem de água corrigida (l/m^3);

A - dosagem de água de amassadura, determinado n 5º passo (l/m^3);

A_e – dosagem de adjuvante (l/m^3).

8º Passo – Correção do Índice de vazios

O novo valor do índice de vazios (I'_v) será dado pela expressão:

$$I'_v = A' + V_v \quad \text{Eq. D.11}$$

Sendo,

I'_v – índice de vazios corrigido (l/m^3);

A' - dosagem de água de amassadura corrigida, determinado n 7º passo (l/m^3);

V_v - volume de vazios, determinado no 5º passo (l/m^3).

9º Passo – Razão A/L

Uma vez obtidos os valores das dosagens de água e do material cimentício, determinou-se através da Eq.D.9 a relação de água/material cimentício (A/L):

$$\frac{A}{L} \quad \text{Eq. D.12}$$

Sendo,

A' – dosagem de água de amassadura corrigida, determinado n 7º passo (kg/m^3);

L – Dosagem de material cimentício, determinado no 6º passo (kg/m^3).

10º Passo – Dosagem de cimento (C) e de adição (A_o) e respetivos volumes

A dosagem da adição pode ser determinada pela expressão a baixo (Eq.D.10), tendo em conta a percentagem de substituição do cimento.

$$A_o = L \times A_{o/L} \% / 100 \quad \text{Eq. D.13}$$

Sendo,

A_o – Dosagem da adição (kg/m^3);

L – Dosagem de material cimentício, determinado no 6º passo (kg/m^3);

$A_{o/L} \%$ = Percentagem de substituição da adição.

Assim a massa de cimento de acordo com a expressão (Eq.D.11) é de:

$$C = L - A_o \quad \text{Eq. D.14}$$

Sendo,

C – dosagem de cimento (kg/m^3);

L – Dosagem de material cimentício, determinado no 6º passo (kg/m^3);

O volume ocupado pelas partículas de cimento (m^3/m^3), num metro cúbico de betão, é determinado pela expressão:

$$V_C = \frac{C}{\delta_C} \quad \text{Eq. D.15}$$

Sendo,

V_C – volume das partículas de cimento (m^3/m^3);

C – dosagem de cimento (kg/m^3);

δ_C – massa específica do cimento (kg/m^3).

O volume ocupado pelas partículas da adição (m^3/m^3), num metro cúbico de betão, é determinado pela expressão:

$$V_{A_0} = \frac{A_0}{\delta_{A_0}} \quad \text{Eq. D.16}$$

Sendo,

V_{A_0} - volume das partículas de adição (m^3/m^3);

A_0 – dosagem adição, determinado no 10º passo (kg/m^3);

δ_{A_0} – massa específica da adição (kg/m^3).

11º Passo – Volume das partículas cimentícias

O volume das partículas cimentícias pode ser dado pela soma dos volumes das partículas de cimento e das partículas de adição, conforme a equação:

$$V_L = V_C + V_{A_0} \quad \text{Eq. D.17}$$

Sendo,

V_C – volume das partículas de cimento, determinado no 10º passo (m^3/m^3);

V_{A_0} - volume das partículas de adição, determinado no 10º passo (m^3/m^3).

12º Passo – Razão A/C

A razão água/cimento pode ser determinada pela equação seguinte, tendo em conta a razão água/ligante.

$$\frac{A}{C} = \frac{\frac{A}{L}}{\left(1 - \frac{A_0/L}{100}\right)} \quad \text{Eq. D.18}$$

Sendo,

A/L – razão determinada no 9º passo;

$A_{0/L}\%$ = Percentagem de substituição da adição.

13º Passo – Volume das partículas sólidas (V_s) e volume das partículas de agregado (V_i)

A composição do betão considerando a unidade de volume do betão é dado por:

$$V_L + V_a + V_w + V_{Ae} + V_v = 1 \quad \text{Eq. D.19}$$

Sendo,

V_L – volume das partículas cimentícias, determinado no 11º passo (m^3/m^3);

V_a – volume de agregados (m^3/m^3);

V_w – volume de água (m^3/m^3);

V_{Ae} – volume da quantidade de adjuvante (m^3/m^3).

V_v – volume de vazios, determinado no 5º passo (m^3/m^3).

Assim o volume das partículas de agregado (V_i) pode ser dado por:

$$V_a = 1 - V_L - V_w - V_{Ae} \quad \text{Eq. D.20}$$

O volume das partículas sólidas (V_s) compreende o volume ocupado pelos agregados e pelo cimento, e pode ser determinado através da expressão:

$$V_s = V_L + V_a \Leftrightarrow V_s = 1 - I_v \quad \text{Eq. D.21}$$

Sendo,

V_s – volume das partículas sólidas (m^3/m^3);

V_L – volume das partículas cimentícias, determinado no 11º passo (m^3/m^3);

V_a – volume de agregados (m^3/m^3);

I_v – índice de vazios, determinado no 8º passo (m^3/m^3).

14º Passo – Percentagem do volume de material cimentício relativamente ao volume sólido

A dosagem dos agregados depende do volume que as partículas de cimento e da adição ocupam no volume global das partículas sólidas e pode ser determinada através da expressão seguinte:

$$L\% = \frac{V_L}{V_s} \times 100 \quad \text{Eq. D.22}$$

Sendo,

L% -percentagem de material cimentício (%);

V_L – volume das partículas cimentícias, determinado no 11º passo (m^3/m^3);

V_s – volume das partículas sólidas, determinado 13º passo (m^3/m^3).

15º Passo – Curva de referência de Faury

O método da curva de referência de Faury permite determinar a proporção de cada um dos agregados do betão, de forma a torná-lo o mais compacto possível, enquanto considera a presença dos restantes constituintes sólidos da mistura, de modo que a curva granulométrica daí resultante (curva real) se aproxime da curva de referência.

A curva de referência de Faury é constituída por dois segmentos de reta definida por 3 pontos, representados num diagrama em que as abcissas apresentam uma escala proporcional à raiz quinta da dimensão das partículas, assumindo valores de 0,0065 mm, a menor dimensão das partículas do cimento, e $D_{m\acute{a}x}$. As ordenadas apresentam uma escala linear correspondente à percentagem de material que passa em cada peneiro [59]. Os pontos são dados por:

○ **Ponto 1**

Abcissa: 0,0065 mm

Ordenada: 0,0%

○ **Ponto 2**

Abcissa: $\frac{D_{m\acute{a}x}}{2}$ Eq. D.23

Ordenada: $P = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75}$ Eq. D.24

Sendo,

A e B – parâmetros em função da natureza do agregado, meio de compactação e consistência, conforme o Quadro D.5.

○ **Ponto 3**

Abcissa: $D_{m\acute{a}x}$

Ordenada: 100,0%

Quadro D.5 - Valores dos parâmetros A e B em função da natureza do agregado, meio de compactação e consistência.

Consistência	Meios de colocação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado	Agregado grosso britado	
Terra Húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluída	Sem nada	32	34	38	2

Com base nos três pontos, atrás referidos e através da dedução da percentagem de material cimentício, é possível determinar a curva de Faury sem cimento, através de três pontos, nomeadamente:

○ **Ponto A**

Abcissa: 0,0065 mm

$$\text{Ordenada: } 100,0\% \times \frac{(0,0\% - L\%)}{(100,0\% - L\%)} \quad \text{Eq. D.25}$$

○ **Ponto B**

$$\text{Abcissa: } \frac{D_{\text{máx}}}{2}$$

$$\text{Ordenada: } 100,0\% \times \frac{(P\% - L\%)}{(100,0\% - L\%)} \quad \text{Eq. D.26}$$

○ **Ponto C**

Abcissa: $D_{\text{máx}}$

Ordenada: 100,0%

O Quadro D.6 sistematiza a determinação da curva de Faury sem cimento, designada como curva de referência. Conhecida a curva de Faury com e sem cimento, procede-se à representação gráfica dos dois segmentos que a constituem, como representado na Figura D.1. E calcula-se o módulo de finura da curva de referência (MF_{ref}), através da equação:

$$MF_{\text{ref}} = \frac{P_{31,5} + P_{16} + P_8 + P_4 + P_2 + P_1 + P_{0,5} + P_{0,25} + P_{0,125} + P_{0,063}}{100} \quad \text{Eq. D.27}$$

Sendo,

MF_{ref} – módulo de finura da curva de referência;

Pi – percentagem do material retido acumulado da curva de referência, obtido graficamente (%).

Quadro D.6 - Coordenadas da curva de Faury sem cimento.

Abcissas	Curva de Faury com cimento	Cimento reduzido na curva de Faury	Curva de Faury sem cimento
Dmáx	100,0%	(100,0% - L%)	Ponto C
Dmáx/2	P%	(P% - L%)	Ponto B
0,0065	0,0%	(0,0% - L%)	Ponto A

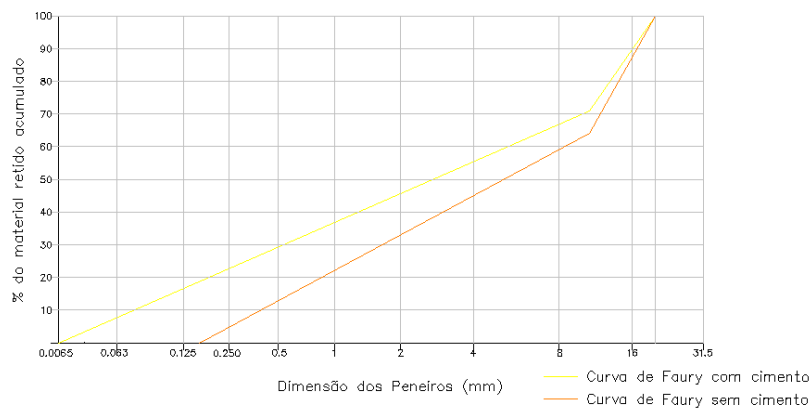


Figura D.1 – Curva de Faury sem cimento e curva de Faury com cimento.

A proporção de cada agregado é deduzida graficamente a partir da curva de Faury sem cimento. O método requer traçar uma linha vertical que divida duas curvas granulométricas contíguas, para que as áreas adjacentes intersectadas sejam iguais para as duas curvas granulométricas. A percentagem de cada agregado é definida pela diferença entre as ordenadas dos pontos onde as linhas verticais cruzam a curva de Faury sem cimento, conforme ilustra a Figura D.2.

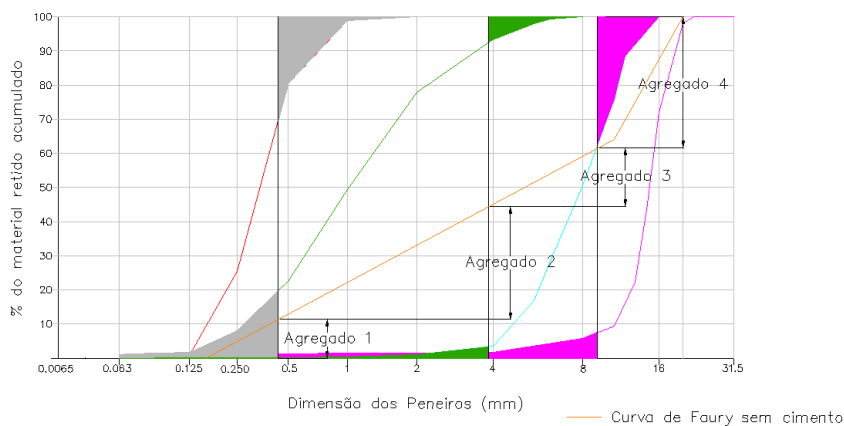


Figura D.2 – Percentagem de agregados pelo Método de Faury.

Uma vez determinadas as proporções de cada agregado, devem ser corrigidas. De modo a que a curva real se sobreponha à curva de referência (curva de Faury sem cimento) com o intuito

de melhorar a compacidade entre os agregados. Em que a curva real é definida pela multiplicação de cada proporção de agregado pela percentagem de material retido em cada peneiro dos agregados. Como ilustra a Figura D.3 a curva de referência não se sobrepõe com a curva real o que traduz numa má compacidade entre os 4 agregados. Por este motivo será necessário realizar a correção de cada proporção dos agregados por forma a garantir uma boa compacidade como pode-se ver na Figura D.4.

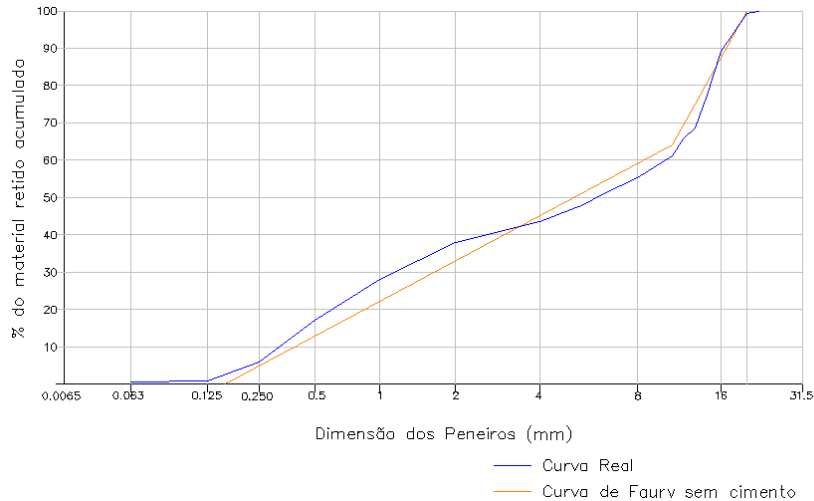


Figura D.3 – Curva de Faurv sem cimento e curva real antes de realizar a correção da proporção dos agregados através do módulo de finura.

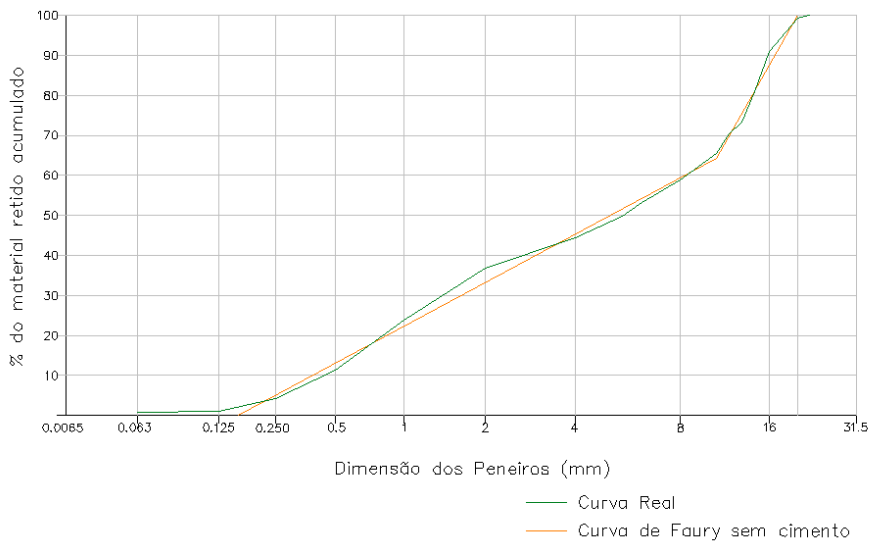


Figura D.4 – Curva de Faurv sem cimento e curva real depois de realizar a correção da proporção dos agregados através do módulo de finura.

A correção da proporção dos agregados é realizada pela variação das proporções dos agregados de modo a que o produto dos seus módulos de finura pela sua proporção se aproxime do módulo de finura da curva de referência, como demonstra o Quadro D.7.

Quadro D.7 – Aproximação do módulo de finura da curva real ao módulo de finura da curva de referência. $l_i\%$ é percentagem do volume das partículas do agregado i em relação ao volume do total do betão; $l'_i\%$ é percentagem corrigida do volume das partículas do agregado i em relação ao volume do total do betão; MF_i é o módulo de finura do agregado i .

Agregado	Módulo de finura (MF _i) (1)	Inicial		Corrigido	
		$l_i\%$ (2)	$MF_i \times l_i\%/100$ (3)	$l'_i\%$ (4)	$MF_i \times l'_i\%/100$ (5)
Areia					
Brita 1					
...					
Brita n					
			Σ		
				Σ	

Na coluna 1 inserem-se os módulos de finura de cada agregado (MF_i). Na coluna 2 as respetivas percentagens ($l_i\%$) determinadas pela construção geométrica. O módulo de finura da curva real do betão será determinado na coluna 3, traduzindo-se pelo somatório do produto do módulo de finura de cada agregado (coluna 1) pela percentagem com que este entra na mistura (coluna 2) dividida por 100.

Se o resultado final obtido (MF_{real}) na coluna 3 se aproximar com o módulo de finura da curva de referência (MF_{ref}), determinado no 15º passo, não será necessária qualquer correção e as percentagens obtidas serão as finais. Caso contrário, se for registada uma diferença significativa, terá que proceder-se à correção das percentagens dos agregados. Como tal, na coluna 4 de forma aleatória introduz-se as variações às percentagens, tendo em conta que o somatório dessas percentagens deverá ser igual ao da coluna 2. O módulo de finura da curva real corrigido será determinado na coluna 5 traduzindo-se pelo somatório do produto do módulo de finura de cada agregado (coluna 1) pela percentagem com que este entra na mistura (coluna 4) dividida por 100. Se o resultado obtido se aproximar com o módulo de finura da curva de referência ($MF_{realcorrigido} \approx MF_{ref}$), as percentagens corrigidas serão as finais.

16º Passo – Determinação das dosagens dos agregados, em kg/m³

A dosagem em massa (kg/m³), com que cada agregado entra na constituição do betão é dada pela seguinte equação:

$$Q_i = \frac{(l_i\%) \times V_a}{100} \times \delta_i \quad \text{Eq. D.28}$$

Sendo,

Q_i – dosagem, em massa, do agregado i (kg/m³);

δ_i – massa volúmica do agregado i (kg/m³);

$l'_i\%$ – % corrigida do volume das partículas do agregado i , determinada no 15º passo;

V_a – volume do total dos agregados na composição do betão, determinado no 13º passo (m³/m³).

ANEXO E – ESTUDOS REALIZADOS AOS AGREGADOS

E.1 – FICHAS DE RESULTADOS DOS AGREGADOS



E.1 – FICHAS DE RESULTADOS DOS AGREGADOS

Areia 0/2	
1. Análise granulométrica (NP EN 933 - 1: 2000; NP EN 933 - 2: 1999)	
Peneiros (mm)	% do material passado
31,5	100,000
22,4	100,000
20	100,000
16	100,000
14	100,000
12,5	100,000
11,2	100,000
10	100,000
8	100,000
6,3	100,000
5,6	100,000
4	100,000
2	99,991
1	99,022
0,5	80,458
0,25	25,375
0,125	0,813
0,063	0,166

Propriedades	Dados
P	0,17
%f	0,240
MF	1,943

Legenda: P - percentagem do material retido no fundo; %f - percentagem de finos que passa o peneiro 0,063 mm; MF - módulo de finura.

| **2. Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097 - 6: 2003)** | |

Propriedades	Dados
ρ_a (Kg/m ³)	2646,5
ρ_{rd} (Kg/m ³)	2616,4
ρ_{ssd} (Kg/m ³)	2616,3
WA₂₄ (Kg/m ³)	0,434

Legenda: ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas (Kg/m³); ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa (Kg/m³); ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Kg/m³); WA₂₄ - Absorção de água (em percentagem de massa seca) após imersão durante 24h.

| **3. Baridade e volume de vazios (NP EN 1097 - 3: 2002)** | |

Propriedades	Dados
ρ_t (Kg/m ³)	1500,0
%v	42,7

Legenda: ρ_t - baridade do agregado (Kg/m³); %v - percentagem do volume de vazios do agregado

| **4. Índice de forma (NP EN 933 - 4: 2002)** | |

Propriedades	Dados
SI (%)	-

Legenda: SI - Índice de forma em percentagem.

Areia 0/4

1. Análise granulométrica (NP EN 933 - 1: 2000; NP EN 933 - 2: 1999)

Peneiros (mm)	% do material passado
31,5	100,000
22,4	100,000
20	100,000
16	100,000
14	100,000
12,5	100,000
11,2	100,000
10	100,000
8	100,000
6,3	99,279
5,6	97,922
4	93,353
2	77,967
1	49,480
0,5	22,591
0,25	8,127
0,125	1,647
0,063	1,122

Propriedades	Dados
P	0,78
%f	1,470
MF	3,468

Legenda: P - percentagem do material retido no fundo; %f - percentagem de finos que passa o peneiro 0,063 mm; MF - módulo de finura.

2. Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097 - 6: 2003)

Propriedades	Dados
ρ_a (Kg/m ³)	2613,5
ρ_{rd} (Kg/m ³)	2615,7
ρ_{ssd} (Kg/m ³)	2614,9
WA ₂₄ (Kg/m ³)	0,030

Legenda: ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas (Kg/m³); ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa (Kg/m³); ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Kg/m³); WA₂₄ - Absorção de água (em percentagem de massa seca) após imersão durante 24h.

3. Baridade e volume de vazios (NP EN 1097 - 3: 2002)

Propriedades	Dados
ρ_t (Kg/m ³)	1530,0
%v	41,5

Legenda: ρ_t - baridade do agregado (Kg/m³); %v - percentagem do volume de vazios do agregado

4. Índice de forma (NP EN 933 - 4: 2002)

Propriedades	Dados
SI (%)	-

Legenda: SI - Índice de forma em percentagem.

Brita 1

1. Análise granulométrica (NP EN 933 - 1: 2000; NP EN 933 - 2: 1999)

Peneiros (mm)	% do material passado
31,5	100,000
22,4	100,000
20	100,000
16	100,000
14	100,000
12,5	100,000
11,2	88,423
10	75,885
8	50,590
6,3	28,350
5,6	16,832
4	3,541
2	1,062
1	0,354
0,5	0,202
0,25	0,139
0,125	0,064
0,063	0,040

Propriedades	Dados
P	0,03
%f	0,096
MF	6,440

Legenda: P - percentagem do material retido no fundo; %f - percentagem de finos que passa o peneiro 0,063 mm; MF - módulo de finura.

2. Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097 - 6: 2003)

Propriedades	Dados
ρ_a (Kg/m ³)	2696,0
ρ_{rd} (Kg/m ³)	2618,2
ρ_{ssd} (Kg/m ³)	2647,0
WA ₂₄ (Kg/m ³)	1,100

Legenda: ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas (Kg/m³); ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa (Kg/m³); ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Kg/m³); WA₂₄ - Absorção de água (em percentagem de massa seca) após imersão durante 24h.

3. Baridade e volume de vazios (NP EN 1097 - 3: 2002)

Propriedades	Dados
ρ_t (Kg/m ³)	1400,4
%v	46,5

Legenda: ρ_t - baridade do agregado (Kg/m³); %v - percentagem do volume de vazios do agregado

4. Índice de forma (NP EN 933 - 4: 2002)

Propriedades	Dados
SI (%)	16,00%

Legenda: SI - Índice de forma em percentagem.

Brita 2

1. Análise granulométrica (NP EN 933 - 1: 2000; NP EN 933 - 2: 1999)

Peneiros (mm)	% do material passado
31,5	100,000
22,4	100,000
20	98,012
16	72,081
14	43,443
12,5	22,261
11,2	14,100
10	9,415
8	5,821
6,3	2,800
5,6	2,000
4	1,796
2	1,508
1	1,391
0,5	1,242
0,25	1,007
0,125	0,817
0,063	0,803

Propriedades	Dados
P	0,14
%f	0,011
MF	7,143

Legenda: P - percentagem do material retido no fundo; %f - percentagem de finos que passa o peneiro 0,063 mm; MF - módulo de finura.

2. Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097 - 6: 2003)

Propriedades	Dados
ρ_a (Kg/m ³)	2713,0
ρ_{rd} (Kg/m ³)	2632,0
ρ_{ssd} (Kg/m ³)	2661,8
WA ₂₄ (Kg/m ³)	1,135

Legenda: ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas (Kg/m³); ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa (Kg/m³); ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Kg/m³); WA₂₄ - Absorção de água (em percentagem de massa seca) após imersão durante 24h.

3. Baridade e volume de vazios (NP EN 1097 - 3: 2002)

Propriedades	Dados
ρ_t (Kg/m ³)	1379,3
%v	47,6

Legenda: ρ_t - baridade do agregado (Kg/m³); %v - percentagem do volume de vazios do agregado

4. Índice de forma (NP EN 933 - 4: 2002)

Propriedades	Dados
SI (%)	19,03%

Legenda: SI - Índice de forma em percentagem.

ANEXO F – ESTUDOS REALIZADOS AOS BETÕES

F.1 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA NO ESTADO FRESCO

F.2 – ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

F.3 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

F.4 – ENSAIO DE ÍNDICE DE ESCLERÓMETRO

F.5 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

F.6 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

F.7 – ENSAIO DE RETRAÇÃO

F.8 – ENSAIO DE EXPANSÃO



F.1 – ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA NO ESTADO FRESCO

Betão	M2 (kg)	M1 (kg)	V (m3)	D (kg/m3)	D* (kg/m3)	Limites
100C	24,682	5,903	0,0081	2331	2340	≥2000 e <2600
90C+10FCC	24,634	5,903	0,0081	2325	2330	
80C+20FCC	24,462	5,903	0,0081	2304	2310	
70C+30FCC	24,268	5,903	0,0081	2279	2280	

F.2 – ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

100C						
Dia-Provete	Distância d (mm)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas				
		Tempo de transmissão (s)	$t_{\text{médio}}$ (s)	v (m/s)	$v_{\text{médio}}$ (m/s)	Desvio padrão
3d-1	150	30,2	30,1	4978	4836	136
	150	30				
	150	30,2				
3d-2	150	31,8	31,9	4707		
	150	32,1				
	150	31,7				
3d-3	150	31,5	31,1	4823		
	150	30,9				
	150	30,9				
7d-1	150	31	30,9	4849	4870	41
	150	31				
	150	30,8				
7d-2	150	31	31,0	4844		
	150	31,1				
	150	30,8				
7d-3	150	30,3	30,5	4918		
	150	30,5				
	150	30,7				
14d-1	150	30,7	30,7	4891	4872	21
	150	30,7				
	150	30,6				
14d-2	150	30,9	30,8	4875		
	150	31				
	150	30,4				
14d-3	150	30,8	30,9	4849		
	150	31				
	150	31				
28d-1	150	31,1	31,0	4834	4883	43
	150	31,1				
	150	30,9				
28d-2	150	30,8	30,6	4902		
	150	30,6				
	150	30,4				
28d-3	150	30,7	30,5	4913		
	150	30,5				
	150	30,4				

90C+10FCC						
Dia-Provete	Distância d (mm)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas				
		Tempo de transmissão (s)	t _{médio} (s)	v (m/s)	V _{médio} (m/s)	Desvio padrão
3d-1	150	32,3	32,0	4688	4766	68
	150	32				
	150	31,7				
3d-2	150	31,5	31,2	4808		
	150	31,2				
	150	30,9				
3d-3	150	31,3	31,2	4803		
	150	31,2				
	150	31,2				
7d-1	150	30,5	30,7	4886	4897	33
	150	30,7				
	150	30,9				
7d-2	150	30,7	30,8	4870		
	150	30,8				
	150	30,9				
7d-3	150	30,3	30,4	4934		
	150	30,6				
	150	30,3				
14d-1	150	30,8	30,7	4881	4907	27
	150	30,8				
	150	30,6				
14d-2	150	30,5	30,6	4907		
	150	30,9				
	150	30,3				
14d-3	150	30,7	30,4	4934		
	150	30,4				
	150	30,1				
28d-1	150	30,6	30,7	4881	4927	46
	150	30,8				
	150	30,8				
28d-2	150	30,6	30,4	4929		
	150	30,4				
	150	30,3				
28d-3	150	30	30,2	4972		
	150	30,4				
	150	30,1				

80C+20FCC						
Dia-Provete	Distância d (mm)	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas				
		Tempo de transmissão (s)	t _{médio} (s)	v (m/s)	V _{médio} (m/s)	Desvio padrão
3d-1	150	34,4	34,2	4386	4450	56
	150	34,1				
	150	34,1				
3d-2	150	33,4	33,5	4473		
	150	33,9				
	150	33,3				
3d-3	150	33,3	33,4	4491		
	150	33,4				
	150	33,5				
7d-1	150	32	31,8	4722	4730	10
	150	31,8				
	150	31,5				
7d-2	150	31,5	31,7	4727		
	150	31,9				
	150	31,8				
7d-3	150	31,8	31,6	4742		
	150	31,9				
	150	31,2				
14d-1	150	30,2	30,1	4978	4908	61
	150	30				
	150	30,2				
14d-2	150	30,7	30,8	4875		
	150	31				
	150	30,6				
14d-3	150	31,1	30,8	4870		
	150	30,6				
	150	30,7				
28d-1	150	30,9	30,6	4897	4888	8
	150	30,4				
	150	30,6				
28d-2	150	30,6	30,7	4881		
	150	30,8				
	150	30,8				
28d-3	150	30,9	30,7	4886		
	150	30,7				
	150	30,5				

70C+30FCC						
Dia-Provete	Distância d (mm)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas				
		Tempo de transmissão (s)	t _{médio} (s)	v (m/s)	V _{médio} (m/s)	Desvio padrão
3d-1	150	34	33,8	4438	4447	8
	150	33,6				
	150	33,8				
3d-2	150	33,9	33,7	4451		
	150	33,5				
	150	33,7				
3d-3	150	33,6	33,7	4451		
	150	33,7				
	150	33,8				
7d-1	150	31,1	31,1	4818	4848	52
	150	30,9				
	150	31,4				
7d-2	150	30,5	30,6	4907		
	150	30,5				
	150	30,7				
7d-3	150	31,2	31,1	4818		
	150	30,7				
	150	31,5				
14d-1	150	31,4	31,2	4803	4784	18
	150	30,9				
	150	31,4				
14d-2	150	31,5	31,5	4767		
	150	31,6				
	150	31,3				
14d-3	150	31,6	31,4	4782		
	150	31				
	150	31,5				
28d-1	150	30,4	30,2	4961	4874	76
	150	30,2				
	150	30,1				
28d-2	150	31	31,0	4844		
	150	31				
	150	30,9				
28d-3	150	31,2	31,1	4818		
	150	31,2				
	150	31				

F.3 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

100C							
Dia-Provete	Dimensões do provete			Resistência à Compressão (Rc)			
	h (mm)	L (mm)	Área (mm ²)	Carga de Rotura (kN)	Rc (Mpa)	Rc _{médio} (Mpa)	Desvio Padrão
3d-1	150	150	22500	1199,4	53,3	52,3	0,938
3d-2	150	150	22500	1157,5	51,4		
3d-3	150	150,5	22575	1178,1	52,2		
7d-1	150	151	22650	1280,9	56,6	56,3	0,721
7d-2	150	150	22500	1248,8	55,5		
7d-3	150	150	22500	1279,9	56,9		
14d-1	150	150	22500	1290,9	57,4	56,6	0,652
14d-2	150	150,5	22575	1274,1	56,4		
14d-3	150	150,5	22575	1266,9	56,1		
28d-1	150	150	22500	1355,7	60,3	62,0	1,909
28d-2	150	150	22500	1391,2	61,8		
28d-3	150	150,5	22575	1446	64,1		
56d-1	150	150	22500	1436	63,8	65,0	1,401
56d-2	150	150	22500	1452	64,5		
56d-3	150	150	22500	1496,8	66,5		
90d-1	150	150	22500	1605,7	71,4	70,7	0,993
90d-2	150	150	22500	1601,3	71,2		
90d-3	150	150	22500	1565	69,6		

90C+10FCC							
M,Dia-Provete	Dimensões do provete			Resistência à Compressão (Rc)			
	h (mm)	L (mm)	Área (mm ²)	Carga de Rotura (kN)	Rc (Mpa)	Rc _{médio} (Mpa)	Desvio Padrão
3d-1	150,5	150	22575	1304,4	57,8	59,4	2,276
3d-2	150	150	22500	1372,5	61,0		
3d-3	150	150,5	22575	-	-		
7d-1	150	150	22500	1502,1	66,8	64,7	1,826
7d-2	150	150	22500	1422,2	63,2		
7d-3	150	150	22500	1445,5	64,2		
14d-1	150	150,5	22575	1554,1	68,8	68,3	1,447
14d-2	150	150	22500	1562,1	69,4		
14d-3	150	150	22500	1500,3	66,7		
28d-1	150	150	22500	1509,1	67,1	68,9	2,017
28d-2	150	150	22500	1543	68,6		
28d-3	150	150,5	22575	1604,3	71,1		
56d-1	150	150,5	22575	1778,2	78,8	79,2	2,150
56d-2	150	150	22500	1833,5	81,5		
56d-3	150	150	22500	1738	77,2		
90d-1	150	150	22500	1679,9	74,7	75,4	1,387
90d-2	150,5	150	22575	1738,7	77,0		
90d-3	150	150	22500	1677,9	74,6		

80C+20FCC							
Dia-Provete	Dimensões do provete			Resistência à Compressão (Rc)			
	h (mm)	L (mm)	Área (mm ²)	Carga de Rotura (kN)	Rc (Mpa)	Rc _{médio} (Mpa)	Desvio Padrão
3d-1	150	151	22650	1199,4	53,3	52,3	0,938
3d-2	150	150	22500	1157,5	51,4		
3d-3	150	150	22500	1178,1	52,2		
7d-1	150	150	22500	1280,9	56,6	56,3	0,721
7d-2	150	150	22500	1248,8	55,5		
7d-3	150	150	22500	1279,9	56,9		
14d-1	150	150	22500	1290,9	57,4	56,6	0,652
14d-2	150	150	22500	1274,1	56,4		
14d-3	150	150	22500	1266,9	56,1		
28d-1	150	150	22500	1355,7	60,3	62,0	1,909
28d-2	150	150	22500	1391,2	61,8		
28d-3	150,5	150	22575	1446	64,1		
56d-1	150	150	22500	1436	63,8	65,0	1,401
56d-2	150	150	22500	1452	64,5		
56d-3	150	150	22500	1496,8	66,5		
90d-1	150	150	22500	1605,7	71,4	70,7	0,993
90d-2	150	150	22500	1601,3	71,2		
90d-3	150	150	22500	1565	69,6		

70C+30FCC							
Dia-Provete	Dimensões do provete			Resistência à Compressão (Rc)			
	h (mm)	L (mm)	Área (mm ²)	Carga de Rotura (kN)	Rc (Mpa)	Rc _{médio} (Mpa)	Desvio Padrão
3d-1	150	150,5	22575	992,9	44,0	44,6	0,637
3d-2	150	150	22500	1018	45,2		
3d-3	150,5	150	22575	1003,8	44,5		
7d-1	150	150	22500	1245,4	55,4	55,2	0,231
7d-2	150	150	22500	1235,3	54,9		
7d-3	150	150	22500	1242,4	55,2		
14d-1	150	150	22500	1464,3	65,1	66,3	1,218
14d-2	150	150	22500	1519	67,5		
14d-3	150	150	22500	1488,8	66,2		
28d-1	150	150	22500	1579	70,2	68,8	1,357
28d-2	150,5	150,5	22650	1528,1	67,5		
28d-3	150	150	22500	1547,5	68,8		
56d-1	150	150	22500	1721,5	76,5	76,2	1,515
56d-2	150,5	150,5	22650	1688,2	74,5		
56d-3	150	150	22500	1744	77,5		
90d-1	150	150	22500	1797,3	79,9	78,4	2,547
90d-2	150	150	22500	1795,4	79,8		
90d-3	150	150	22500	1697,1	75,4		

F.4 – ENSAIO DE ÍNDICE DE ESCLERÓMETRO

100C												
Pontos	3		7		14		28		56		90	
	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)
1	40	42,5	42	46,2	34	31,8	45	52,0	44	50,1	40	42,5
2	39	40,6	39	40,6	29	23,5	48	58,0	49	60,1	40	42,5
3	41	44,3	43	48,1	33	30,1	47	56,0	44	50,1	48	58
4	42	46,2	42	46,2	44	50,1	39	40,6	45	52,0	45	52
5	37	37,0	41	44,3	45	52,0	45	52,0	47	56,0	47	56
6	41	44,3	44	50,1	45	52,0	47	56,0	39	40,6	52	66,3
7	41	44,3	28	21,9	44	50,1	48	58,0	44	50,1	49	60,1
8	41	44,3	40	42,5	43	48,1	46	54,0	40	42,5	47	56
9	39	40,6	42	46,2	44	50,1	43	48,1	39	40,6	44	50,1
10	43	48,1	41	44,3	45	52,0	38	38,8	49	60,1	47	56
11	40	42,5	39	40,6	45	52,0	46	54,0	48	58,0	52	66,3
12	41	44,3	38	38,8	47	56,0	44	50,1	44	50,1	49	60,1
13	38	38,8	40	42,5	42	46,2	37	37,0	48	58,0	40	42,5
14	39	40,6	42	46,2	32	28,4	44	50,1	49	50,1	45	52
15	40	42,5	27	20,3	37	37,0	44	50,1	44	50,1	45	52
16	40	42,5	34	31,8	47	56,0	48	58,0	40	42,5	45	52
Média	40		41		42		44		45		46	
Mediana	40	28	41	29	44	31	45	32	44	31	46	32,2
30%	12,0	52	12,3	53	13,2	57	13,5	59	13,2	57	13,8	59,8
Média	40	42,5	41	44,3	42	46,2	44	50,1	45	52	46	54,0

90C+10FCC												
Pontos	3		7		14		28		56		90	
	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)
1	44	50,1	42	46,2	48	58,0	48	58,0	49	60,1	50	62,1
2	41	44,3	51	64,2	52	66,3	52	66,3	50	62,1	50	62,1
3	37	37,0	28	21,9	47	56,0	47	56,0	50	62,1	51	64,2
4	43	48,1	49	60,1	50	62,1	46	54,0	52	66,3	52	66,3
5	41	44,3	51	64,2	46	54,0	49	60,1	52	66,3	49	60,1
6	31	26,7	48	58,0	45	52,0	50	62,1	50	62,1	51	64,2
7	44	50,1	50	62,1	40	42,5	51	64,2	48	58,0	50	62,1
8	43	48,1	40	42,5	50	62,1	52	66,3	43	48,1	44	50,1
9	41	44,3	51	64,2	51	64,2	28	21,9	51	64,2	49	60,1
10	46	56,0	49	60,1	49	60,1	36	35,2	52	66,3	46	54
11	44	50,1	49	60,1	50	62,1	50	62,1	49	60,1	52	66,3
12	42	46,2	46	54,0	48	58,0	50	62,1	50	62,1	44	50,1
13	44	50,1	45	52,0	50	62,1	50	62,1	51	64,2	49	60,1
14	44	50,1	48	58,0	47	56,0	50	62,1	50	62,1	51	64,2
15	41	44,3	49	60,1	49	60,1	32	28,4	51	64,2	51	64,2
16	43	48,1	48	58,0	48	58,0	45	52,0	49	60,1	51	64,2
Média	42		48		48		48		50		49	
Mediana	43	30	49	34	49	34	50	35	50	35	50	35
		56		64		63		65		65		65
30%	12,9		14,7		14,55		15,0		15,0		15	
Média	42	46,2	48	58	48	58	48	58,0	50	62,1	49	60,1

80C+20FCC												
Pontos	3		7		14		28		56		90	
	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)
1	44	50,1	47	56,0	44	50,1	49	60,1	50	62,1	52	66,3
2	34	31,8	46	54,0	47	56,0	49	60,1	52	66,3	52	66,3
3	40	42,5	45	52,0	47	56,0	51	64,2	49	60,1	49	60,1
4	40	42,5	43	48,1	49	60,1	51	64,2	49	60,1	44	50,1
5	40	42,5	45	52,0	46	54,0	46	54,0	51	64,2	52	66,3
6	40	42,5	47	56,0	49	60,1	50	62,1	52	66,3	48	58
7	41	44,3	45	52,0	49	60,1	49	60,1	52	66,3	49	60,1
8	41	44,3	45	52,0	47	56,0	49	60,1	44	50,1	51	64,2
9	37	37,0	34	26,7	49	60,1	46	54,0	50	62,1	51	64,2
10	34	31,8	43	48,1	46	54,0	46	54,0	44	50,1	52	66,3
11	39	40,6	46	54,0	47	56,0	49	60,1	50	62,1	50	62,1
12	37	37,0	41	44,0	49	60,1	51	64,2	52	66,3	52	66,3
13	41	44,3	44	50,1	47	56,0	46	54,0	51	64,2	51	64,1
14	41	44,3	46	54,0	47	56,0	46	54,0	52	66,3	51	64,2
15	37	37,0	43	48,1	49	60,1	51	64,2	51	64,2	52	66,3
16	41	44,3	45	52,0	49	60,1	51	64,2	49	60,1	47	56
Média	39		45		48		49		50		50	
Mediana	40	28	45	32	47	33	49	34	51	35	51	35,7
30%	12,0	52	13,5	59	14,1	61	14,7	64	15,2	66	15,3	66,3
Média	39	40,6	45	52	48	58	49	60,1	50	62,1	50	62,1

70C+30FCC												
Pontos	3		7		14		28		56		90	
	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)	x	f (Mpa)
1	34	31,8	46	54,0	47	56,0	50	62,1	48	58,0	49	60,1
2	36	35,2	43	48,2	46	54,0	49	60,1	51	64,2	50	62,1
3	34	31,8	46	54,0	46	54,0	45	52,0	48	58,0	51	64,2
4	34	31,8	48	55,0	47	56,0	50	62,1	51	64,2	52	66,3
5	37	37,0	45	52,0	42	46,2	50	62,1	51	64,2	48	58
6	34	31,8	33	30,1	45	52,0	48	58,0	43	48,1	49	60,1
7	36	35,2	41	44,3	45	52,0	50	62,1	49	60,1	50	62,1
8	37	37,0	45	52,0	46	54,0	49	60,1	51	64,2	46	54
9	32	28,4	40	42,5	47	56,0	51	64,2	43	48,1	52	66,3
10	31	26,7	46	54,0	46	54,0	44	50,1	47	56,0	49	50,1
11	33	30,1	43	48,1	37	37,0	52	66,3	43	48,1	50	62,1
12	35	33,5	45	52,0	46	54,0	49	60,1	50	62,1	51	64,2
13	35	33,5	45	52,0	41	44,3	46	54,0	51	64,2	44	60,1
14	38	38,8	48	58,0	46	54,0	43	48,1	52	66,3	43	48,1
15	33	30,1	37	37,0	46	54,0	51	64,2	49	60,1	46	54
16	37	37,0	40	42,5	48	58,0	50	62,1	52	66,3	49	60,1
Média	35		43		45		49		49		49	
Mediana	35	24 45	45	32 59	46	32 60	50	35 64	50	35 64	49	34,3 63,7
30%	10,4		13,5		13,8		14,9		14,9		14,7	
Média	35	33,5	43	48,2	45	52	49	60,1	49	60,1	49	60,1

F.5 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

100C																
Dia- Provete	Tempo	Dimensões do provete		Massa do provete		Ascensão					Absorção		Coeficientes de capilaridade			
		Ø (mm)	A (mm ²)	M _{0abs} cap (g)	M _{iabs} cap (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h _{médio} (mm)	A _{ci} (Kg/m ²)	A _{ci} médio (Kg/m ²)	K _C _{6h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²	K _C _{72h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²
28_CAP1	10 min	150	17671,5	12468	12479	16	13	11	16	14	0,622	0,622				
28_CAP2		150	17671,5	12519	12531	13	14	16	15		0,679					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12489	15	13	13	15		0,566					
28_CAP1	1h	150	17671,5	12468	12483	14	14	12	16	15	0,849	0,924				
28_CAP2		150	17671,5	12519	12536	13	14	18	16		0,962					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12496	17	15	19	17		0,962					
28_CAP1	3h	150	17671,5	12468	12489	15	13	12	17	16	1,188	1,188				
28_CAP2		150	17671,5	12519	12540	13	14	18	15		1,188					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12500	24	13	19	18		1,188					
28_CAP1	4h	150	17671,5	12468	12490	16	14	14	20	17	1,245	1,264				
28_CAP2		150	17671,5	12519	12541	14	14	18	16		1,245					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12502	24	13	20	18		1,302					
28_CAP1	6h	150	17671,5	12468	12493	13	20	14	18	17	1,415	1,396	0,076	0,98		
28_CAP2		150	17671,5	12519	12543	14	14	20	18		1,358					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12504	25	14	20	18		1,415					
28_CAP1	24h	150	17671,5	12468	12501	14	25	14	20	18	1,867	1,886				
28_CAP2		150	17671,5	12519	12552	14	14	20	25		1,867					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12513	23	13	20	18		1,924					
28_CAP1	72h	150	17671,5	12468	12510	20	25	36	20	21	2,377	2,339	0,032	0,84		
28_CAP2		150	17671,5	12519	12560	14	14	20	29		2,320					
28_CAP3		150	17671,5	12479	12520	24	13	20	15		2,320					

90C+10FCC																
Dia-Provete	Tempo	Dimensões do provete		Massa do provete		Ascensão					Absorção		Coeficientes de capilaridade			
		Ø (mm)	A (mm ²)	M _{0abscap} (g)	M _{iabscap} (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h _{médio} (mm)	Aci (Kg/m ²)	Aci _{médjo} (Kg/m ²)	KC _{6h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²	KC _{72h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²
28_CAP1	10 min	150	17671,5	12487	12498	19	17	13	22	17	0,622	0,660				
28_CAP2		150	17671,5	12380	12393	19	12	15	15		0,736					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12405	19	21	18	18		0,622					
28_CAP1	1h	150	17671,5	12487	12504	20	21	14	23	17	0,962	0,962				
28_CAP2		150	17671,5	12380	12397	17	12	14	13		0,962					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12411	19	21	19	15		0,962					
28_CAP1	3h	150	17671,5	12487	12509	20	18	14	25	18	1,245	1,226				
28_CAP2		150	17671,5	12380	12401	17	12	15	22		1,188					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12416	16	19	20	16		1,245					
28_CAP1	4h	150	17671,5	12487	12509	22	22	13	22	19	1,245	1,245				
28_CAP2		150	17671,5	12380	12402	15	12	17	22		1,245					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12416	21	27	23	16		1,245					
28_CAP1	6h	150	17671,5	12487	12510	22	22	13	24	20	1,302	1,302	0,073	0,95		
28_CAP2		150	17671,5	12380	12403	17	13	16	25		1,302					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12417	20	25	21	16		1,302					
28_CAP1	24h	150	17671,5	12487	12519	28	22	15	37	21	1,811	1,773				
28_CAP2		150	17671,5	12380	12410	14	12	16	22		1,698					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12426	20	26	21	15		1,811					
28_CAP1	72h	150	17671,5	12487	12526	21	18	12	37	20	2,207	2,131	0,028	0,80		
28_CAP2		150	17671,5	12380	12417	14	18	13	24		2,094					
28_CAP3		150	17671,5	12394	12431	19	26	21	15		2,094					

80C+20FCC																								
Dia- Provete	Tempo	Dimensões do provete		Massa do provete		Ascensão					Absorção		Coeficientes de capilaridade											
		Ø (mm)	A (mm ²)	M _{0abs} (g)	M _{iabs} (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h _{médio} (mm)	Ac _i (Kg/m ²)	Ac _i _{médio} (Kg/m ²)	KC _{6h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²	KC _{72h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²								
28_CAP1	10 min	150	17671,5	12481	12491	15	18	8	7	13	0,566	0,566	0,063	0,98										
28_CAP2		150	17671,5	12441	12451	11	13	11	16		0,566													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12483	12	12	12	16		0,566													
28_CAP1	1h	150	17671,5	12481	12496	18	18	19	13	16	0,849	0,811					0,063	0,98						
28_CAP2		150	17671,5	12441	12455	14	15	14	20		0,792													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12487	12	15	13	18		0,792													
28_CAP1	3h	150	17671,5	12481	12498	17	19	15	10	16	0,962	0,962									0,063	0,98		
28_CAP2		150	17671,5	12441	12458	19	17	14	20		0,962													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12490	12	17	14	21		0,962													
28_CAP1	4h	150	17671,5	12481	12500	18	18	15	12	18	1,075	1,037												
28_CAP2		150	17671,5	12441	12459	18	16	24	18		1,019													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12491	21	15	11	24		1,019													
28_CAP1	6h	150	17671,5	12481	12502	20	19	18	12	18	1,188	1,151	0,063	0,98										
28_CAP2		150	17671,5	12441	12461	15	16	22	19		1,132													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12493	22	15	12	24		1,132													
28_CAP1	24h	150	17671,5	12481	12509	19	18	18	15	19	1,584	1,566					0,063	0,98						
28_CAP2		150	17671,5	12441	12468	14	17	23	21		1,528													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12501	22	18	15	23		1,584													
28_CAP1	72h	150	17671,5	12481	12517	19	20	18	15	18	2,037	2,075									0,063	0,98		
28_CAP2		150	17671,5	12441	12477	12	17	23	21		2,037													
28_CAP3		150	17671,5	12473	12511	22	21	15	17		2,150													

70C+30FCC																		
Dia- Provete	Tempo	Dimensões do provete		Massa do provete		Ascensão					Absorção		Coeficientes de capilaridade					
		Ø (mm)	A (mm ²)	M _{0abs} cap (g)	M _{iabs} cap (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h _{médio} (mm)	Aci (Kg/m ²)	Aci _{médio} (Kg/m ²)	K _C _{6h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²	K _C _{72h} (kg/(m ² .min ^{0.5}))	R ²		
28_CAP1	10 min	150	17671,5	12204	12214	12	17	12	12	14	0,566	0,622						
28_CAP2		150	17671,5	12232	12243	13	20	19	14		0,622							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12131	12	12	10	13		0,679							
28_CAP1	1h	150	17671,5	12204	12222	12	14	14	13	16	1,019	1,075						
28_CAP2		150	17671,5	12232	12251	16	20	20	20		1,075							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12139	17	17	13	15		1,132							
28_CAP1	3h	150	17671,5	12204	12228	15	16	12	12	16	1,358	1,415						
28_CAP2		150	17671,5	12232	12257	15	20	18	20		1,415							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12145	15	21	15	14		1,471							
28_CAP1	4h	150	17671,5	12204	12229	15	13	12	12	16	1,415	1,509						
28_CAP2		150	17671,5	12232	12259	15	20	18	20		1,528							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12147	14	21	17	15		1,584							
28_CAP1	6h	150	17671,5	12204	12234	16	15	14	15	17	1,698	1,717					0,093	0,99
28_CAP2		150	17671,5	12232	12262	15	20	20	20		1,698							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12150	15	21	19	15		1,754							
28_CAP1	24h	150	17671,5	12204	12247	17	17	15	15	19	2,433	2,471						
28_CAP2		150	17671,5	12232	12276	14	22	25	29		2,490							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12163	14	22	17	18		2,490							
28_CAP1	72h	150	17671,5	12204	12255	20	18	18	15	20	2,886	2,961					0,041	0,85
28_CAP2		150	17671,5	12232	12285	18	22	26	30		2,999							
28_CAP3		150	17671,5	12119	12172	14	22	15	21		2,999							

F.6 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Betão	Massa do provete			Absorção		
	saturado	hidrostático	seco	A%	A _{média} %	Varição (%)
	M _{1absim} (g)	M _{2absim} (g)	M _{3absim} (g)			
100C_IM1	2394	1409	2285	11,07%	11,32%	-
100C_IM2	2426	1423	2312	11,37%		
100C_IM3	2418	1421	2303	11,53%		
90C+10FCC_IM1	2403	1405	2278	12,53%	12,52%	9,54%
90C+10FCC_IM2	2398	1403	2274	12,46%		
90C+10FCC_IM3	2393	1398	2268	12,56%		
80C+20FCC_IM1	2418	1409	2287	12,98%	13,18%	14,12%
80C+20FCC_IM2	2406	1403	2272	13,36%		
80C+20FCC_IM3	2419	1412	2286	13,21%		
70C+30FCC_IM1	2398	1387	2257	13,95%	13,74%	17,58%
70C+30FCC_IM2	2386	1382	2248	13,75%		
70C+30FCC_IM3	2388	1382	2252	13,52%		

F.7 – ENSAIO DE VARIAÇÕES DIMENSIONAIS

- Avaliação da variação dimensional sem aplicação de tensões

Betão	100C				90C+10FCC			
	Ret-1	Ret-2	Média	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	Ret-1	Ret-2	Média	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0,033	-0,031	-0,032	106	-0,026	-0,025	-0,025	83
2	-0,034	-0,039	-0,037	122	-0,027	-0,025	-0,026	86
3	-0,036	-0,046	-0,041	136	-0,034	-0,032	-0,033	108
6	-0,059	-0,075	-0,067	223	-0,039	-0,043	-0,041	137
7	-0,059	-0,076	-0,067	223	-0,044	-0,051	-0,047	158
14	-0,059	-0,082	-0,070	234	-0,051	-0,052	-0,051	171
28	-0,082	-0,094	-0,088	293	-0,061	-0,056	-0,058	193
56	-0,106	-0,139	-0,123	408	-0,072	-0,081	-0,076	254
63	-0,109	-0,140	-0,124	414	-0,083	-0,091	-0,087	289
69	-0,112	-0,144	-0,128	425	-0,088	-0,095	-0,092	305
90	-0,116	-0,151	-0,133	444	-0,089	-0,100	-0,094	314

Betão	80C+20FCC				70C+30FCC			
	Ret-1	Ret-2	Média	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	Ret-1	Ret-2	Média	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0,021	-0,01	-0,016	52	0,026	0,026	0,026	-86
2	-0,031	-0,0185	-0,025	82	0,021	0,021	0,021	-69
3	-0,034	-0,0205	-0,027	90	0,019	0,022	0,020	-67
6	-0,047	-0,0345	-0,041	135	0,016	0,013	0,014	-48
7	-0,049	-0,0365	-0,043	143	0,015	0,009	0,012	-39
14	-0,050	-0,036	-0,043	143	-0,017	-0,012	-0,014	48
28	-0,056	-0,0385	-0,047	157	-0,030	-0,029	-0,029	97
56	-0,064	-0,0575	-0,061	202	-0,061	-0,051	-0,056	186
63	-0,075	-0,063	-0,069	230	-0,062	-0,054	-0,058	192
69	-0,078	-0,064	-0,071	237	-0,062	-0,056	-0,059	197
90	-0,079	-0,064	-0,071	238	-0,061	-0,056	-0,058	194

- Avaliação da variação dimensional com aplicação de tensão permanente

Betão	100C				90C+10FCC			
Dias	Exp-1	Exp-2	Média	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	Exp-1	Exp-2	Média	$\epsilon \cdot 10^{-6}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0,046	-0,038	-0,042	140	-0,035	-0,027	-0,031	103
2	-0,090	-0,087	-0,089	295	-0,027	-0,025	-0,026	87
3	-0,129	-0,110	-0,120	398	-0,012	-0,033	-0,022	73
6	-0,109	-0,113	-0,111	370	-0,012	-0,031	-0,021	71
7	-0,102	-0,101	-0,102	338	-0,013	-0,029	-0,021	69
14	-0,092	-0,086	-0,089	297	0,042	0,031	0,036	-121
28	-0,092	-0,09	-0,091	303	0,054	0,036	0,045	-149
56	-0,091	-0,087	-0,089	193	0,032	0,023	0,027	-91
63	-0,025	-0,019	-0,022	73	0,033	0,013	0,023	-75
69	-0,032	-0,027	-0,030	98	0,032	0,013	0,022	-73
90	-0,023	-0,011	-0,017	57	0,036	0,026	0,031	-102

Betão	80C+20FCC				70C+30FCC			
Dias	Exp-1	Exp-2	Média	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	Exp-1	Exp-2	Média	$\epsilon \cdot 10^{-6}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0,027	-0,034	-0,030	101	0,022	0,021	0,021	-71
2	-0,021	-0,021	-0,021	68	0,017	0,017	0,017	-56
3	-0,020	-0,019	-0,019	64	0,013	0,010	0,012	-38
6	-0,017	-0,020	-0,018	61	0,028	0,031	0,029	-97
7	-0,016	-0,023	-0,019	64	0,036	0,049	0,042	-140
14	0,041	0,037	0,039	-128	0,038	0,050	0,044	-145
28	0,032	0,026	0,029	-96	0,047	0,052	0,049	-164
56	0,016	0,018	0,017	-57	0,022	0,056	0,039	-128
63	0,014	0,014	0,014	-45	0,022	0,057	0,039	-130
69	0,009	0,017	0,013	-42	0,027	0,060	0,043	-143
90	0,018	0,020	0,019	-62	0,029	0,045	0,037	-122

**ANEXO G – DADOS DO OSCILOSCÓPIO E COEFICIENTES DE
CAPILARIDADE**

G.1 – ONDAS LONGITUDINAIS OBTIDAS PELO OSCILOSCÓPIO NO ENSAIO DE ULTRA-
SONS

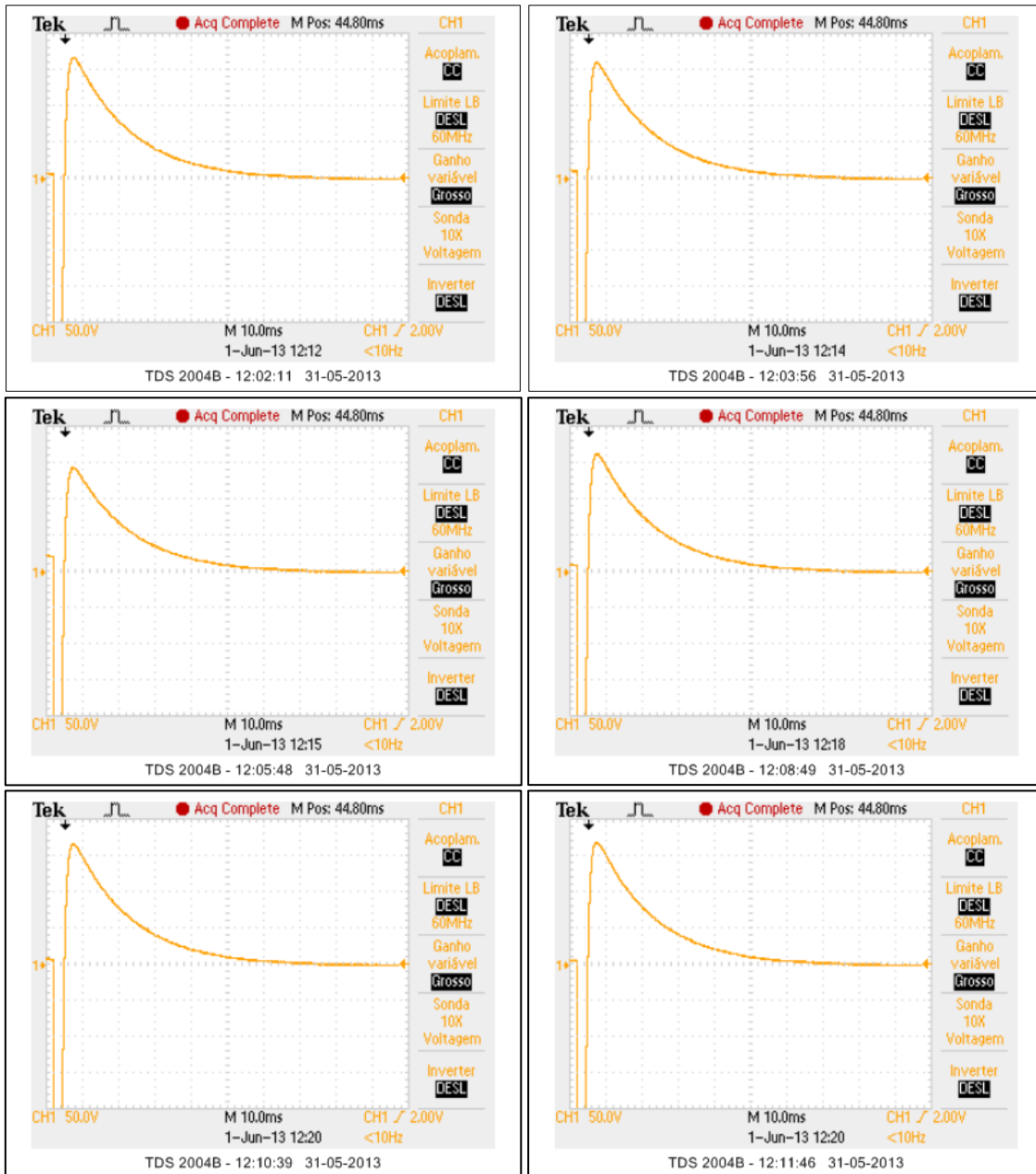
G.2 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

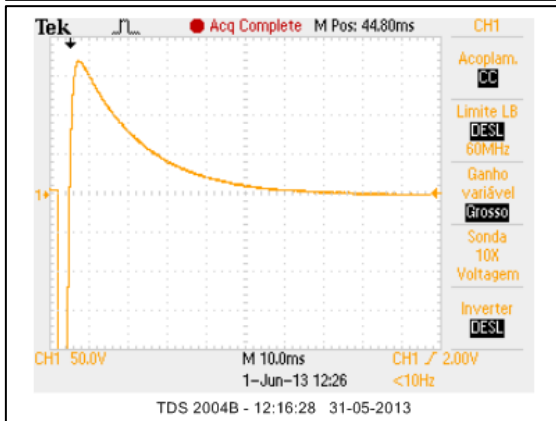
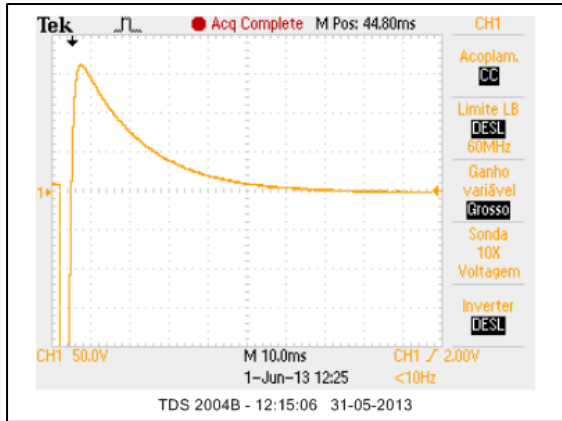
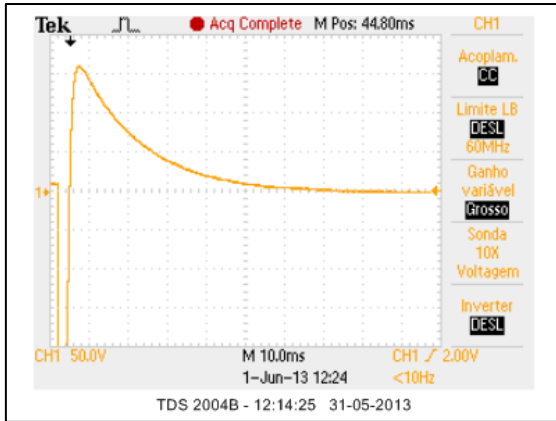
G.3 – COEFICIENTES DE CAPILARIDADE

G.1 – ONDAS LONGITUDINAIS OBTIDAS PELO OSCILOSCÓPIO NO ENSAIO DE ULTRASSONS

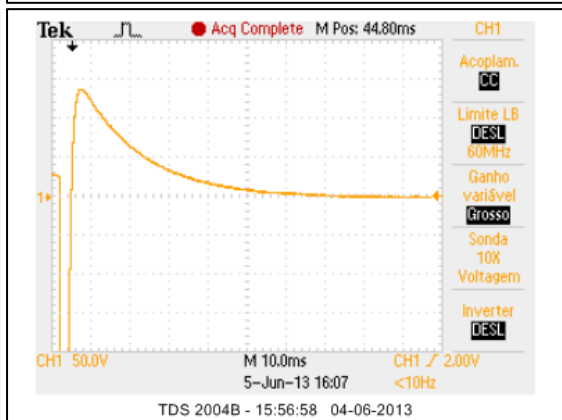
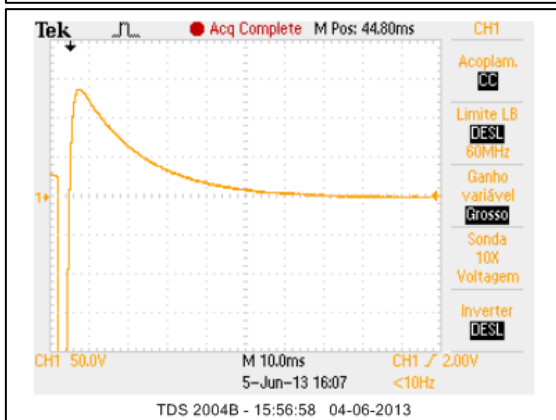
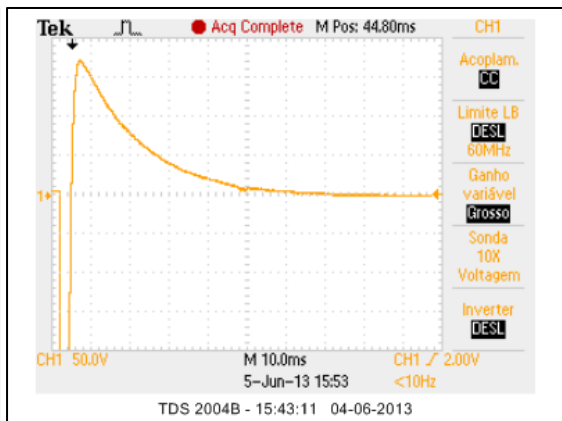
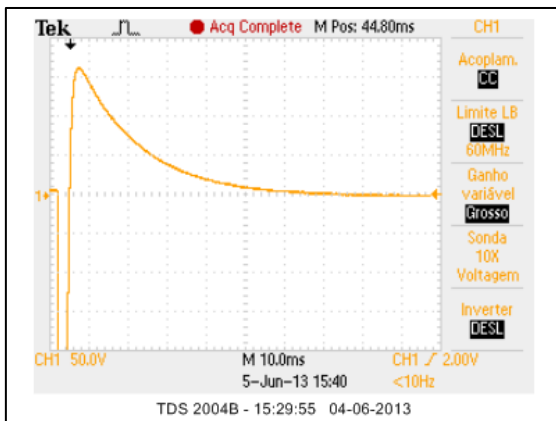
- 100C

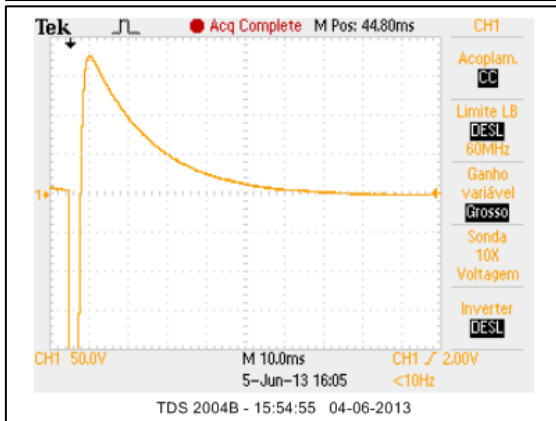
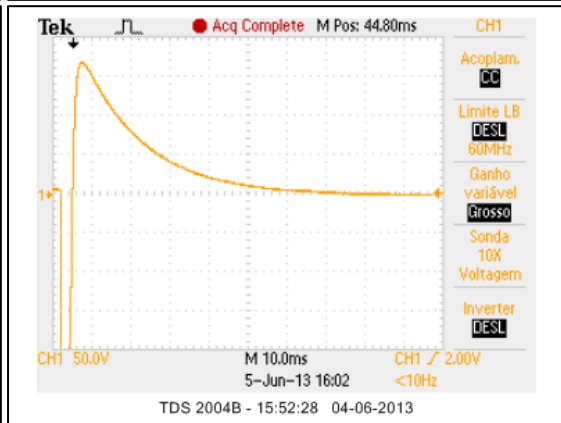
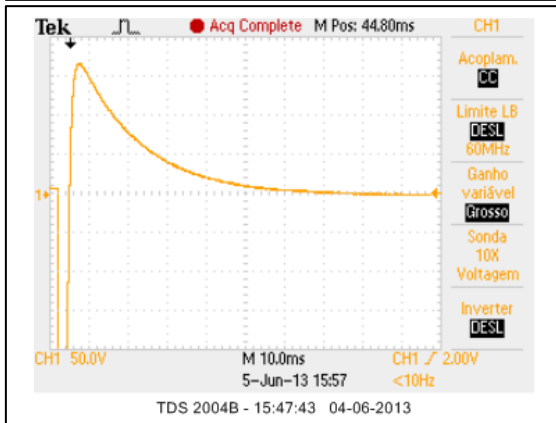
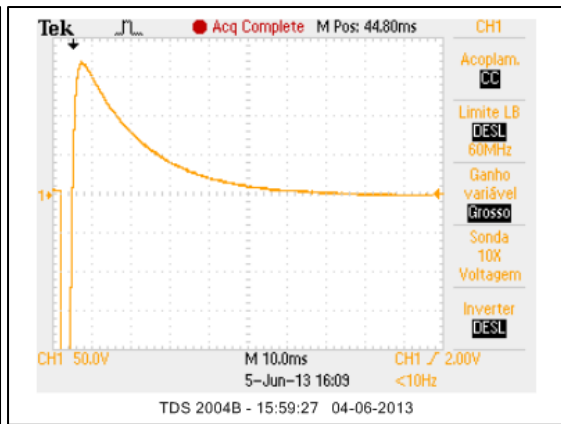
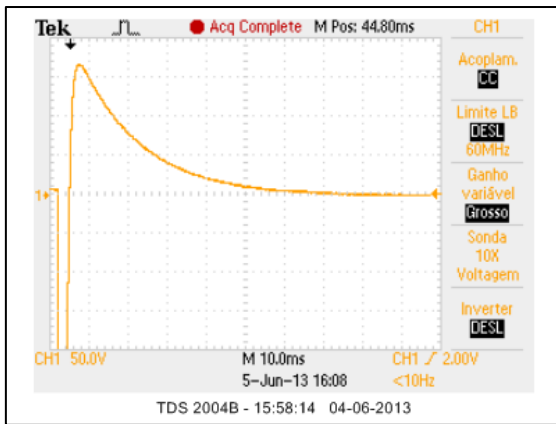
3 Dias



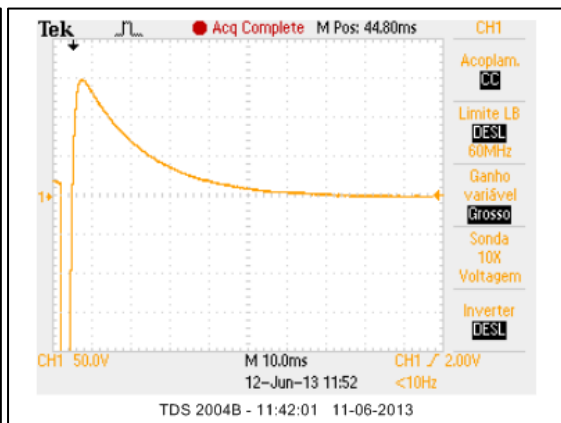
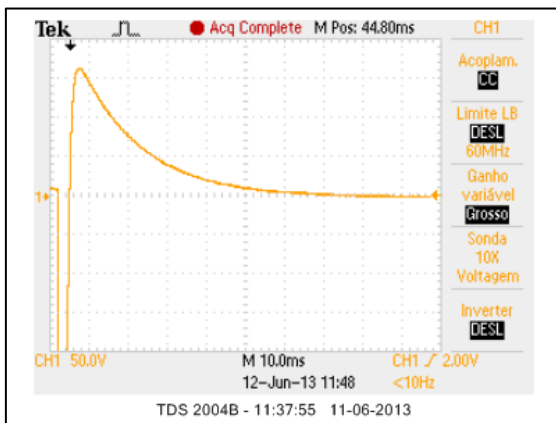


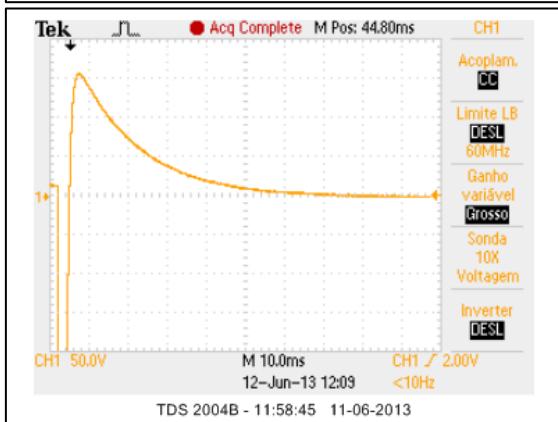
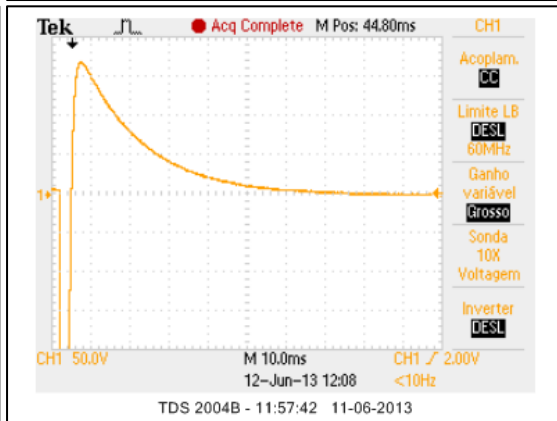
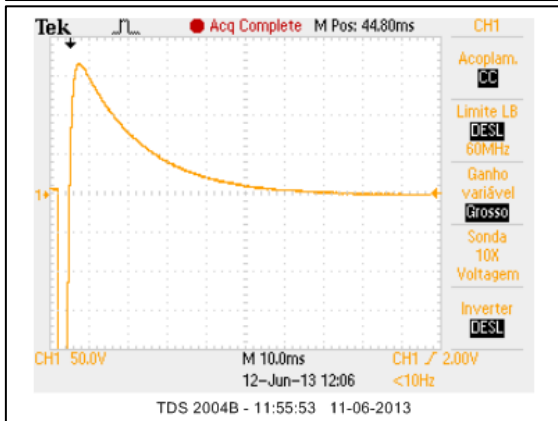
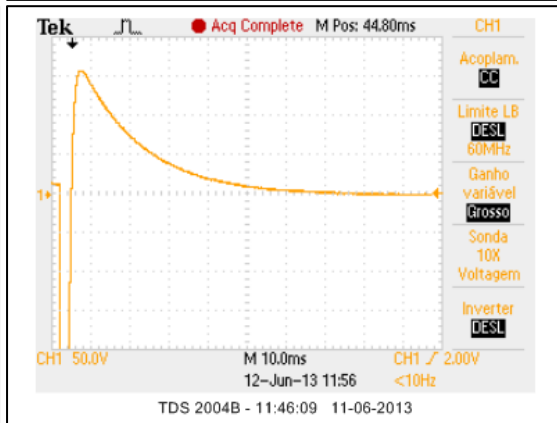
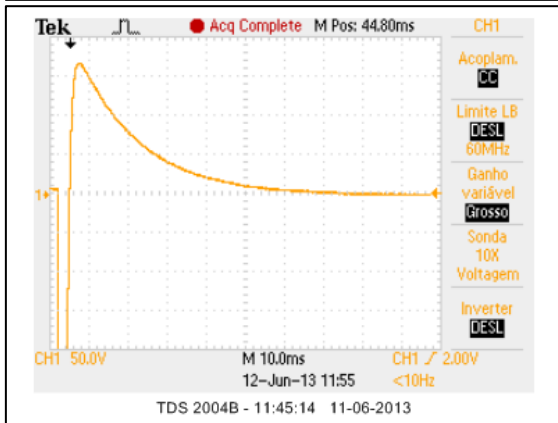
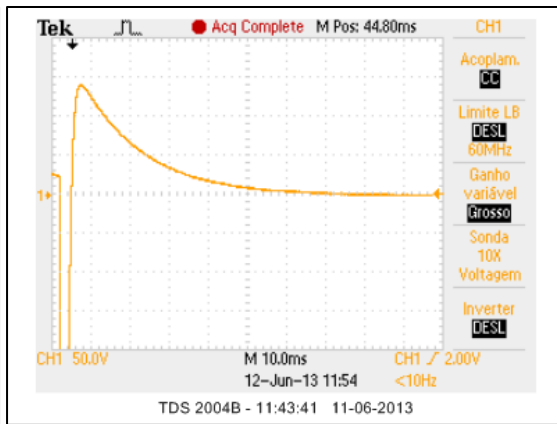
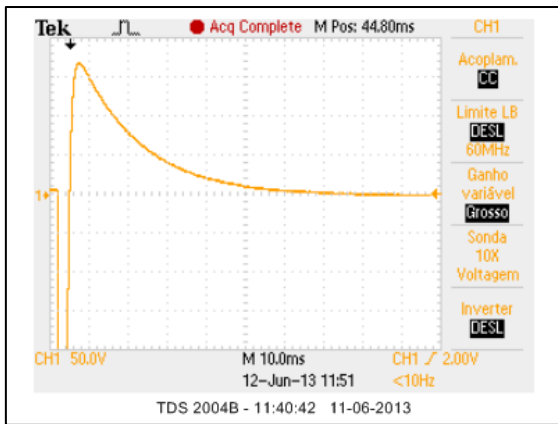
7 Dias



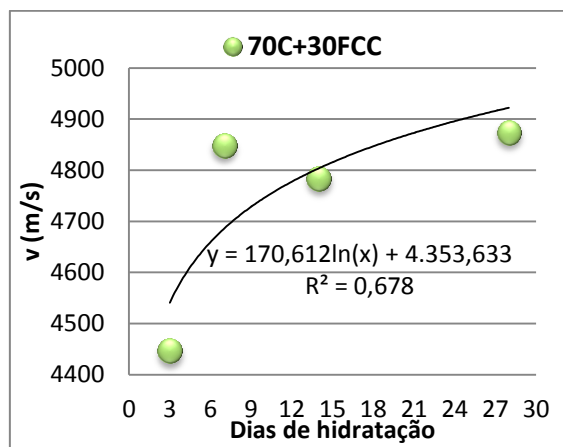
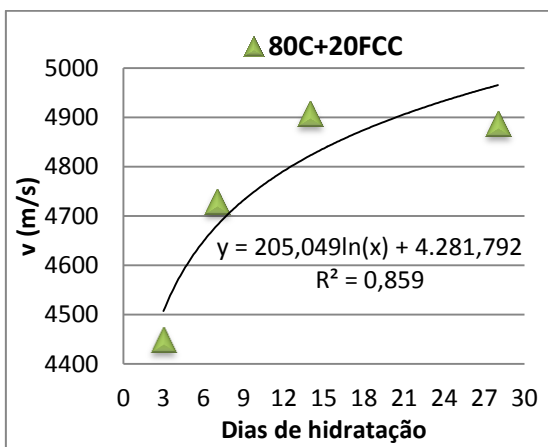
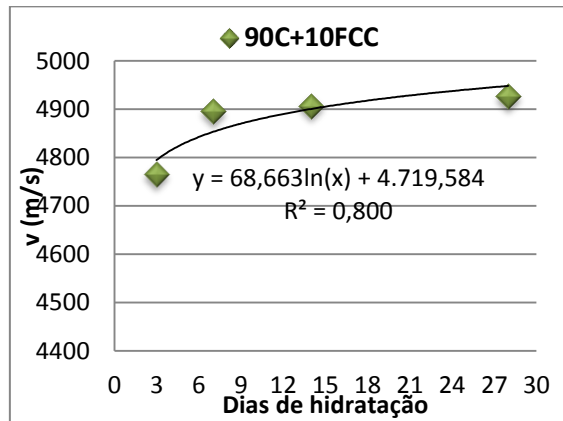
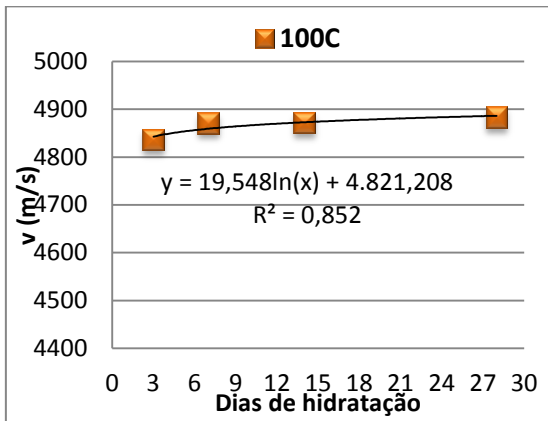


14 Dias



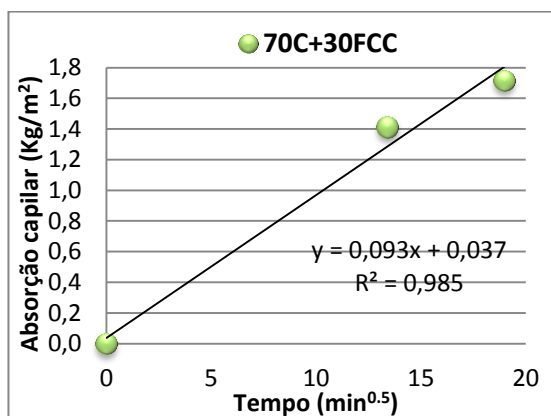
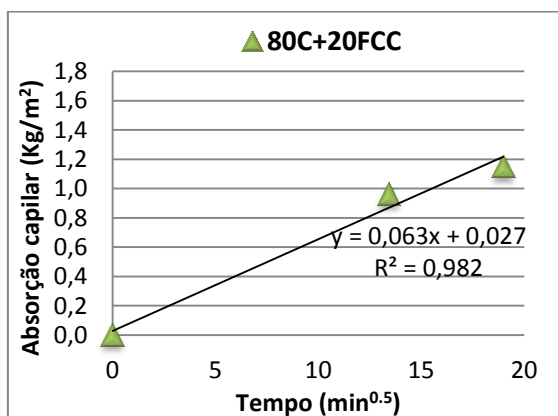
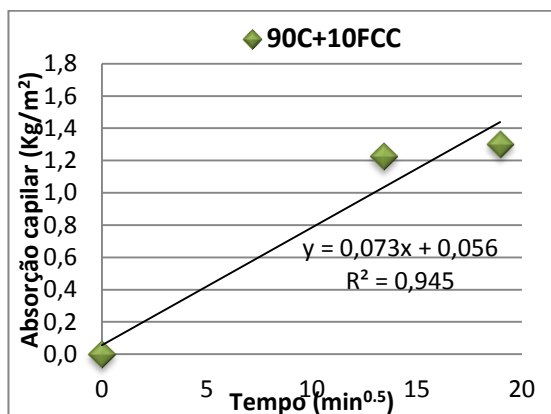
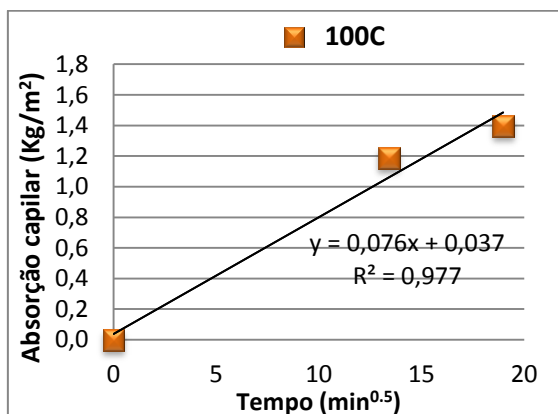


G.2 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS



G.3 – COEFICIENTES DE CAPILARIDADE

COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA AS PRIMEIRAS 6 HORAS – KC_{6H}



COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ÀS 72 HORAS – KC_{72H}

