



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

**Produção de misturas ternárias de betão
auto-compactável com cinzas de fundo da incineração de
resíduos sólidos urbanos**

BRUNO FILIPE SIMÕES LOURENÇO

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia
de Lisboa

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

Orientadores:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva, ISEL

Doutor Rui Vasco Pacheco Santos da Silva, IST

Júri:

Presidente: Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto

Vogais: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Doutor Luís Manuel Faria da Rocha Evangelista

Novembro de 2017

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação desenvolvida ao longo dos últimos meses, contou com a contribuição de várias pessoas, que direta ou indiretamente, tornaram possível a sua concretização e a quem quero expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Pedro Silva, orientador deste trabalho, quero expressar os meus sinceros agradecimentos pelo apoio e disponibilidade constante, quer no esclarecimento de dúvidas quer na ajuda prestada durante a campanha experimental.

Ao Doutor Rui Silva, orientador deste trabalho, pela mediação com a Valorsul, S.A. que permitiu a utilização das cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e no fornecimento de documentação necessária à realização deste trabalho.

À Valorsul, S.A., por ter cedido as cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos. Em especial à Engenheira Patrícia Santos e aos demais funcionários presentes na visita técnica ao Aterro de Mato da Cruz, pela cortesia e disponibilidade prestada.

À Professora Carla Costa, pela cedência das cinzas volantes e de alguns equipamentos necessários à realização da campanha experimental, e à Professora Dulce Henriques, por ter disponibilizado a sala C.-2.9(2) para o apoio à realização deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do IST pelo apoio prestado com os equipamentos de ensaio.

Ao meu colega de investigação Joel Leitão, pelo companheirismo, partilha de ideias e apoio na realização das amassaduras e na execução dos ensaios laboratoriais.

À Ana Diogo, o meu profundo agradecimento pelo apoio constante, confiança e motivação que sempre me transmitiu, não só em todas as fases deste trabalho, mas também no meu percurso académico.

Aos meus colegas de laboratório, Marcos Marques e Andreia Lopes pelo companheirismo e disponibilidade para ajudar.

Aos meus pais e avós, pelo apoio, carinho e valores que me transmitiram e que me guiaram durante a minha vida.

Aos meus amigos e colegas de curso, Rodrigo, Rafael, Tiago e Bárbara, pelas vivências partilhadas dentro e fora do ISEL.

PRODUÇÃO DE MISTURAS TERNÁRIAS DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM CINZAS DE FUNDO DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

RESUMO

Atualmente, a preocupação com a redução dos gases de efeito de estufa, levam a repensar processos de produção e avaliação de soluções alternativas. Sendo a produção de cimento uma das principais indústrias responsáveis por este fenómeno, torna-se imperativa uma mudança neste sector.

Tendo presente que o betão auto-compactável (BAC) tem necessidades particulares de trabalhabilidade, uma vez que não necessita de ser vibrado, que implica um maior volume de finos na mistura, este pode ser um caminho para a diminuição considerável do cimento em substituição por outras adições e diminuir os impactes ambientais da sua produção.

Assim, a presente dissertação visa estudar a viabilidade de produção de BAC com a substituição de parte do cimento por cinzas volantes (CV) provenientes de centrais termoelétricas e cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos (CFRSU). Neste sentido, foi realizada uma campanha experimental que teve por base o método de cálculo de quantidades de amassadura para BAC proposto por Nepomuceno (2005) onde é feito um estudo prévio das misturas em fase de argamassa. Foram considerados dois patamares de substituição de cimento (30% e 60%), cada um com dois pares de incorporação de CV e CFRSU: 10/20%; 20/10%; 20/40%; 40/20%; tendo por base de comparação um BAC com 70% de cimento e 30% de CV.

Foram realizados ensaios no estado fresco para averiguar os requisitos da norma NP EN 206-9 (2010). No estado endurecido os ensaios foram subdivididos em dois grupos, um para avaliar as propriedades mecânicas e outro a durabilidade.

Pelos resultados obtidos é verificada uma considerável diminuição da resistência mecânica de BAC com CFRSU relativamente ao betão de referência. No entanto, algumas propriedades de durabilidade apresentam valores mais favoráveis, com patamares de substituição passíveis de investigação futura.

PALAVRAS-CHAVE

Betão auto-compactável / Cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos/ Comportamento mecânico / Durabilidade / Misturas ternárias / Resíduos sólidos urbanos

PRODUCTION OF TERNARY MIXES OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH MUNICIPAL INCINERATED BOTTOM ASH

ABSTRACT

Nowadays, the growing concern about climate change, caused mainly by the greenhouse gases emitted by several industries, is leading to the rethinking of the processes of production and study alternative solutions. Knowing that the construction industry is one of the most polluting and responsible for the emission of carbon dioxide, in particular through the production of cement, a change in this sector is imperative.

Taking into account that the Self-Compacting Concrete (SCC) has particular needs for workability, since it does not have to be vibrated, implying a higher fine's volume in the mix. This can be a way for a considerable reduction of the cement when substituted by other additions and reduce the environmental impacts of their production.

The present dissertation aims to study the viability of producing self-compacting concrete by replacing part of the cement with fly ash (FA) from thermoelectric power plants and bottom ash resulting from the incineration of municipal solid waste (MIBA). Therefore, an experimental campaign was carried out based on the method of calculating quantities of SCC mixing proposed by Nepomuceno (2005), where a previous study of the mortar phase mixes is made. In this study four mixes with different percentages of integration of FA and MIBA were considered in detriment of cement: 10/20%; 20/10%; 20/40%; 40/20%; based on a SCC with 70% cement and 30% FA.

In the experimental phase, fresh state tests were performed to confirm the requirements of standard NP EN 206-9 (2010). In the hardened state, the tests were subdivided into two groups, one to evaluate the mechanical properties and the other aiming durability.

A considerable decrease of the mechanical resistance of SCC was perceived by the results obtained when compared with the SCC with 70% cement and 30% FA. On the other hand, some durability properties present beneficial results, with substitute levels for future research.

KEYWORDS

Bottom Ash / Durability / Mechanical Behavior / Municipal Solid Waste /
Self-Compacting Concrete / Ternary Mixes

ÍNDICE DE TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	2
1.2	METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC)	5
2.1.1	<i>Origem e definição</i>	5
2.1.2	<i>Materiais constituintes do BAC</i>	6
2.1.3	<i>Propriedades no estado fresco</i>	7
2.1.4	<i>Propriedades no estado endurecido</i>	8
2.1.5	<i>Vantagens e desvantagens</i>	10
2.2	CINZAS DE FUNDO DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (CFRSU).....	11
2.2.1	<i>Origem e gestão dos resíduos sólidos urbanos</i>	11
2.2.2	<i>Processo de incineração</i>	11
2.2.3	<i>Incineração na Valorsul</i>	13
2.2.4	<i>CFRSU no betão</i>	14
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	17
3.1	INTRODUÇÃO	17
3.2	COMPOSIÇÃO E DESIGNAÇÃO DAS MISTURAS	17
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS	18
3.3.1	<i>Cimento</i>	18
3.3.2	<i>Adições</i>	19
3.3.2.1	CINZAS VOLANTES.....	19
3.3.2.2	CINZAS DE FUNDO DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	20
3.3.3	<i>Adjuvante</i>	26
3.3.4	<i>Agregados</i>	27
3.3.5	<i>Água</i>	29
3.4	ESTUDO DAS ARGAMASSAS.....	29
3.4.1	<i>preparação e procedimento de amassadura</i>	30
3.4.2	<i>ensaios no estado fresco</i>	31
3.4.2.1	ENSAIO DE ESPALHAMENTO NO MINI CONE	31
3.4.2.2	ENSAIO DE ESCOAMENTO NO MINI FUNIL V	32
3.5	ESTUDO DO BETÃO.....	33
3.5.1	<i>Procedimento de amassadura</i>	35
3.5.2	<i>Ensaio no estado fresco</i>	36
3.5.2.1	ENSAIO DE ESPALHAMENTO	36
3.5.2.2	ENSAIO DE ESCOAMENTO NO FUNIL V	38

3.5.2.3	ENSAIO DE ESCOAMENTO NA CAIXA L.....	39
3.5.3	<i>Ensaio no estado endurecido (comportamento mecânico)</i>	40
3.5.3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	40
3.5.3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	41
3.5.3.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE	42
3.5.3.4	RETRAÇÃO.....	44
3.5.3.5	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS.....	45
3.5.4	<i>Ensaio no estado endurecido (Durabilidade)</i>	45
3.5.4.1	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	45
3.5.4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	46
3.5.4.3	DIFUSÃO DE CLORETOS	47
3.5.4.4	RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	49
3.5.4.5	RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO.....	50
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1	PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO FRESCO.....	53
4.2	PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO ENDURECIDO	54
4.2.1	<i>Propriedades mecânicas</i>	54
4.2.1.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS	54
4.2.1.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CILINDROS.....	59
4.2.1.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	61
4.2.1.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE	64
4.2.1.5	RETRAÇÃO.....	68
4.2.1.6	ULTRA-SONS.....	72
4.2.2	<i>Propriedades de durabilidade</i>	75
4.2.2.1	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	75
4.2.2.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	76
4.2.2.3	DIFUSÃO DE CLORETOS	80
4.2.2.4	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	81
4.2.2.5	CARBONATAÇÃO.....	83
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	87
5.1	ESTADO FRESCO	87
5.2	ESTADO ENDURECIDO.....	88
5.3	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	ANEXOS.....	A.1
A.1	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	A.3
A.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS NO BAC NO ESTADO ENDURECIDO, COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	A.5
A.2.1	<i>Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em cubos</i>	<i>A.5</i>

<i>A.2.2 Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em cilindros</i>	<i>A.6</i>
<i>A.2.3 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral A7</i>	<i>A.7</i>
<i>A.2.4 Resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade.....</i>	<i>A.8</i>
<i>A.2.5 Resultados obtidos no ensaio de retração</i>	<i>A.9</i>
<i>A.2.6 Resultados obtidos no de ultra-sons</i>	<i>A.10</i>
<i>A.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO BAC NO ESTADO ENDURECIDO, DURABILIDADE</i>	<i>A.11</i>
<i>A.3.1 Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão.....</i>	<i>A.11</i>
<i>A.3.2 Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade</i>	<i>A.12</i>
<i>A.3.3 Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos.....</i>	<i>A.13</i>
<i>A.3.4 Resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica</i>	<i>A.14</i>
<i>A.3.5 Resultados obtidos no ensaio de carbonatação.....</i>	<i>A.15</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - DIFERENÇA DE PROPORÇÕES DE MATERIAIS ENTRE O BAC E O BC (SILVA, 2013)	6
FIGURA 2.2 - DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA CENTRAL DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA (ADAPTADO DE PUNA E BAPTISTA(2008))	12
FIGURA 2.3 - DEPÓSITO DE CINZAS DE FUNDO PROCESSADAS	13
FIGURA 3.1 - PILHA DE ESCÓRIAS EM MATURAÇÃO.....	21
FIGURA 3.2 - PORMENOR DA GRELHA VIBRATÓRIA E CRIVO ROTATIVO.....	21
FIGURA 3.3 - SEPARADORES MAGNÉTICOS E ESCÓRIAS PROCESSADAS	21
FIGURA 3.4 - ESQUEMA DO PROCESSO DE VALORIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS	22
FIGURA 3.5 - SECAGEM DAS CFRSU NA ESTUFA	23
FIGURA 3.6 - MÁQUINA DE LOS ANGELES E PORMENOR DAS CFRSU E AS ESFERAS	23
FIGURA 3.7 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PERÍODOS DE TRITURAÇÃO.....	24
FIGURA 3.8 - FREQUÊNCIA DE COMPOSTOS POR DIFRAÇÃO RAO X.....	25
FIGURA 3.9 - QUATRO FOTOGRAFIAS À LUPA DAS CFRSU UTILIZADAS	25
FIGURA 3.10 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS	28
FIGURA 3.11 - SEQUÊNCIA DE AMASSADURA PARA ARGAMASSAS (SILVA, 2013)	30
FIGURA 3.12 - MISTURADORA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS.....	30
FIGURA 3.13- ENSAIO DE ESPALHAMENTO EM ARGAMASSA	31
FIGURA 3.14- ENSAIO DE ESCOAMENTO NO MINI FUNIL V.....	33
FIGURA 3.15 - SEQUÊNCIA DE AMASSADURA PARA BETÕES (SILVA, 2013).....	35
FIGURA 3.16 - BETONEIRA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DOS BETÕES.....	36
FIGURA 3.17 - ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	37
FIGURA 3.18 – ENSAIO DO FUNIL V	38
FIGURA 3.19 - ENSAIO DA CAIXA L	39
FIGURA 3.20 - ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	41
FIGURA 3.21 - ENSAIO DE COMPRESSÃO EM CILINDROS	41
FIGURA 3.22 - RETIFICAÇÃO DOS CILINDROS	41
FIGURA 3.23 - ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	42
FIGURA 3.24 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	43
FIGURA 3.25 - ENSAIO DE RETRAÇÃO	44
FIGURA 3.26 - ENSAIO DE ULTRA-SONS	45
FIGURA 3.27 - ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	46
FIGURA 3.28 - ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	47
FIGURA 3.29 - ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS	49
FIGURA 3.30 - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	50
FIGURA 3.31 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO	51
FIGURA 4.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS	56
FIGURA 4.2 - RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS E CILINDROS AOS 28 E 91 DIAS.....	60

FIGURA 4.3 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM F_{AD}	62
FIGURA 4.4 - SUPERFÍCIE DE ROTURA DOS PROVETES AOS 91 DIAS	63
FIGURA 4.5 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	64
FIGURA 4.6 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM A IDADE E COM F_{AD}	65
FIGURA 4.7 - EXPANSÃO VERIFICADA NOS PROVETES	66
FIGURA 4.8 - RELAÇÃO ENTE E_{CM} E O $F_{CM,CIL}$ PARA TODAS AS MISTURAS E PARA A PROPOSTA DO EC 2	67
FIGURA 4.9 - EXTENSÃO TOTAL DE RETRAÇÃO AO LONGO DE 91 DIAS	69
FIGURA 4.10 - VARIAÇÃO DA EXTENSÃO DE RETRAÇÃO EM FUNÇÃO DE F_{AD}	69
FIGURA 4.11 - EXTENSÃO DE RETRAÇÃO DAS MISTURAS EM ESTUDO E DO MODELO DE PREVISÃO DO EC 2.....	71
FIGURA 4.12 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS COM A IDADE E COM F_{AD} .	73
FIGURA 4.13 - RELAÇÃO ENTRE $V_{USM,C}$ E $F_{CM,C}$ PARA TODAS AS MISTURAS	74
FIGURA 4.14 - VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO COM A IDADE E COM A F_{AD}	76
FIGURA 4.15 - CURVAS DE ABSORÇÃO CAPILAR, AOS 28 E 91 DIAS	77
FIGURA 4.16 - COEFICIENTES DE ABSORÇÃO CAPILAR, AOS 28 E 91 DIAS.....	78
FIGURA 4.17 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A IDADE (A) E COM F_{AD} (B).....	81
FIGURA 4.18 - VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM A IDADE (A) E COM F_{AD} (B).....	82
FIGURA 4.19 - VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO COM A IDADE (A) E COM F_{AD} (B).....	84
FIGURA 4.20 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DA \sqrt{t}	85

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO	19
TABELA 3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO	19
TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CIMENTO	19
TABELA 3.4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS CINZAS VOLANTES	19
TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS CINZAS VOLANTES	20
TABELA 3.6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CFRSU	24
TABELA 3.7 - RESULTADOS DO ÍNDICE DE ATIVIDADE	26
TABELA 3.8 - CARACTERÍSTICAS DO SUPERPLASTIFICANTE	27
TABELA 3.9 - CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS	27
TABELA 3.10 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	28
TABELA 3.11 - PARÂMETROS DE COMPOSIÇÃO DAS AMASSADURAS	34
TABELA 3.12 - QUANTIDADES DE AMASSADURA	35
TABELA 4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS NO BAC NO ESTADO FRESCO	53
TABELA 4.2 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS	55
TABELA 4.3 - COEFICIENTES DE ENDURECIMENTO DOS BAC	58
TABELA 4.4 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CILINDROS	59
TABELA 4.5 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	61
TABELA 4.6 - MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE	65
TABELA 4.7 - EXTENSÃO TOTAL DE RETRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO	68
TABELA 4.8 - PREVISÃO DA EXTENSÃO DE RETRAÇÃO SEGUNDO O EC 2	70
TABELA 4.9 - RESULTADOS DE ULTRA-SONS PARA TODOS OS BAC	72
TABELA 4.10 - CLASSIFICAÇÃO DO BETÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÓNICAS, (ADAPTADO DE IAEA (2002))	74
TABELA 4.11 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	75
TABELA 4.12 - RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	77
TABELA 4.13 - QUALIDADE DO BETÃO EM FUNÇÃO DO SEU COEFICIENTE DE ABSORÇÃO CAPILAR (ADAPTADO DE BROWNE (1991) E NEVILLE (1995))	79
TABELA 4.14 - COEFICIENTES DE DIFUSÃO DE CLORETOS	80
TABELA 4.15 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA	82
TABELA 4.16 - PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO E RESPECTIVOS COEFICIENTES	84

ABREVIATURAS

APA - Agência Portuguesa do Ambiente
BAC - Betão auto-compactável
BC - Betão convencional
CFRSU - Cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos
CP - Cimento Portland
CTRSU - Central de tratamento de resíduos sólidos urbanos
CV - Cinzas volantes
EC 2 - Eurocódigo 2
FC - Fíler calcário
IA - Índice de atividade
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
IST - Instituto Superior Técnico
ITVE - Instalação de tratamento e valorização de escórias
PERSU - Plano estratégico para os resíduos urbanos
RSU - Resíduos sólidos urbanos

SIMBOLOGIA

a/c - Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
 Abs_m - Valor médio da absorção capilar (kg/m^2)
 Al_2O_3 - Óxido de alumínio
 $A_{m,id}$ - Valor médio da absorção de água por imersão na idade i (%)
 C_{end} - Coeficiente de endurecimento
 CO_2 - Dióxido de carbono
 $Coef_{abs}$ - Coeficiente de absorção capilar ($mm/min^{0,5}$)
 C_{var} - Coeficiente de variação (%)
 d_{km} - Valor médio da profundidade média de carbonatação (mm)
 $D_{m,id}$ - Coeficiente de difusão de cloretos na idade i (m^2/s)
 $E_{cm,id}$ - Valor médio do módulo de elasticidade secante na idade i (GPa)
 ϵ_{cs} - Extensão total de retração ($\mu m/m$)
 f_{ad} - Percentagem unitária de substituição de cimento pela adição
 $f_{cm,c,id}$ - Valor médio da resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos na idade i (MPa)
 $f_{cm,cil,id}$ - Valor médio da resistência à compressão uniaxial em provetes cilíndricos na idade i (MPa)

- $f_{ctm,spl,id}$ - Valor médio da resistência à tração por compressão diametral na idade i (MPa)
- K_c - Coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{0,5}$)
- NM - Número de mistura que define o produto de V_p/V_s por V_m/V_g
- pH - Potencial de hidrogénio iónico
- PL - Classe de capacidade de passagem da caixa L
- S - Coeficiente de absorção capilar ($mm/min^{0,5}$)
- s - Desvio padrão
- SF - Classe de espalhamento (mm)
- SiO₂ - Dióxido de silício
- S_p - Superplastificante
- S_p/p% - Razão percentual em massa entre as quantidades totais de S_p e de materiais finos na mistura
- t₅₀₀ - Tempo em segundos até um espalhamento de diâmetro 500 mm, no ensaio com o cone de Abrams (s)
- TiO₂ - Dióxido de titânio
- t_v - Tempo de escoamento no funil V (s)
- VF - Classe de viscosidade no ensaio do funil V (s)
- V_g - Volume absoluto do total de agregados grossos da mistura (m^3/m^3)
- V_m - Volume absoluto de argamassa na mistura (m^3/m^3)
- V_m/V_g - Razão em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos na mistura
- V_p - Volume absoluto do total de material fino da mistura (m^3/m^3)
- V_{usm,c,id} - Velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas na idade i (m/s)
- V_v - Volume de vazios da mistura (m^3/m^3)
- V_w - Volume de água da mistura (m^3/m^3)
- V_w/V_p - Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e materiais finos na mistura
- Zn - Zinco
- ZnO - Óxido de zinco
- Δ_{REF} - Diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (%)
- ρ_{m,id} - Valor médio da resistividade elétrica na idade i (Ω.m)

1 INTRODUÇÃO

O sector da construção sempre soube, ao longo dos anos, adaptar-se às mudanças que os diferentes contextos socioeconómicos lhe exigiram, quer através de novas soluções construtivas, quer pela introdução de novos materiais. Atualmente, o grande foco de mudança na indústria da construção deriva das preocupações ambientais e da sustentabilidade. Com o betão a atingir grandes níveis de produção e sendo o cimento Portland (CP) um dos seus constituintes e o maior responsável pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂) da produção de betão, cerca de 74-81% do total, é evidente a necessidade de redução deste componente (Flower & Sanjayan, 2007).

A par da problemática das emissões de CO₂ para a atmosfera, também se perspetiva que a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) irá aumentar cerca de 2,2 mil milhões de toneladas por ano até 2025 (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012), o que levará conseqüentemente a um aumento dos subprodutos resultantes da sua combustão. Na queima dos resíduos sólidos urbanos (RSU), o subproduto mais importante são as cinzas de fundo, que representam cerca de 85% a 95% do total de subprodutos resultantes da incineração (Chandler *et al.*, 1997), havendo assim a necessidade de dar uma nova vida a estes resíduos.

Neste contexto, surge a possibilidade de substituir parte do cimento existente na composição do betão auto-compactável (BAC) por cinzas volantes (CV) e por cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (CFRSU), provenientes da empresa Valorsul, S.A.. Deste modo, é possível não só reduzir as emissões de CO₂ provocadas pela produção exaustiva de cimento, bem como reduzir a extração de matérias-primas não renováveis necessárias para o seu fabrico. Além de garantir a reutilização de um subproduto industrial, que teria como destino final o aterro.

A presente dissertação foi realizada no âmbito do projeto de I&D “EcoBetão: Produção de betão auto-compactável (BAC) com cinzas da incineração de resíduos sólidos urbanos” numa parceria entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

(ISEL) e o Instituto Superior Técnico (IST). A orientação do estudo esteve a cargo do Doutor Pedro Silva (ISEL) e do Doutor Rui Silva (IST-CERIS), sendo a campanha laboratorial realizada quer no laboratório de construção do ISEL quer no laboratório de construção do IST.

1.1 Objetivo da Dissertação

Este trabalho pretende proporcionar à indústria uma nova forma de escoamento de resíduos produzidos (CFRSU), através da sua incorporação em misturas ternárias de BAC, promovendo uma campanha laboratorial com diversas misturas de forma a analisar a sua durabilidade e resistência mecânica. Neste sentido, os principais objetivos foram:

- Caracterizar as CFRSU utilizadas;
- Estudar a viabilidade da produção de BAC com cinzas volantes e cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos;
- Avaliar as propriedades no estado endurecido de BAC produzido em misturas ternárias de CV e CFRSU;
- Comparar as propriedades das misturas em estudo com um BAC de referência;

1.2 Metodologia da Dissertação

Neste subcapítulo, apresenta-se a metodologia a adotar na dissertação, tendo presente o cumprimento dos objetivos anteriormente referidos.

Inicialmente, fez-se uma recolha e revisão da bibliografia referente às propriedades do BAC mais relevantes para o estudo e uma revisão do nível de conhecimento sobre os BAC e sobre as CFRSU.

Na fase seguinte, foi desenvolvida a campanha experimental de acordo o método de Nepomuceno (2005) e assente nos seguintes pontos:

- Seleção e caracterização dos materiais a usar no estudo;
- Construção de folhas de cálculo auxiliares à prática laboratorial, para determinação das quantidades dos constituintes das amassaduras;
- Preparação das amassaduras das diferentes argamassas para determinar os valores de V_w/V_p (relação entre as quantidades de água e

de materiais finos) e de $S_p/p\%$ (relação percentual, em massa, entre as dosagens de S_p e de materiais finos) através dos ensaios de espalhamento e do mini-funil V;

- Após a determinação dos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$, são definidos o volume de vazios e a razão entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos, permitindo assim a produção dos betões e caracterizando-os através de ensaios no estado fresco.
- No estado endurecido efetuaram-se ensaios para averiguar as propriedades mecânicas e a durabilidade. No que às propriedades mecânicas diz respeito, foram avaliados: a resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos e cilíndricos; a resistência à tração pelo ensaio indireto de compressão diametral; o módulo de elasticidade estático; e a retração. Quanto à durabilidade avaliou-se: a absorção de água por imersão; a capilaridade através do ensaio de absorção de água por capilaridade; a difusão pelo ensaio de penetração de cloretos e pela resistividade elétrica; a carbonatação pelo ensaio de carbonatação acelerada. Foi ainda realizado o ensaio de propagação de ondas ultra-sónicas.

Concluída a fase experimental procedeu-se ao tratamento, análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados para as diferentes misturas de BAC em estudo.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo que a seguir se apresenta um resumo dos mesmos:

O capítulo 1 corresponde à introdução onde se apresenta um enquadramento do tema escolhido, se justifica a sua importância, apresentam os objetivos principais do estudo, a metodologia a adotar e a estrutura a utilizar na dissertação;

O capítulo 2 divide-se em duas partes: uma parte sobre estado do conhecimento do BAC e suas principais propriedades no estado fresco e no estado endurecido; e outra sobre as CFRSU, incidindo na sua origem e nas investigações já realizadas sobre a sua incorporação em betão;

O terceiro capítulo assenta na campanha experimental, descrevendo os materiais utilizados e a sua caracterização, os procedimentos seguidos na preparação

das amassaduras e os ensaios realizados nas argamassas e nos betões, tanto no estado fresco como no estado endurecido;

No quarto capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios efetuados no betão durante a campanha experimental (capítulo 3), que para o estado fresco quer para o estado endurecido (comportamento mecânico e durabilidade). Como base de comparação, utilizou-se um BAC de referência e, sempre que possível, os dados foram cruzados com os resultados obtidos por outros autores;

O quinto e último capítulo está reservado para a apresentação das conclusões finais adquiridas após análise dos resultados experimentais e para propostas de desenvolvimentos futuros relativos ao estudo do tema desta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Betão auto-compactável (BAC)

2.1.1 ORIGEM E DEFINIÇÃO

A necessidade de garantir a durabilidade das estruturas de betão armado no Japão nos anos 80, levou o Professor Okamura a desenvolver um novo tipo de betão (auto-compactável) que não necessitasse de mão-de-obra na sua compactação, conduzindo diversos estudos na Universidade de Tóquio. A principal causa da reduzida durabilidade das estruturas residia na falta de homogeneidade do betão convencional (BC), devido à falta de trabalhadores qualificados para a execução da compactação nas cofragens (Nepomuceno, 2005).

No início dos anos 90 do século XX, no Japão, o desenvolvimento desta tecnologia permitiu a sua utilização em estruturas de edifícios e na construção de pontes, com o betão a ocupar completamente as cofragens sem necessidade de vibração, evitando assim os problemas de homogeneidade. Na Europa, pela mesma altura, dá-se o início da utilização do BAC, maioritariamente pelas empresas de pré-fabricação, mas também com aplicações pontuais em estruturas de pontes e edifícios (Silva & Brito, 2009).

Deste modo, é possível considerar o BAC um betão que, no estado fresco, apresenta a capacidade de preencher as cofragens, envolvendo as armaduras unicamente com a ação do seu próprio peso e garantido a homogeneidade sem necessidade de receber qualquer energia de vibração (Nepomuceno, 2005).

2.1.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DO BAC

Os materiais necessários para a produção de um BAC são os mesmos que se utilizam num betão convencional (BC), mais precisamente: cimento, adições, água, adjuvantes e agregados. No entanto, as proporções dos referidos materiais são diferentes para os dois tipos de betão. Relativamente ao BC, o BAC requer uma maior quantidade de pasta na mistura, garantida pelo aumento do volume de material fino (cimento e adições) e de adjuvantes, garantido assim a diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa (Silva, 2013).

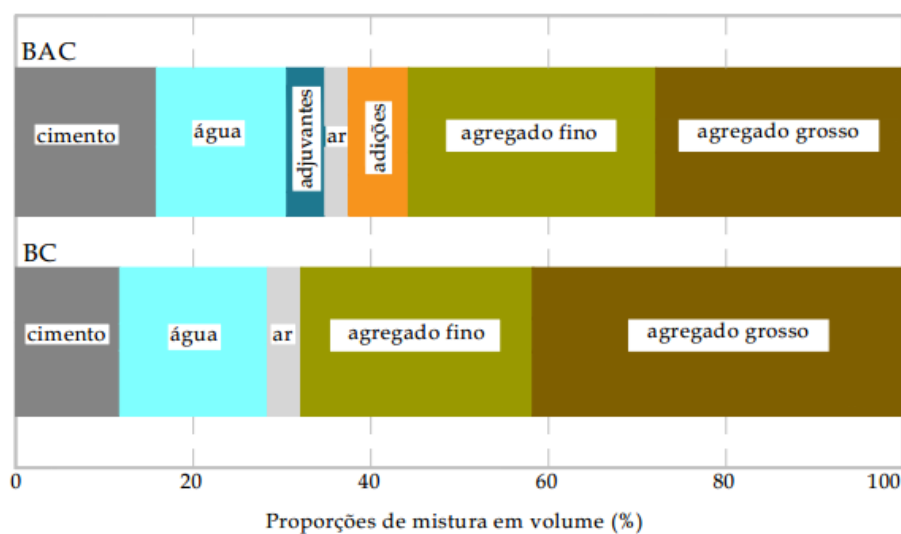


Figura 2.1 - Diferença de proporções de materiais entre o BAC e o BC (Silva, 2013)

No que diz respeito às adições, estas dividem-se em dois grupos, as quase inertes (tipo I) e as pozolânicas ou potencialmente hidráulicas (tipo II).

A principal adição do tipo I, o fíler calcário (FC), caracteriza-se por ser um material fino, obtido a partir da moagem do calcário e contendo maioritariamente carbonato de cálcio (calcite). A sua utilização, em substituição do cimento, pode contribuir de forma positiva para a trabalhabilidade, compacidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e retração do betão (Silva, 2013).

Quanto às adições do tipo II, destaca-se a cinza volante (CV), proveniente da queima de carvão em centrais termoelétricas. A sua composição assenta essencialmente em dióxido de silício (sílica; SiO_2) e óxido de alumínio (alumina; Al_2O_3), o que lhe confere propriedades pozolânicas. A sílica é o principal agente químico das CV ao reagir lentamente com hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, podendo condicionar o desenvolvimento da resistência mecânica. Por outro lado, conferem uma maior compacidade ao betão e produzem uma melhoria na fluidez,

devido ao efeito provocado pela forma esférica das suas partículas. Quando introduzidas no betão, as cinzas volantes permitem aumentar a viscosidade no estado fresco, obtendo-se uma boa resistência à segregação, preservando a fluidez (Nepomuceno, 2005).

O principal adjuvante utilizado no BAC e um dos seus principais componentes é o superplastificante, que confere ao betão um aumento da fluidez sem a necessidade de aumentar a quantidade de água, reduzindo desta forma a ocorrência de fenómenos de exsudação (Silva, 2013).

Relativamente aos agregados, estes podem ser do mesmo tipo dos utilizados na produção de BC, não existindo limitações quanto à sua natureza, composição ou origem. No entanto, a utilização de uma granulometria contínua pode conduzir a melhoramentos do BAC no estado fresco (Silva, 2013).

2.1.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

As propriedades no estado fresco são a principal característica diferenciadora do BAC relativamente a um BC. A sua auto-compactibilidade a nível mecânico está relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto que na prática devem ser verificadas as seguintes propriedades de trabalhabilidade: capacidade de escoamento, capacidade de passagem e resistência à segregação (Nepomuceno, 2005).

Entende-se por reologia, o estudo da mecânica dos fluidos, permitindo avaliar as propriedades de fluxo do BAC. Considerando que o BAC no estado fresco se comporta como um fluido, este pode ser visto como uma suspensão das partículas dos agregados numa pasta líquida (água, adjuvantes e finos). Deste modo, é possível caracterizar o comportamento reológico através da tensão de cedência interna entre partículas e pela viscosidade plástica (Nepomuceno, 2005).

A capacidade de escoamento representa a facilidade do BAC no estado fresco se deformar e ocupar todos os espaços, contornando obstáculos apenas através da ação da gravidade, sem necessidade de métodos auxiliares de vibração ou ocorrência de segregação. Desta forma, é garantida a proteção das armaduras pelo BAC e o cumprimento das espessuras de recobrimento. Esta propriedade é habitualmente avaliada pelo ensaio de espalhamento e/ou do funil V (Silva, 2013).

A capacidade de passagem consiste na propensão do BAC fluir livremente pela cofragem, através das armaduras ou de pequenas aberturas na mesma. A deformabilidade do BAC deve ser elevada, permitindo que este flua uniformemente e

sem bloqueios. Esta propriedade é habitualmente aferida através dos ensaios da caixa L e/ou do anel J (Silva, 2013).

A resistência à segregação é provavelmente a principal propriedade que um BAC deve verificar. A sua tendência para segregar é maior que no BC, uma vez que, devido ao uso de superplastificantes para conferir a auto-compactibilidade, ocorre uma redução da viscosidade (Silva, 2013).

A distribuição das partículas de agregado grosso no BAC tem de ser equivalente em todas as localizações e nos vários níveis de altura, afim de conferir uma boa resistência à segregação enquanto o betão escoar em todas as direções. Deste modo, é fundamental manter uma viscosidade adequada da pasta, reduzindo a água livre na mistura e aumentando o volume de cimento, adições e areia (Silva & Brito, 2009).

2.1.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Numa fase inicial do estudo a realizar, é de extrema importância fazer um levantamento das propriedades do BAC mais relevantes. Analisando as propriedades mecânicas e de durabilidade já estudadas por outros autores nos seus trabalhos de investigação.

No que à resistência mecânica diz respeito, pode afirmar-se que a percentagem de adição que substitui o cimento influencia o comportamento do BAC. Autores como Ouchi (1998) referem que para a mesma relação água / cimento (a/c) e com dosagens equivalentes a resistência mecânica do BAC não varia significativamente em relação à de um betão convencional. No entanto, um estudo desenvolvido por Naik *et al.* (2012), baseado na produção de BAC com adição de CV numa percentagem de substituição de 35 a 55% da massa de cimento revela que para todas as misturas estudadas a resistência mecânica apresentou valores satisfatórios, apesar de diminuir com o aumento da percentagem de CV nas idades iniciais.

Também Hannesson *et al.* (2012) se interessaram pela incorporação de CV no BAC, estudando o efeito na resistência mecânica da utilização de grandes percentagens de substituição do cimento. Do seu estudo concluíram que apenas nas misturas com taxas de substituição superiores a 40% a resistência mecânica era inferior ao BC de referência. Já para idades mais avançadas, e com percentagens de substituição menores que 60%, os valores de resistência mecânica demonstraram-se iguais ou superiores ao betão de referência.

Quanto aos resultados da tração por compressão de BAC, o efeito da incorporação de CV entre 15 e 35% levou a uma diminuição da resistência do BAC, com efeito progressivo conforme o aumento da percentagem (Siddique *et al.*, 2012).

Relativamente à absorção capilar, nos estudos realizados com incorporação de CV em percentagens de 30 a 70%, foi concluído de uma forma geral que o elevado volume de CV contribui de forma positiva para a durabilidade do BAC, sendo as melhorias substanciais com aumento da idade dos ensaios (Şahmaran *et al.*, 2009).

Dentro do mesmo âmbito, Liu (2010) desenvolveu um estudo mais ambicioso com a inclusão de CV no BAC até à percentagem de 80% em substituição do cimento. Dessa investigação foi possível verificar que o coeficiente de absorção capilar diminuiu progressivamente com o aumento da percentagem de CV até 40%, mas a partir deste valor aumentou de forma considerável, além de que para todas as misturas com o aumento da idade do ensaio o coeficiente tendeu a diminuir.

Fazendo referência à carbonatação do BAC, Makishima *et al.* (2001) avaliaram a profundidade de carbonatação de diversas misturas de ligantes e adições para um período de exposição de seis meses, concluindo que para as resistências mecânicas superiores a 100 MPa a profundidade foi praticamente de 0 mm. Por outro lado, uma comparação feita entre diferentes classes de resistência de BAC e BC indica que a taxa de carbonatação é superficialmente superior nos BAC relativamente aos BC, devido em grande parte à porosidade dos BAC (Assié, 2004).

Assim, as adições no BAC em detrimento do cimento assumem um papel importante na redução da profundidade de carbonatação. Sendo evidente que as adições levam a uma redução do pH da pasta, uma vez que ocorre uma redução do volume de cimento, responsável pela alcalinidade do betão. É também de notar que essas mesmas adições provocam uma pasta mais densa com um menor índice de porosidade, levando assim a uma menor capacidade de penetração por parte do dióxido de carbono. Desta forma é evidente que é necessário definir um teto máximo para a percentagem de adições a incorporar no BAC de modo que os benefícios que estas produzem sejam superiores aos inconvenientes (Barros, 2008).

Ainda no âmbito da durabilidade, a incorporação de elevados volumes de CV conduz a uma melhoria na resposta do BAC à penetração de cloretos (Şahmaran *et al.*, 2009). Estas conclusões são também confirmadas por Kovler e Roussel (2011) e Siddique (2011) que indicam que todas as misturas estudadas com incorporação de 15 a 35% de CV levaram à redução significativa dos valores de penetração de cloretos.

2.1.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As principais vantagens apresentadas pelo betão auto-compactável relativamente ao betão convencional são descritas nos pontos que se seguem (Nepomuceno, 2005):

- **Melhoria da produtividade** - através da eliminação do processo de compactação é possível aumentar a velocidade e reduzir os custos de construção;
- **Melhoria do ambiente de trabalho** - através da eliminação do ruído e do esforço físico inerente à vibração do betão, bem como a redução dos incómodos para os prédios vizinhos à obra;
- **Melhoria da homogeneidade** - através de uma compactação mais eficiente, mesmo em zonas de difícil acesso para a compactação por vibradores, proporcionando melhorias na durabilidade e no acabamento da superfície dos betões.

Por outro lado, o betão auto-compactável apresenta algumas desvantagens em relação ao betão convencional (Nepomuceno, 2005):

- **Custo** - o elevado custo do BAC comparativamente ao BC, resulta essencialmente da maior percentagem de material fino requerida pelo BAC, sendo um dos componentes o cimento;
- **Propriedades no estado endurecido** - relativamente ao BC, o betão auto-compactável apresenta uma maior suscetibilidade aos fenómenos de retração e fluência, devido essencialmente à maior quantidade de cimento e de adições presentes na mistura.

2.2 Cinzas de Fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos (CFRSU)

2.2.1 ORIGEM E GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O conceito de resíduo sólido urbano (RSU) abrange o “resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações” (Artigo 3º Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho). De acordo com o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020), a composição física dos RSU assenta numa grande variedade de materiais, tais como materiais biodegradáveis, plásticos, têxteis, vidro, metais, compósitos e cerâmicos (Portaria n.ª 187-A/2014 de 17 de setembro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 2014). Devido à sua complexidade, diversidade e composição, a gestão destes resíduos torna-se fundamental, atuando em duas fases: na recolha e no tratamento e deposição final (Puna & Baptista, 2008).

A recolha dos resíduos pode ser feita de três formas: recolha seletiva de matéria orgânica, efetuada nos setores da restauração, hotelaria, mercados abastecedores e na limpeza de espaços verdes; recolha indiferenciada, correspondente aos resíduos depositados nos contentores tradicionais; e recolha seletiva de materiais recicláveis, efetuada através dos ecopontos ou de ecocentros (Puna & Baptista, 2008).

O destino dos resíduos recolhidos depende do processo de recolha a que foram sujeitos, sendo as principais operações de gestão: o aterro, a valorização energética através da incineração, a valorização orgânica, valorização material, tratamento mecânico e tratamento mecânico e biológico.

A produção de resíduos em Portugal, em 2016, foi de 4,9 milhões de toneladas, superior em 3% ao ano de 2015. Desses resíduos, 29% foram encaminhados para aterro, 26% para tratamento mecânico e biológico, 23% para valorização energética, 11% para valorização material, 8% para tratamento mecânico e 3% para valorização orgânica (APA, 2017).

2.2.2 PROCESSO DE INCINERAÇÃO

Na gestão de resíduos, a prioridade passa pela prevenção da produção de resíduos, no entanto, quando tal não acontece, as etapas seguintes passam pela reciclagem, valorização, incineração e só em último recurso a deposição em aterro.

Devido à escassez de espaço disponível para a deposição de resíduos em aterro, os custos deste processo tendem a aumentar, o que, aliado a questões de contaminação de águas e saúde pública, fortalecem a hipótese da incineração como gestão dos resíduos face ao aterro direto. A incineração permite não só a destruição de alguns resíduos, como também reduz o seu volume e peso em cerca de 90% e 70%, respetivamente (Jardim, 2015).

O processo de incineração consiste na queima, por combustão, dos resíduos provenientes da recolha indiferenciada e que não foram passíveis de serem reciclados. Os resíduos são queimados com o oxigénio do ar, a temperaturas entre os 900 °C e 1200 °C. O controlo da temperatura e do período de arrefecimento dos gases produzidos durante a queima é fundamental para minimizar a formação de compostos tóxicos. Deste modo, a central de incineração deve estar equipada com sistemas que permitam o tratamento dos gases de combustão (Puna & Baptista, 2008).

Por outro lado, a incineração possibilita a valorização energética dos resíduos através da produção de energia elétrica. O calor gerado durante a queima permite transformar a água em vapor, encaminhando-o posteriormente para uma turbina com o objetivo de produzir energia elétrica (Puna & Baptista, 2008). A Figura 2.2 apresenta um diagrama de funcionamento de uma central de valorização energética.

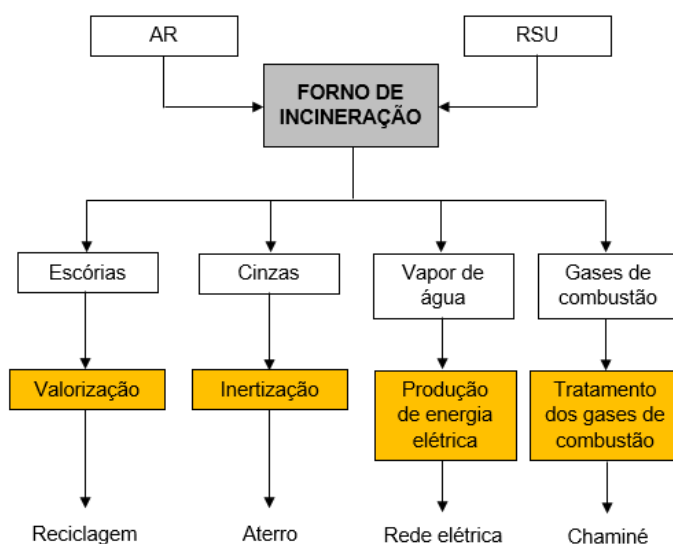


Figura 2.2 - Diagrama de funcionamento de uma central de valorização energética (adaptado de Puna e Baptista(2008))

Como resultado da queima dos RSU, são gerados dois produtos secundários, as cinzas volantes e as escórias ou cinzas de fundo (CFRSU). As cinzas de fundo são

recolhidas no final da linha de incineração, apresentando heterogeneidade de calibre e de composição. Os principais materiais presentes nas cinzas são pedras, vidro, porcelana, cerâmica, metais ferrosos e não-ferrosos e as cinzas dos materiais combustíveis (Jardim, 2015).

2.2.3 INCINERAÇÃO NA VALORSUL

As cinzas de fundo utilizadas na presente dissertação são provenientes da queima de resíduos urbanos na central de tratamento de resíduos sólidos urbanos (CTRSU) da Valorsul. Esta instalação, inaugurada em fevereiro de 2000, serve 19 municípios da região de Lisboa e Oeste, num total de 1,6 milhões de habitantes. Posteriormente, as cinzas são enviadas para a instalação de tratamento e valorização de escórias (ITVE) para serem processadas, com vista à sua valorização e possível utilização (Figura 2.3) (Valorsul, 2017).



Figura 2.3 - Depósito de cinzas de fundo processadas

Em 2016, a CTRSU processou cerca de 664 mil toneladas de RSU, um valor superior em 7% face ao ano anterior. Após a queima, as escórias armazenadas foram enviadas para a ITVE, tendo sido processadas cerca de 116 mil toneladas de escórias. Removidos os metais ferrosos e não-ferrosos, resultaram 99 mil toneladas de escórias valorizadas, mais 5 toneladas do que em 2015 (Valorsul, 2017).

Atualmente, a Valorsul aplica parte das cinzas de fundo valorizadas na cobertura de resíduos urbanos nos aterros de Mato da Cruz e do Cadaval (40 mil toneladas). O restante material é comercializado como agregado artificial para a construção rodoviária, aplicando-se como camadas não ligadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (Valorsul, 2017).

2.2.4 CFRSU NO BETÃO

Além das aplicações já conhecidas para as CFRSU, têm sido desenvolvidos estudos para a utilização destas cinzas noutras áreas da construção civil, nomeadamente na sua incorporação em argamassas e betões.

A utilização de CFRSU, tanto em argamassa como em betão, em substituição dos agregados finos ou grossos apresenta uma investigação mais aprofundada quer a nível de comportamento mecânico quer do efeito das cinzas na durabilidade a longo prazo. Os estudos conduzidos por Collivignarelli *et al.* (2017) e Dixi *et al.* (2016) assentaram no comportamento mecânico de betões com CFRSU como agregado fino, registando melhorias na resistência mecânica com o aumento da percentagem de substituição. Já Pera *et al.* (1997); Van Der Wegen *et al.* (2013) e Lynn *et al.* (2016) abordaram a introdução de cinzas como agregado grosso e fino em betão, investigando tanto o comportamento mecânico como a durabilidade. As misturas de Pera *et al.* (1997) com substituição de agregado grosso apresentaram degradação das propriedades mecânicas e de durabilidade. Van Der Wegen *et al.* (2013) registaram melhorias na resistência à carbonatação tanto na substituição de agregado grosso como na de agregado grosso e fino, no entanto, a resistência à compressão e a difusão de cloretos foram negativamente afetadas pela substituição.

No que diz respeito à substituição de cimento por CFRSU, os estudos existentes em argamassa e em betão centralizam-se principalmente na produção de misturas binárias (CFRSU e cimento) e no efeito das CFRSU nas propriedades mecânicas.

Amat *et al.* (2017) salientaram a possibilidade das CFRSU terem comportamento pozolânico ou hidráulico devido à sua composição ser similar à do cimento, no entanto, verificaram uma diminuição da resistência à compressão com o aumento de CFRSU no betão. Também Jurič *et al.* (2006) verificaram a mesma tendência com o aumento de CFRSU.

Lin e Lin (2006) e Cheng (2012) estudaram a incorporação de CFRSU em argamassas, registando igualmente uma diminuição da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição. Li *et al.* (2012) aplicou as CFRSU em misturas binárias e ternárias com cinza volante de argamassa, verificando uma degradação da resistência à compressão das misturas com CFRSU relativamente à mistura de referência, acentuada pelo aumento da substituição de cimento.

Apenas Bertolini *et al.* (2004) verificam a resistividade elétrica e a penetração de cloretos de betão com CFRSU; contudo, o estudo incide na comparação de várias adições, sempre com 30% de substituição de cimento. Apesar desse facto, a resistência

à compressão do betão com 30% é muito mais baixa do que no betão de referência (100% cimento).

A maioria dos autores referem a importância da secagem prévia das CFRSU e a sua trituração, com o objetivo de aproximar a granulometria das cinzas à do cimento.

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a descrição da campanha experimental desenvolvida, que serviu de base à presente dissertação. Os procedimentos realizados durante a campanha procuraram dar resposta aos objetivos traçados no Capítulo 1.

Inicialmente, é feita uma descrição da formulação e composição das misturas em estudo. São também apresentados os materiais utilizados na produção das argamassas e dos betões, bem como a sua caracterização.

Segue-se uma breve apresentação da preparação e dos procedimentos executados na produção das argamassas e dos betões.

Por último, são descritos os procedimentos de ensaio executados no estado fresco para argamassas e betões, e no estado endurecido apenas para os betões. De salientar que os ensaios descritos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico.

3.2 Composição e designação das misturas

Os betões produzidos neste trabalho seguiram a metodologia de cálculo de BAC desenvolvida por Nepomuceno (2005), baseado nos métodos japoneses de Okamura *et al.* (2000) e da JSCE (1998), estando as quantidades utilizadas para cada amassadura apresentadas no anexo A.1.

Tendo em vista o estudo da influência da incorporação de CFRSU nas propriedades mecânicas e de durabilidade de BAC com substituição de cimento por CV,

foram produzidas quatro amassaduras ternárias de CV e CFRSU e uma amassadura de referência apenas com incorporação de CV de acordo com a NP EN 206-9 (2010), Betão – Regras adicionais para betão auto-compactável (BAC).

A escolha das amassaduras teve como foco principal abranger uma grande amplitude de substituição do cimento, definindo os extremos de percentagem de substituição (f_{ad}) em 30% e 60%. Assim optou-se por pares de substituição para o patamar de 30%: 10%/20% e 20%/10%, respetivamente CV e CFRSU; e para o patamar de 60%: 20% de CV e 40% de CFRSU, e 40% de CV e 20% CFRSU. Como betão de referência foi escolhida uma mistura com 70% de cimento e 30% de CV de acordo com os resultados obtidos por Silva (2013).

São apresentadas na seguinte lista as nomenclaturas atribuídas a cada uma das misturas de BAC produzidas:

- REF - mistura de referência com 70% de cimento e 30% de CV;
- B10CV20CF - mistura com 10% de CV e 20% de CFRSU;
- B20CV10CF - mistura com 20% de CV e 10% de CFRSU;
- B20CV40CF - mistura com 20% de CV e 40% de CFRSU;
- B40CV20CF - mistura com 40% de CV e 20% de CFRSU.

3.3 Materiais utilizados

Tendo em conta a produção de misturas ternárias de BAC onde o estudo se foca na adição de CFRSU, procurou-se escolher um material base disponível na zona de Lisboa. No que diz respeito aos outros materiais necessários (agregados, cimento, adição e adjuvantes), optou-se por materiais de uso corrente na produção de betão e disponíveis localmente.

Desse modo, são apresentados nos subcapítulos seguintes os materiais utilizados na realização da presente dissertação e algumas das suas principais características.

3.3.1 CIMENTO

O cimento utilizado na campanha experimental foi do tipo CEM I 42,5 R da CIMPOR, produzido na fábrica de Alhandra. O cimento foi fornecido em sacos de 25 kg, sendo constituído principalmente por clínquer ($\geq 95\%$) e estando o seu desempenho de acordo com a NP EN 197-1 (2012). As principais características são apresentadas na Tabela 3.1 à Tabela 3.3 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Características químicas do cimento

Análise química (%)	CEM 42,5 R
Perda ao fogo	≤ 5,0
Resíduo insolúvel	≤ 5,0
Sulfatos (SO ₃)	≤ 4,0
Cloretos (Cl)	≤ 0,10

Tabela 3.2 - Características físicas do cimento

Análise física	CEM 42,5 R
Início de presa (min)	≥ 60
Expansibilidade (mm)	≤ 10

Tabela 3.3 - Características mecânicas do cimento

Ensaio mecânico	CEM I 42,5 R	Idade (dias)
Resistência à compressão (MPa)	20,0	2
	42,5	28

3.3.2 ADIÇÕES

3.3.2.1 Cinzas volantes

Uma das adições utilizadas no presente estudo foram cinzas volantes (CV), fornecidas pela Betão Liz, S.A. e produzidas pela EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. na fábrica do Centro de Produção de Sines. As cinzas volantes apresentam-se conforme a NP EN 450-1 (2012) e as suas características físicas e químicas são expostas na Tabela 3.4 e Tabela 3.5, de acordo com os dados do fornecedor.

Tabela 3.4 - Características físicas das cinzas volantes

Análise física		Cinzas volantes
Massa volúmica	(kg/m ³)	2300
Superfície específica de Blaine	(cm ² /g)	3210
Resíduo de peneiração (45 µm)	(%)	<15
Humidade	(%)	0,01 – 0,30

Tabela 3.5 - Características químicas das cinzas volantes

Análise química (%)		Cinzas volantes
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	24,70
Óxido de cálcio	CaO	2,63
Cloretos	Cl ⁻	<0,01
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	5,40
Óxido de potássio	K ₂ O	1,112
Óxido de magnésio	MgO	1,01
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,89
Óxido de silício	SiO ₂	54,70
Sulfatos	SO ₃	1,38
Perda ao fogo	PF	5,10

3.3.2.2 Cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos

Na realização da presente dissertação, foram utilizadas cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (CFRSU) provenientes da Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias (ITVE) da empresa Valorsul, localizada no Aterro Sanitário de Mato da Cruz, concelho de Vila Franca de Xira. A amostra necessária para a campanha experimental foi recolhida em março de 2017 e correspondeu a escórias entregues na ITVE em dezembro de 2017.

Tratamento das CFRSU na ITVE

As escórias que chegam à ITVE resultam da queima de resíduos sólidos urbanos na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (CTRSU), localizada em São João da Talha, concelho de Loures. O transporte até à ITVE é assegurado por camiões, sendo as escórias depositadas ao ar livre e organizadas em pilhas, que correspondem a lotes mensais devidamente identificados. Inicia-se assim o processo de maturação das escórias, que dura no mínimo três meses, promovendo a realização de reações químicas entre os materiais constituintes das escórias e a atmosfera (Figura 3.1) (DA 58, 2015).



Figura 3.1 - Pilha de escórias em maturação

Após o período referido, dá-se início ao processamento das escórias com a sua passagem por uma grelha vibratória com aberturas de 250 mm por 300 mm, removendo assim partículas mais grosseiras. Posteriormente, o material que passou é separado em três parcelas num crivo rotativo com dois diâmetros (12 mm e 35 mm) (Figura 3.2) (DA 58, 2015).



Figura 3.2 - Pormenor da grelha vibratória e crivo rotativo

Figura 3.3 - Separadores magnéticos e escórias processadas

A parcela obtida no primeiro troço do crivo (≤ 12 mm) segue diretamente para a pilha de escória processada, no final da linha de processamento. A fração entre 12 mm e 35 mm é alvo de uma remoção dos metais ferrosos e não ferrosos, seguindo o resto do material para a pilha onde já se encontra a fração inferior a 12 mm (Figura 3.3). O material superior a 35 mm é rejeitado, sendo, no entanto, alvo de uma seleção de resíduos de papel, plástico e cartão, e remoção de metais ferrosos que seguem para reciclagem (DA 58, 2015).

O processamento acima referido é apresentado de forma esquematizada na (Figura 3.4).

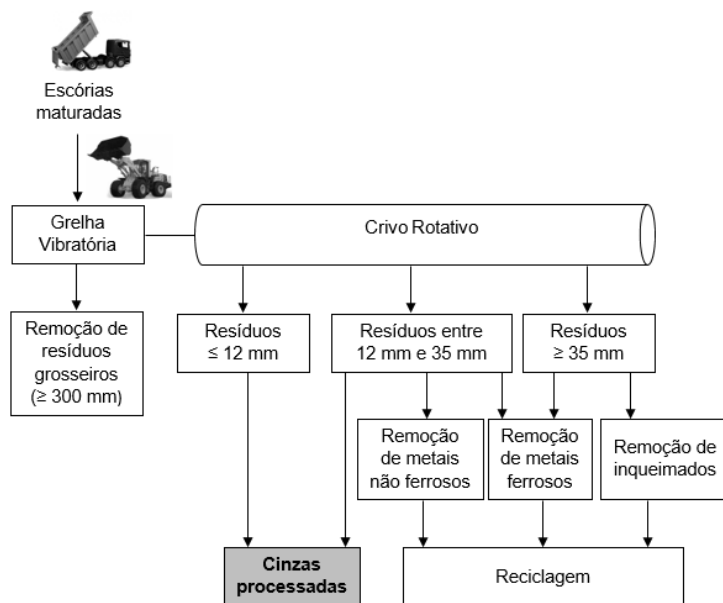


Figura 3.4 - Esquema do processo de valorização das escórias

Tratamento das CFRSU no laboratório

As amostras recolhidas na ITVE foram transportadas em barricas metálicas, seladas com tampa e aro metálico, e armazenadas no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Antes de serem incorporadas nas argamassas e betões produzidos, as cinzas passaram por um processamento prévio.

Inicialmente as cinzas foram colocadas em tabuleiros metálicos e levadas à estufa, a uma temperatura de 105 °C, de modo a remover toda a água nestas (Figura 3.5). Foram realizadas pesagens sucessivas até à obtenção de massa constante.



Figura 3.5 - Secagem das CFRSU na estufa

Com o objetivo de aproximar a granulometria das cinzas à do cimento, procedeu-se à sua trituração. Assim, introduziram-se as cinzas, em lotes de 16 kg, juntamente com esferas metálicas na Máquina de Los Angeles (Figura 3.6). O processo de trituração durou 4 horas, tendo sido avaliados outros períodos de trituração (1h, 2h, 3h e 5h). Os períodos de 1h, 2h e 3h foram de imediato excluídos por apresentarem muitas partículas de grandes dimensões, passíveis de serem eliminadas com maior tempo de trituração. Quanto aos restantes períodos, à vista desarmada não se verificaram grandes diferenças entre os dois tempos, que vieram a ser confirmadas por uma peneiração a seco, tendo-se optado por utilizar as 4 horas.

Por fim, as cinzas foram passadas pelo peneiro de 1 mm para remover resíduos metálicos e de maiores dimensões que a trituração não conseguiu eliminar.



Figura 3.6 - Máquina de Los Angeles e pormenor das CFRSU e as esferas



Figura 3.7 - Comparação entre os períodos de trituração

Caracterização das CFRSU

De forma a obter um maior conhecimento sobre as CFRSU, foi realizado um levantamento das análises químicas efetuadas por outros autores. Assim, na Tabela 3.6 são apresentados os valores máximos e mínimos dos principais compostos químicos detetados nas CFRSU noutras investigações.

Na Figura 3.8 é apresentada uma análise da quantificação de ocorrência de compostos químicos na amostra em estudo, através de difração por raio X; e na Figura 3.9 apresenta-se uma caracterização visual, através de um conjunto de fotografias à lupa, ambas realizadas nos laboratórios do Instituto Superior Técnico.

Tabela 3.6 - Composição química das CFRSU

Composto	Quantidade (%)	Autor
Al ₂ O ₃	6,30 - 18,61	Lin e Lin (2006) - Li et al. (2012)
CaO	7,58 - 39,00	Li et al. (2012) - Jurič et al. (2006)
Cr ₂ O ₃	0,4	Siong e Cheong (2001)
Fe ₂ O ₃	2,70 - 14,17	Jurič et al. (2006) - Lin e Bertolini et al. (2004)
K ₂ O	0,20 - 2,29	Jurič et al. (2006) - Li et al. (2012)
MgO	0,82 - 2,40	Lin e Lin (2006) - Siong e Cheong (2001)
MgO ₂	3,10	Collivignarelli et al. (2017)
MnO	0,14 - 0,3	Zhang e Zhao (2014) - Siong e Cheong (2001)
MnO ₂	0,06 - 0,16	Bertolini et al. (2004)
Na ₂ O	0,90 - 12,80	Jurič et al. (2006) - Pera et al. (1997)
P ₂ O ₅	0,77 - 2,10	Bertolini et al. (2004) - Pera et al. (1997)
PbO	0,3	Siong e Cheong (2001)
SiO ₂	24,00 - 61,90	Jurič et al. (2006) - Bertolini et al. (2004)
SO ₃	0,20 - 3,43	Siong e Cheong (2001) - Bertolini et al. (2004)
TiO ₂	0,33 - 1,70	Zhang e Zhao (2014) - Siong e Cheong (2001)
ZnO	3,5	Siong e Cheong (2001)

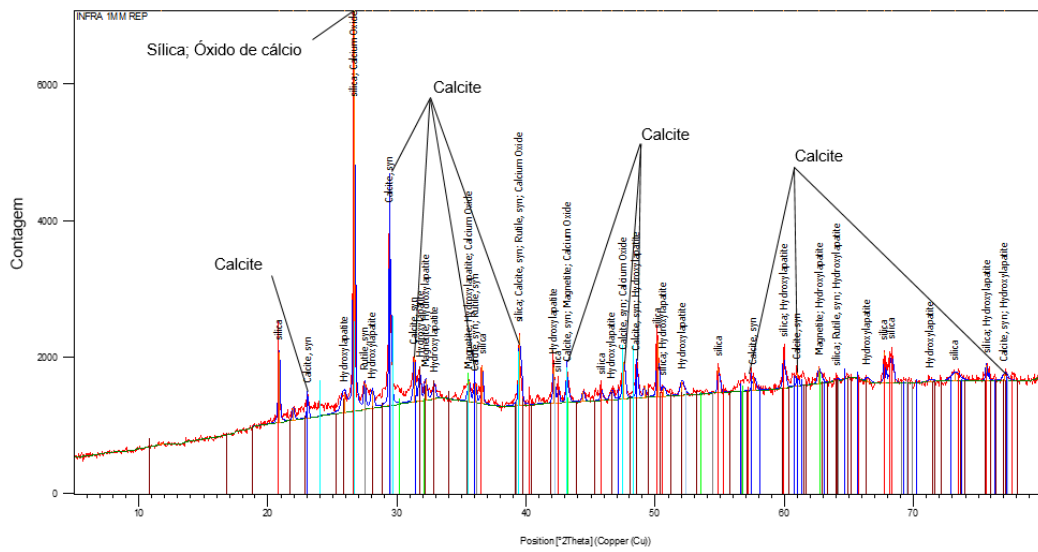


Figura 3.8 - Frequência de compostos por difração raio X

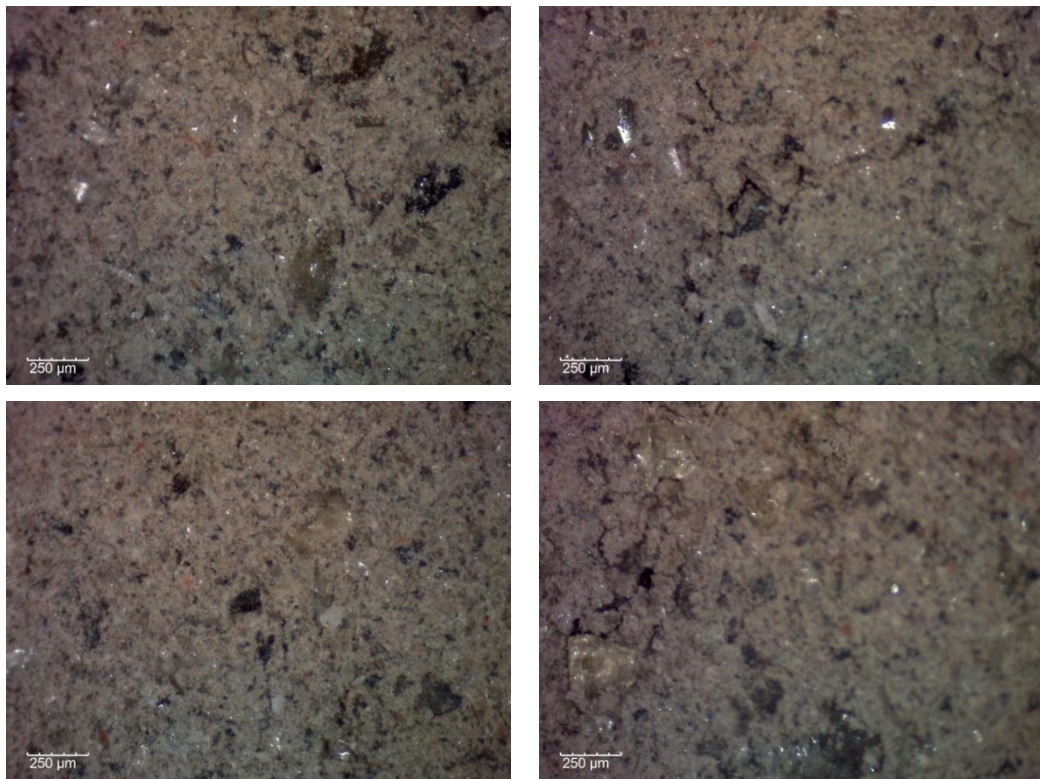


Figura 3.9 - Quatro fotografias à lupa das CFRSU utilizadas

Adicionalmente, foi avaliado o índice de atividade (IA) das CFRSU, adaptando o processo descrito na norma NP EN 450-1 (2012) e, realizado por Donatello e Tyrer (2010) e Madalena (2013). Desse modo, foram produzidas três argamassas: uma apenas com cimento; uma com 75% cimento e 25% de CV; e uma com 75% de cimento e 25% de CFRSU. Os provetes foram ensaiados à compressão aos 28 dias e aos

91 dias, determinando-se o IA pela razão (em percentagem) entre a resistência à compressão dos provetes apenas com cimento, e os provetes com incorporação de adição. Consideram-se pozolânicos os materiais que apresentaram IA não inferior a 75% e 85% aos 28 dias e aos 91 dias, respetivamente.

Os resultados obtidos permitem concluir que as CFRSU utilizadas não podem ser consideradas pozolânicas (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Resultados do índice de atividade

Amassadura	IA (%)	
	28 dias	91 dias
CV	83,4	92,7
CFRSU	36,7	34,7

Por último, foi testada a capacidade de absorção das partículas de CFRSU. Uma determinada quantidade de cinza foi colocada numa proveta graduada, sendo posteriormente preenchida com água até um limite definido, registando-se as diferenças de volume ao longo de 24 horas. Finalizado o procedimento, verificou-se que a capacidade das cinzas absorverem água é nula uma vez que o nível de água não se alterou durante as 24 horas. De facto, apenas a superfície de CFRSU em contacto com água ficou molhada, repelindo a água acima desta e formando uma barreira para as restantes partículas que permaneceram secas. No entanto, este fenómeno carece de ensaios adicionais para compreender a possível hidrofobicidade das CFRSU.

3.3.3 ADJUVANTE

O adjuvante utilizado foi um superplastificante de alto desempenho fornecido pela Sika com a designação SikaPlast 898. O produto encontra-se conforme a NP EN 934-2 (2012). Na Tabela 3.8 são apresentadas as principais características do superplastificante utilizado.

Tabela 3.8 - Características do superplastificante

SikaPlast 898	
Aspetto / cor	Líquido castanho claro, levemente turvo
Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa
Massa volúmica	1,07 ± 0,02 kg/dm ³ (a 23 °C ± 2°C)
pH (23 °C ± 2 °C)	5,0 ± 1,0
Teor de sólidos	32,0 ± 2,0%
Teor de iões cloreto	≤ 0,1%

3.3.4 AGREGADOS

No desenvolvimento da presente dissertação, foram utilizados como agregados finos uma areia fina 0/2 fornecida pela empresa Sulinerte e uma areia grossa 0/4 fornecida pela empresa Soavemil. Quanto ao agregado grosso, foram utilizadas uma brita 1 e uma brita 2, ambas fornecidas pela empresa José Marques Galo, SA. Todos os agregados fornecidos são provenientes da zona de Sesimbra.

Os agregados foram caracterizados segundo a norma NP EN 12620 (2010), dando relevo à avaliação da massa volúmica, à análise granulométrica, à absorção de água, ao equivalente de areia e à baridade. Assim, na Tabela 3.9 e Tabela 3.10 são apresentadas as propriedades descritas e, na Figura 3.10, as curvas granulométricas dos respetivos agregados.

Tabela 3.9 - Características dos agregados

Tipo de agregado	Massa volúmica (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Equivalente de areia (%)
Areia 0/2	2580	1683	0,75	96
Areia 0/4	2550	1633	1,13	95
Brita 1	2590	1475	1,46	-
Brita 2	2640	1540	0,78	-

Tabela 3.10 - Análise granulométrica dos agregados

Peneiros		Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
Série	Malha (mm)	Passado acumulado (%)	Passado acumulado (%)	Passado acumulado (%)	Passado acumulado (%)
Base	63	100,0	100,0	100,0	100,0
1	45	100,0	100,0	100,0	100,0
Base	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
1	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
Base	16	100,0	100,0	100,0	83,4
1	11,2	100,0	100,0	80,1	30,0
Base	8	100,0	100,0	39,2	4,4
1	5,6	100,0	99,5	5,7	2,6
Base	4	100,0	98,2	1,2	1,6
Base	2	99,9	89,1	0,7	1,3
Base	1	99,4	59,4	0,5	0,9
Base	0,5	80,7	21,5	0,5	0,5
Base	0,25	16,1	3,5	0,4	0,3
Base	0,125	0,3	0,3	0,2	0,1
Base	0,063	0,0	0,0	0,0	0,0
Módulo de finura		2,04	3,28	6,57	7,08

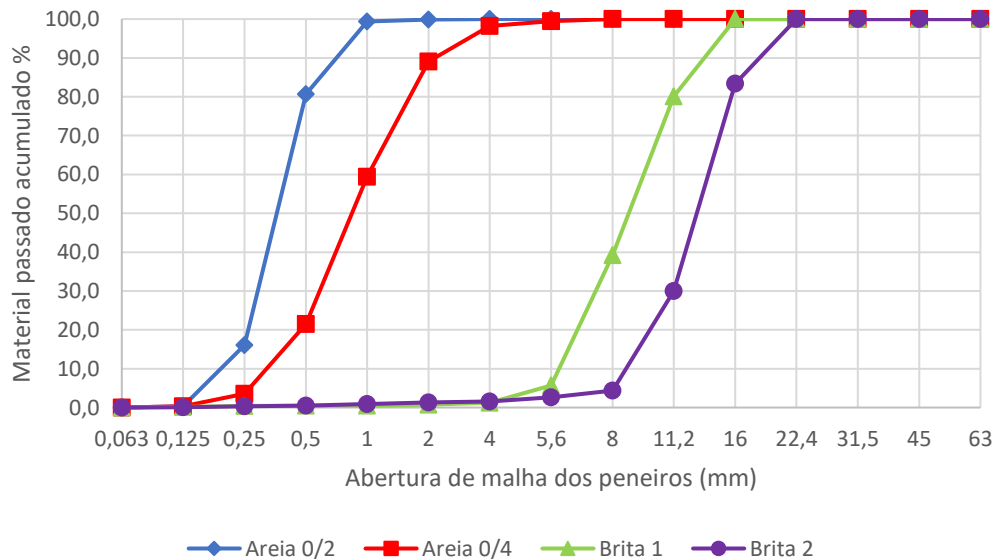


Figura 3.10 - Curvas granulométricas dos agregados

As misturas de agregados consideradas foram de 50% / 50% tanto para as areias como para as britas.

3.3.5 ÁGUA

A água utilizada na campanha experimental foi água da rede pública de abastecimento de Lisboa, de acordo com as exigências da norma NP EN 1008 (2003).

3.4 Estudo das argamassas

Segundo a metodologia desenvolvida por Nepomuceno (2005), é necessário, numa fase inicial, executar um estudo em argamassa para determinar alguns parâmetros indispensáveis para a produção de BAC. Nesse sentido, foi também necessário definir alguns critérios iniciais de composição. Foi fixado um valor para a relação, em volume absoluto, entre as quantidades de materiais finos e de agregados finos (V_p/V_s), adotando-se $V_p/V_s = 0,80$, segundo os resultados obtidos por Silva (2013) e tendo em conta o intervalo admissível de 0,60 a 0,80 (Nepomuceno, 2005).

Apesar das orientações dadas pela metodologia acima referida, esta não será seguida na sua totalidade, uma vez que o pretendido é estudar a variação da percentagem de substituição de cimento por adições, tendo estas sido previamente definidas em 30% e 60%, e não variáveis em função de uma resistência mecânica estipulada tal como sugere o método original.

A determinação dos valores de V_w/V_p (relação, em volume absoluto, entre as quantidades de água e de materiais finos) e de $S_p/p\%$ (relação percentual, em massa, entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos) iniciou-se pela amassadura de referência, tendo presente que o objetivo era manter os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ iguais para todas as amassaduras. Partiu-se assim de valores de $V_w/V_p = 0,75$ e $S_p/p\% = 0,66$ para a mistura de referência, tendo por base os resultados obtidos por Silva (2013) e ajustando os parâmetros em função da trabalhabilidade pretendida para uma argamassa auto-compactável, num processo iterativo.

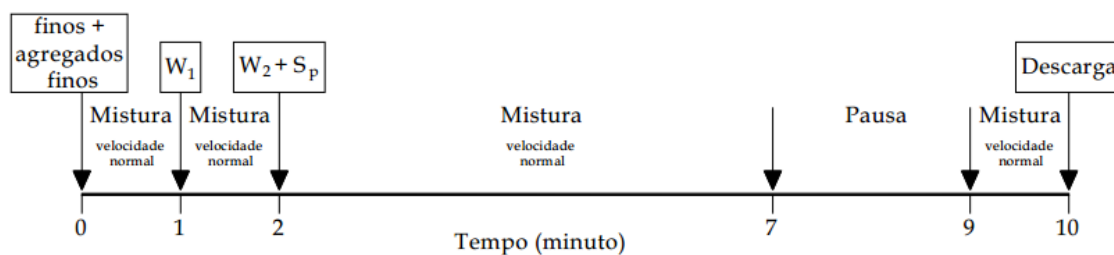
No entanto, não foi possível manter os parâmetros das restantes misturas iguais aos da mistura de referência, devido à trabalhabilidade insatisfatória das argamassas com incorporação de CFRSU. Desta forma, a maior necessidade de água e superplastificante das misturas com CFRSU pode estar relacionada com o facto das cinzas repelirem a água, de acordo com o referido no subcapítulo 3.3.2.2. Este fenómeno poderá formar aglomerados de CFRSU que não estejam molhados, dificultando assim a trabalhabilidade das argamassas.

Assim, procedeu-se de forma iterativa para encontrar valores iguais e aceitáveis para as quatro amassaduras, mesmo sabendo que a trabalhabilidade seria variável para cada mistura.

3.4.1 PREPARAÇÃO E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

A produção de todas as argamassas foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, onde todos os materiais necessários para a realização deste trabalho estavam armazenados e devidamente acondicionados. A medição das quantidades dos diversos materiais foi executada em massa, com recurso a uma balança eletrónica com capacidade máxima de 30 kg e uma divisão de escala de 1 g.

O processo de amassadura seguiu a mesma sequência do trabalho realizado por Silva (2013). Na Figura 3.11 encontra-se descrita a sequência de amassadura e na Figura 3.12 a misturadora utilizada no procedimento de amassadura.



$W_1 = 80\%$ da água de amassadura

$W_2 + S_p = 20\%$ da água de amassadura + superplastificante

Figura 3.11 - Sequência de amassadura para argamassas (Silva, 2013)



Figura 3.12 - Misturadora utilizada na produção de argamassas

A sequência de amassadura prolongou-se por 10 minutos no total, tendo início com a introdução dos agregados finos (areias) e dos materiais finos (cimento e adições) que foram misturados durante 1 minuto. Posteriormente, foi adicionada a parcela correspondente a 80% da água de amassadura, de forma gradual e sem interrupções do processo de mistura, durante 1 minuto. A segunda parcela de água, correspondente aos restantes 20%, foi adicionada com o superplastificante bem misturado de forma lenta e sem interrupções, durante o segundo minuto. A mistura prolongou-se por mais 5 minutos, à velocidade normal. Após este período de tempo, decorreu uma pausa de 2 minutos onde a mistura ficou em repouso, aproveitando-se para limpar a pá da misturadora. Decorridos os 2 minutos de repouso, procedeu-se a mais 1 minuto de mistura, novamente com velocidade normal, antes de se iniciarem os ensaios no estado fresco.

3.4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Com o objetivo de averiguar as características de auto-compactabilidade necessárias para as argamassas produzidas, foram realizados os seguintes ensaios no estado fresco: ensaio de espalhamento no mini cone e o ensaio de escoamento no mini funil V.

3.4.2.1 Ensaio de espalhamento no mini cone

Na determinação do diâmetro médio de espalhamento, dada a inexistência de normativas nacionais ou internacionais, foram seguidos os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno (2005).

Utilizou-se um molde tronco cónico apresentado para a realização deste ensaio, conforme é visível na Figura 3.13.



Figura 3.13- Ensaio de espalhamento em argamassa

Seguidamente, são apresentados de forma sucinta, os procedimentos mais relevantes para a execução deste ensaio:

- 1) verificar o correto nivelamento da mesa de ensaio;
- 2) limpar a mesa e o cone, humedecendo de seguida as superfícies interiores do molde e a mesa evitando que se formem zonas de concentração de água;
- 3) encher o molde de uma só vez sem agitar ou compactar e rasar a a sua superfície superior, removendo o material que se possa ter depositado sobre a mesa;
- 4) remover o molde suavemente na vertical e aguardar que a argamassa pare de fluir e atinja o diâmetro máximo de espalhamento;
- 5) medir o espalhamento em dois diâmetros, d_1 e d_2 , perpendiculares entre si em mm;
- 6) o valor de espalhamento consiste na média das duas medições (D_m), em mm;

O valor do diâmetro médio de espalhamento (D_m) é expresso em função da área de espalhamento relativa (G_m) com base no método sugerido por Okamura et al. (2000):

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1 \quad 3.1$$

onde:

G_m – área de espalhamento relativa;

D_m – Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 – Diâmetro inicial da base do cone, em mm.

3.4.2.2 Ensaio de escoamento no mini funil V

No ensaio de escoamento no mini funil V foram adotados os procedimentos de ensaio realizados por Nepomuceno (2005) uma vez que não existe qualquer normativa relativa ao mesmo.

O procedimento de ensaio é descrito sucintamente nos pontos seguintes:

- 1) nivelar e fixar o equipamento de ensaio, de modo que não ocorram movimentos durante o procedimento;

- 2) humedecer as superfícies interiores do mini funil, evitando a acumulação de água e removendo-a caso esta apareça;
- 3) encher o funil sem aplicar qualquer vibração ou agitação e uniformizar a superfície superior;
- 4) abrir a tampa inferior e registar o tempo de escoamento com o auxílio de um cronómetro;
- 5) o tempo de escoamento decorre desde o momento em que a tampa é aberta até que seja visível o primeiro raio de luz, observado da parte de cima do funil.



Figura 3.14- Ensaio de escoamento no Mini funil V

A partir do tempo de escoamento é possível determinar a velocidade relativa de escoamento R_m através do método utilizado por Okamura et al. (2000):

$$R_m = \frac{10}{t} \quad 3.2$$

onde:

R_m = velocidade relativa de escoamento, em s^{-1} ;

t = tempo de escoamento, em s.

3.5 Estudo do betão

Após a determinação dos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ na fase de argamassa, foi necessário definir o volume de vazios (V_v) e a razão, em volume absoluto, entre as

quantidades de argamassa e de agregados grossos na mistura (V_m/V_g), fundamentais para o cálculo das quantidades de BAC a produzir.

O valor de V_v foi definido como constante e igual a $0,03 \text{ m}^3$, de acordo com o método de Nepomuceno (2005).

Quanto ao valor de V_m/V_g , este depende do grau de auto-compactabilidade pretendido, e multiplicado pelo parâmetro V_p/V_s já arbitrado, definem um “número de mistura” (NM). O parâmetro NM foi considerado igual a 1,82, segundo os resultados obtidos por Silva (2013) e considerando a necessidade de obter um menor volume de argamassa (reduzindo a quantidade de cimento) na mistura total. Com os valores NM e V_p/V_s foi possível calcular o valor de V_m/V_g , estabelecendo assim os parâmetros necessários para definir as quantidades de amassadura. A necessidade de ajustes nas quantidades de superplastificante e de água foi realizada na fase de produção da mistura, em função dos parâmetros de trabalhabilidade.

Nas Tabela 3.11 e Tabela 3.12, são apresentados os parâmetros de composição definidos e as quantidades de amassadura por m^3 para cada BAC produzido.

Tabela 3.11 - Parâmetros de composição das amassaduras

Parâmetros de composição	REF	B10CV20CF	B20CV10CF	B20CV40CF	B40CV20CF
a/c	0,36	0,41	0,41	0,72	0,72
V_p/V_s	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
V_w/V_p	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90
$S_p/P\%$	0,75	0,90	0,90	0,90	0,90
$V_v \text{ (m}^3\text{)}$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
NM	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82
f_{ad}	0,30	0,30	0,30	0,60	0,60

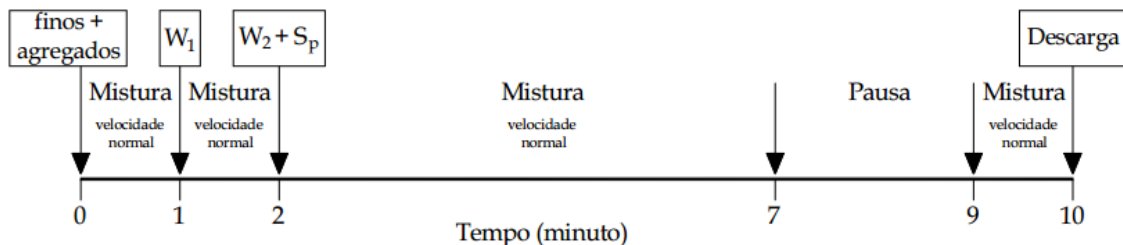
Tabela 3.12 - Quantidades de amassadura

Quantidades de Amassadura (kg/m ³)	REF	B10CV20CF	B20CV10CF	B20CV40CF	B40CV20CF
Cimento	482	467	467	267	267
CV	151	49	98	98	195
CFRSU	0	106	53	212	106
S _p	4,8	5,6	5,6	5,2	5,1
Água	176	191	191	191	191
Areia 0/2	354	342	342	342	342
Areia 0/4	350	338	338	338	338
Brita 1	384	384	384	384	384
Brita 2	391	391	391	391	391

3.5.1 PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Tal como referido nas argamassas, também a produção de betões se realizou nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, tendo sido utilizada a mesma balança eletrónica para a pesagem de todos os materiais, referida em 3.4.1.

A sequência de amassadura foi a mesma seguida por Silva (2013), encontrando-se descrita de forma esquematizada na Figura 3.15. A betoneira utilizada foi a representada na Figura 3.16.



$W_1 = 80\%$ da água de amassadura

$W_2 + S_p = 20\%$ da água de amassadura + superplastificante

Figura 3.15 - Sequência de amassadura para betões (Silva, 2013)



Figura 3.16 - Betoneira utilizada na produção dos betões

A sequência de amassadura demorou 10 minutos no total, tal como nas argamassas, tendo-se mantido os mesmos tempos da sequência referida em 3.4.1. A diferença para as argamassas consistiu em adicionar os agregados grossos (brita 1 e brita 2), logo no início da mistura, junto com os outros materiais.

3.5.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Com o objetivo de averiguar as características de auto-compactabilidade necessárias para os betões produzidos, foram realizados ensaios no estado fresco. Desse modo, foi possível: avaliar a fluidez e a velocidade de escoamento na ausência de obstruções através do ensaio de espalhamento; avaliar a viscosidade e a capacidade de enchimento através do ensaio de escoamento no funil V; e avaliar a capacidade de escoamento através de espaços confinados através do ensaio de escoamento na caixa L.

3.5.2.1 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento permitiu determinar o tempo de escoamento até ao diâmetro de 500 mm e o diâmetro médio de espalhamento. Este foi realizado segundo a norma NP EN 12350-8 (2010). Assim, foi possível avaliar a fluidez e a velocidade de escoamento dos BAC na ausência de obstáculos.



Figura 3.17 - Ensaio de espalhamento

O procedimento de ensaio é descrito de forma sucinta nos seguintes passos:

- 1) Assegurar a horizontalidade da mesa de ensaio;
- 2) Limpar a mesa e o cone e imediatamente antes do ensaio humedecer ligeiramente a mesa e as superfícies interiores do molde evitando que se formem zonas de aglomeração de água;
- 3) Centrar o cone na placa e posteriormente enchê-lo de uma só vez sem qualquer agitação ou compactação;
- 4) Rasar a superfície superior do cone removendo o betão que possa ter caído sobre a mesa, não devendo esta operação demorar mais de 30 s;
- 5) Remover o cone num único movimento entre 1 a 3 s de forma a não interferir com o escoamento do betão;
- 6) Registrar o tempo t_{500} que decorre entre o momento em que o cone deixa de estar em contacto com a mesa e o espalhamento do BAC atingir um diâmetro de 500 mm;
- 7) Uma vez estabilizado o BAC, medir o maior diâmetro do espalhamento e registar como d_1 com uma aproximação de 10 mm;
- 8) Medir o diâmetro de espalhamento perpendicular a d_1 e registá-lo como d_2 , com uma aproximação de 10 mm;
- 9) Se a diferença entre d_1 e d_2 for superior a 50 mm o ensaio deverá ser repetido utilizando uma nova amostra, no caso do segundo ensaio também apresentar uma diferença entre os dois diâmetros superior a 50 mm deverá ser considerado que o BAC não apresenta uma fluidez adequada;
- 10) Verificar a presença de segregação no espalhamento e registar.

O resultado do ensaio é caracterizado pelo tempo t_{500} em segundos (com uma aproximação de 0,5 s) e pelo espalhamento SF que corresponde à média dos valores de d_1 e d_2 (com a aproximação de 10 mm).

3.5.2.2 Ensaio de escoamento no funil V

O ensaio de escoamento no funil V permitiu determinar o tempo de escoamento t_v , avaliando a viscosidade e a capacidade de enchimento do BAC, sendo realizado segundo a norma NP EN 12350-9 (2010).

Na Figura 3.18 é apresentado o equipamento utilizado.

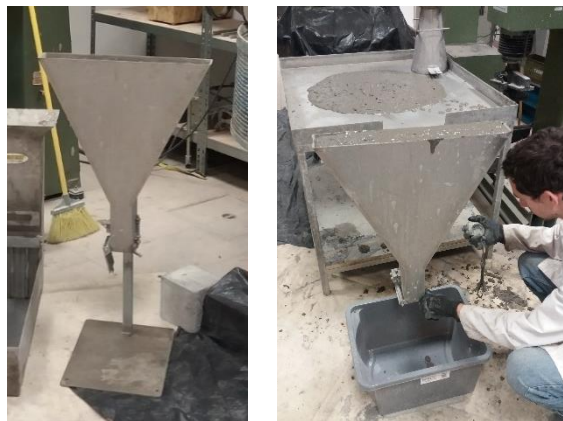


Figura 3.18 – Ensaio do Funil V

Seguidamente são apresentados, de forma sucinta, os procedimentos mais relevantes para a execução deste ensaio:

- 1) Assegurar o correto nivelamento e fixação do equipamento de ensaio, de forma a evitar algum tipo de movimento;
- 2) Limpar o funil e a tampa do fundo e de seguida humedecer as superfícies evitando concentrações de água;
- 3) Recolher uma amostra com um volume mínimo de 12 l;
- 4) Encher o funil numa única operação sem qualquer tipo de agitação ou compactação, rasando a posteriormente a superfície superior;
- 5) Passados 10 ± 2 segundos, abrir a tampa e iniciar a medição do tempo t_v , com uma aproximação de 0,1 s;
- 6) O tempo de escoamento t_v é medido entre o momento em que a tampa é aberta e o momento em que seja possível observar na vertical de cima para baixo, o recipiente colocado sob o funil;

- 7) O escoamento do BAC deve ser contínuo. Caso ocorra algum bloqueio o ensaio deve ser repetido com recurso a outra amostra;
- 8) No caso de se verificar novamente um bloqueio do escoamento do betão, deve ser considerado que o BAC não tem a viscosidade e capacidade de enchimento necessárias.

O resultado do ensaio é definido pelo tempo de escoamento t_v .

3.5.2.3 Ensaio de escoamento na caixa L

O ensaio de escoamento na caixa L permitiu determinar a capacidade de passagem do BAC através de espaços confinados e foi realizado segundo a norma NP EN 12350-10 (2010). Deste modo, obteve-se a razão H_2/H_1 medindo as alturas H_1 e H_2 .

O procedimento de ensaio é descrito seguidamente:

- 1) Colocar o equipamento de ensaio numa superfície nivelada e garantir a sua fixação;
- 2) Humedecer as superfícies interiores da caixa L, evitando a acumulação de água;
- 3) Encher a secção vertical da caixa L com BAC de uma amostra de pelo menos 14 l, sem agitar ou compactar e rasar o topo da caixa;
- 4) Aguardar 60 ± 10 segundos e abrir num movimento contínuo a tampa que divide a secção vertical da horizontal;
- 5) Assim que o movimento do BAC cessar medir a altura de BAC ΔH_1 em três posições da largura da secção vertical e a altura de BAC ΔH_2 em três posições da secção horizontal.



Figura 3.19 - Ensaio da caixa L

3.5.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO (COMPORTAMENTO MECÂNICO)

3.5.3.1 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 (2009), em três provetes cúbicos por cada idade de ensaio (7, 28 e 91 dias) com 15 cm de aresta para cada amassadura em estudo. Foram ainda ensaiados dois provetes cilíndricos para as idades de 28 e 91 dias. Após um período de cura húmida por imersão em água, correspondente à idade de ensaio, os provetes foram ensaiados à compressão.

Assim que retirados da câmara de cura, os cubos foram pesados com as suas superfícies sem excesso de água e as suas dimensões foram medidas em três direções distintas. Posteriormente, os provetes foram colocados na prensa com a superfície de enchimento sem estar em contacto com as placas da prensa, iniciando-se o ensaio com uma velocidade de aplicação de carga de 13,5 kN/s. Uma vez atingida a rotura do provete, registou-se o valor da carga máxima à rotura e calculou-se a resistência à compressão para cada um dos provetes segundo a seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad 3.3$$

onde:

- f_c - Resistência à compressão (MPa)
- F - Carga máxima à rotura (N)
- A_c - Área da secção do provete (mm²)

O equipamento utilizado para ensaiar os cubos foi a prensa Form+Test Seidner do Laboratório de Materiais do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa com uma capacidade máxima de 3000 kN e com controlo da força aplicada por um sistema hidráulico da marca Sangari (Figura 3.20).



Figura 3.20 - Ensaio de compressão uniaxial

No caso dos provetes cilíndricos, estes foram ensaiados à compressão na prensa Tonic Pact 3000 do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico com uma capacidade máxima de carga de 3000 kN, com controlo da força aplicada por um sistema Form+Test Seidner e uma velocidade de aplicação de carga de 10,5 kN/s (Figura 3.21). Antes do ensaio de compressão, estes provetes foram utilizados para a determinação do módulo de elasticidade, sendo que foram previamente retificados na máquina Esacta da Sangari (Figura 3.22), de modo a garantir uma superfície de contacto regular.



Figura 3.21 - Ensaio de compressão em cilindros



Figura 3.22 - Retificação dos cilindros

3.5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão foi realizado segundo a norma NP EN 12390-6 (2011) para as idades de 28 e 91 dias, em dois provetes cilíndricos, com 150

mm de diâmetro e 300 mm de altura por cada idade e amassadura de BAC. Os provetes foram sujeitos a um período de cura húmida por imersão em água correspondente a cada idade de ensaio, tendo sido ensaiados assim que retirados da câmara de cura.

O equipamento utilizado foi a prensa Form+Test Seidner, já referida no ensaio de compressão em cubos.

Após a limpeza das superfícies do provete para remoção do excesso de água, este foi posicionado no equipamento de ensaio conforme a Figura 3.23. Posteriormente, os provetes foram submetidos a uma força de compressão aplicada sobre uma zona estreita em todo o seu comprimento. Para tal, recorreu-se a duas peças de carga em aço interligadas por duas faixas de cartão prensado.

A velocidade de aplicação de carga foi de 3,5 kN/s, dentro do intervalo de 0,05 MPa/s e 0,01 MPa/s.



Figura 3.23 - Ensaio de compressão diametral

3.5.3.3 Módulo de elasticidade secante

A determinação do módulo de elasticidade secante foi realizada segundo a especificação LNEC E 397 (1993) para as idades de 28 e 91 dias, em dois provetes cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura por cada idade e amassadura de BAC. Os provetes foram sujeitos a um período de cura húmida por imersão em água correspondente a cada idade de ensaio, tendo sido ensaiados assim que retirados da câmara de cura.

O ensaio realizou-se no Laboratório de Estruturas do Instituto Superior Técnico, tendo sido utilizada uma máquina universal de ensaio Instron modelo 1343 (Figura 3.24). Os provetes foram instrumentados com dois extensómetros, em posições

diametralmente opostas, sendo que numa fase inicial, para verificar o correto posicionamento dos provetes e validar os resultados do ensaio, os provetes foram centrados nas placas da prensa e submetidos a um ciclo de carga, de modo a que a variação de extensão nos dois extensómetros não diferisse mais do que 10%. Após esta verificação foram aplicados ciclos de carga com uma tensão inicial entre 0,5 a 1 MPa até 1/3 da tensão de rotura, registando-se as extensões iniciais e finais.



Figura 3.24 - Equipamento utilizado na determinação do módulo de elasticidade

Assim que a diferença da média das variações de extensão entre dois ciclos consecutivos foi inferior a 10%, procedeu-se ao cálculo do módulo de elasticidade secante (E_c) pela expressão 3.4.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n}} \times 10^{-3} \quad 3.4$$

onde:

E_c = módulo de elasticidade secante, em GPa;

σ_a = tensão máxima aplicada, em MPa;

σ_b = tensão inicial, em MPa;

$\varepsilon_{a,n}$ = extensão para a tensão σ_a , medida no n ésimo ciclo de carga;

$\varepsilon_{b,n}$ = extensão para a tensão σ_b , medida no n ésimo ciclo de carga

No final do ensaio do módulo de elasticidade, os provetes foram ensaiados à compressão de acordo com o procedimento referido em 3.5.3.1, de modo a obter o valor de referência da resistência à compressão utilizado na determinação do módulo de elasticidade.

3.5.3.4 Retração

A determinação da extensão de retração foi realizada segundo a especificação LNEC E 398 (1993) em três provetes prismáticos com 100 x 100 x 400 mm. O ensaio teve início após a desmoldagem dos provetes, prolongando-se por 91 dias, com medições diárias durante os primeiros 14 dias e semanais entre os 14 e 91 dias, tendo sido conservados a uma temperatura de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$.

Os provetes foram instrumentados com dois pinos metálicos, fixados através de uma cola bicomponente e com recurso à barra padrão do equipamento, de modo a garantir o correto posicionamento dos pinos. As leituras foram realizadas com recurso a um defletómetro, da marca Mahr, de 30 cm e uma precisão de 1 µm, que permitiu registar a variação de comprimento entre os dois pinos metálicos em comparação com a barra padrão referida (Figura 3.25).

O cálculo da retração foi realizado com recurso à informação obtida nas leituras e pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{df - di}{di} \quad 3.5$$

onde:

df- distância medida entre os pinos em cada dia;

di- distância inicial medida entre os pinos.



Figura 3.25 - Ensaio de retração

3.5.3.5 Propagação de ondas ultra-sónicas

O ensaio de ultra-sons foi realizado segundo a norma NP EN 12504-4 (2007), para as idades de 7, 28 e 91 dias, nos provetes cúbicos utilizados no ensaio de compressão uniaxial referidos em 3.5.3.1.

Imediatamente antes de serem ensaiados à compressão, os provetes foram submetidos à avaliação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Foi utilizado o método de transmissão direta, com os transdutores colocados em faces opostas dos provetes de forma a estarem alinhados e centrados (Figura 3.26). Para melhorar o processo de transmissão foi utilizada uma massa de contacto entre os transdutores e a superfície do provete, sendo o equipamento calibrado antes do ensaio com recurso à barra padrão fornecida pelo fabricante.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (m/s) foi calculada através da razão entre o comprimento do provete e o tempo que as ondas demoram entre os transdutores.



Figura 3.26 - Ensaio de ultra-sons

3.5.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO (DURABILIDADE)

3.5.4.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a especificação LNEC E394 (1993), para as idades de 28 e 91 dias, em três provetes cúbicos de 100 mm de aresta por cada idade e amassadura de BAC. Os provetes foram sujeitos a um período de cura húmida por imersão em água correspondente a cada idade de ensaio.

Após o período de cura húmida foi determinada a massa do provete saturado com a superfície seca, sendo o provete novamente imerso em água para determinação da sua massa hidrostática (Figura 3.27). Posteriormente, os provetes foram colocados

numa estufa ventilada a 105 ± 5 °C até atingirem massa constante. A especificação LNEC E394 (1993) define como massa constante quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras.



Figura 3.27 - Ensaio de absorção por imersão

O cálculo da absorção de água por imersão foi realizado segundo a seguinte expressão:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad 3.6$$

onde:

A_i - absorção de água por imersão (%);

m_1 - massa do provete saturado (g);

m_2 - massa hidrostática do provete saturado (g);

m_3 - massa do provete seco (g).

3.5.4.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado segundo a especificação LNEC E 393 (1993), para as idades de 28 e 91 dias, em três provetes de 150 mm de diâmetro e 100 mm de altura por cada idade e amassadura de BAC. De modo a obter provetes com a dimensão indicada, foram seccionados cilindros de 300 mm de altura 14 dias antes da data de ensaio. Os provetes foram sujeitos a um processo de cura húmida através da sua imersão em água a 20 ± 2 °C até serem colocados na estufa a uma temperatura de 40 ± 5 °C durante 14 dias.

Passado o período dentro da estufa, os provetes foram pesados, registando-se a massa M_0 . Posteriormente foram colocados num tabuleiro sobre suportes e com a face cortada em contacto com a água (Figura 3.28). O nível de água atingiu 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete, sendo mantido constante durante as várias medições de massa M_i (3, 6, 24 e 72 horas).

Para determinar a absorção de água por capilaridade no tempo t_i , o aumento de massa $M_i - M_0$ é dividido pela área da face do provete que esteve em contacto com a água.



Figura 3.28 - Ensaio de Absorção de água por capilaridade

Com os valores de absorção de água obtidos, foram calculados os coeficientes de absorção com base no declive da reta de regressão dos valores relativos às primeiras seis horas de absorção de água, segundo a expressão 3.7

$$A(t) = S \times t^{0,5} \quad 3.7$$

onde:

A = água absorvida por unidade de área (kg/m^2);

S = coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$) ou $\text{mm}/\text{min}^{0,5}$)

t = tempo de ensaio (s)

3.5.4.3 Difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário é determinado segundo a especificação LNEC E 463 (2004), para as idades de 28 e 91 dias. Foram moldados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, de modo a obter três amostras de 100 mm de diâmetro e 50 mm de

altura para cada idade. Os provetes foram alvo de uma cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até 7 dias antes de se iniciar o ensaio, dia em que foram seccionados e condicionados até a data de ensaio.

Antes de se realizar o ensaio, os provetes são pré-condicionados através de uma câmara de vácuo estando estes imersos numa solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Para a realização do ensaio um reservatório é cheio com uma solução catódica de cloreto de sódio a 10% NaCl em água da torneira, posteriormente o provete é colocado numa manga de borracha, fixada a este com duas braçadeiras de aço inoxidável. Fixado o provete, a manga é cheia com uma solução anódica de hidróxido de sódio (NaOH 0,3N) em água destilada, sendo o conjunto inserido no reservatório.

Para causar a migração dos iões cloreto através do provete, é colocada uma placa em aço inox em cada um dos topos do provete que ao serem sujeitas a um potencial elétrico forçam os cloretos a penetrar no provete.

Após 24 horas mergulhado no reservatório o provete é retirado, seccionado axialmente em duas partes e as faces retangulares resultantes são pulverizadas com uma solução de nitrato de prata (AgNO_3 0,1N). Após 15 minutos de atuação da solução referida, mede-se a profundidade de penetração a partir do precipitado branco de cloreto de prata que se formou.

Para calcular o coeficiente de difusão em regime não estacionário, recorre-se à equação simplificada:

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad 3.8$$

onde:

D = Coeficiente de difusão no estado não estacionário ($\times 10^{-12}$ m²/s);

U = Valor absoluto da voltagem aplicada (V);

T = Valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica (°C);

L = Espessura do provete (mm);

x_d = Valor médio da profundidade de penetração (mm);

t = Duração do ensaio, horas.



Figura 3.29 - Ensaio de migração de cloretos

3.5.4.4 Resistividade elétrica

A análise da resistividade elétrica foi realizada segundo a proposta de norma europeia apresentada pelo grupo de trabalho Chlortest (2005), de acordo com o método dos dois elétrodos topo-a-topo.

A determinação da resistividade elétrica realizou-se imediatamente antes do ensaio de difusão de cloretos, tendo sido utilizados os mesmos provetes nos dois ensaios.

O ensaio teve início com a limpeza do excesso de água existente na superfície dos provetes, que seguidamente foram acoplados entre duas placas de cobre, com o auxílio de duas esponjas humedecidas e com uma massa de 2 kg a pressionar o conjunto (Figura 3.30). Através das placas de cobre aplicou-se um potencial elétrico de 60 V (CC), registando-se o valor da corrente elétrica que atravessou o provete.

De acordo com a medição de corrente registada, a diferença de potencial aplicada, a resistência das esponjas e as dimensões do provete calcula-se a resistividade elétrica com base na equação 3.9.

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{A}{L} \quad 3.9$$

onde:

ρ = resistividade elétrica do betão ($\Omega \cdot m$)

U = voltagem aplicada (V);

I = intensidade de corrente (A)

A = área do topo do provete (m^2);

L = comprimento do provete (m).



Figura 3.30 - Ensaio de resistividade elétrica

3.5.4.5 Resistência à carbonatação

A avaliação da resistência à carbonatação do betão foi realizada segundo a especificação LNEC E 391 (1993), tendo sido utilizada a câmara de carbonatação do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico.

Para o presente ensaio foram moldados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, de forma a produzir provetes, em número suficiente, com 100 mm de diâmetro e altura de 50 mm para ensaiar às idades de 14, 21, 49, 70 e 91 dias. Até 14 dias antes da data de ensaio os provetes foram submetidos a uma cura húmida por imersão em água a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, no momento em que são removidos da câmara de cura os provetes são seccionados em provetes com 50 mm de altura. De modo a proteger os topos dos provetes, estes foram revestidos com uma camada de isolante de resina acrílica e de seguida condicionados a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e 50% de humidade relativa.

O ensaio teve início aos 28 dias com a colocação dos provetes na câmara de ensaio a uma humidade relativa de $60 \pm 5\%$, uma temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e com uma alimentação de ar com $5 \pm 1\%$ de dióxido de carbono (CO_2). Aos 14, 21, 49, 70 e 91 dias os provetes foram retirados da câmara e seccionados axialmente, de seguida foram pulverizados com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% sobre as faces retangulares e foi medida a profundidade de carbonatação (Figura 3.31).



Figura 3.31 - Ensaio de carbonatação

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Propriedades do BAC no estado fresco

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados dos ensaios no BAC no estado fresco. Após a realização das argamassas, garantido a sua auto-compactibilidade, ausência de exsudação e determinando os parâmetros necessários à produção do betão, procedeu-se à realização das amassaduras e avaliação das suas propriedades no estado fresco. Desse modo, foram analisadas as seguintes propriedades: fluidez, velocidade de escoamento na ausência de obstruções, viscosidade, capacidade de enchimento e capacidade de escoamento através de espaços confinados. Na Tabela 4.1, são apresentados para todas as amassaduras, os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, de escoamento no funil V e de escoamento na caixa L. Os dados registados no decorrer dos ensaios são apresentados no anexo A.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios no BAC no estado fresco

Amassadura	Espalhamento		Funil V	Caixa L
	t ₅₀₀ (s)	SF (mm)	t _v (s)	PL (H2/H1)
REF	2,7	680	5,6	0,87
B10CV20CF	2,8	685	4,9	1,00
B20CV10CF	2,7	620	4,8	0,81
B20CV40CF	2,2	585	2,8	0,81
B40CV20CF	3,1	625	3,5	0,92

O ensaio de espalhamento, realizado segundo a norma NP EN 12350-8 (2010), permitiu determinar o tempo de escoamento até ao diâmetro de 500 mm (t_{500}) e o diâmetro médio de espalhamento (SF), avaliando a fluidez e a velocidade de escoamento dos BAC na ausência de obstáculos. De acordo com a norma NP EN 206-9 (2010), todas as misturas apresentam a classificação VS2 para a viscosidade no ensaio de espalhamento, no entanto, a maioria das misturas regista tempos inferiores a 3 segundos, com a exceção do B40CV20CF. No que diz respeito ao diâmetro de espalhamento, as misturas REF e B100CV20CF enquadram-se na classe SF2, sendo que as restantes registam classe SF1.

O ensaio de escoamento no funil V, realizado segundo a norma NP EN 12350-9 (2010), permitiu determinar o tempo de escoamento (t_v), avaliando a viscosidade e a capacidade de enchimento do BAC. De acordo com a norma NP EN 206-9 (2010), todas as misturas apresentam a classificação VF1 para a viscosidade no ensaio de espalhamento, registando valores de t_v inferiores a 6 segundos, que decrescem com aumento da percentagem de substituição de cimento.

O ensaio de escoamento na caixa L, realizado segundo a norma NP EN 12350-10 (2010), permitiu determinar a capacidade de passagem do BAC através de espaço confinados. A leitura de H1 e H2 permitiu determinar a razão H2/H1 que, de acordo com a norma NP EN 206-9 (2010), atribui uma classificação da capacidade de passagem. A totalidade dos BAC estudados enquadram-se nos valores exigidos pela norma NP EN 206-9 (2010), destacando-se o B10CV20CF com o valor mais alto.

4.2 Propriedades do BAC no estado endurecido

Nos subcapítulos seguintes, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com o apresentado em 3.5.3 e 3.5.4, que permitiram avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de todas as amassaduras em estudo.

4.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.2.1.1 Resistência à compressão em cubos

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em cubos, realizado segundo a NP EN 12390-3 (2009), para as idades de 7, 28 e 91 dias, são

apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.1. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.2 os valores médios de resistência à compressão ($f_{cm,c,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.2.1.

Numa primeira análise aos resultados verifica-se que a resistência à compressão aumenta conforme a idade para todas as amassaduras e diminui com o aumento da percentagem de substituição de cimento tal como era expectável.

Tabela 4.2 - Resistência à compressão em cubos

Amassadura	Ensaio de compressão em cubos											
	$f_{cm,c,7d}$ (MPa)	S (MPa)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$f_{cm,c,28d}$ (MPa)	S (MPa)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$f_{cm,c,91d}$ (MPa)	S (MPa)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)
REF	50,27	5,30	10,55	0,00	57,60	4,23	7,34	0,00	80,11	2,95	3,68	0,00
B10CV20CF	27,59	3,61	13,09	-45,11	34,03	2,71	7,97	-40,92	39,56	0,51	1,29	-50,63
B20CV10CF	22,97	2,05	8,90	-54,31	31,72	1,67	5,25	-44,93	39,27	0,77	1,96	-50,98
B20CV40CF	11,23	1,59	14,17	-77,65	17,49	0,75	4,29	-69,64	20,58	2,28	11,07	-74,31
B40CV20CF	12,35	0,95	7,67	-75,43	19,67	0,57	2,91	-65,84	23,10	3,01	13,02	-71,17

A partir dos valores da Tabela 4.2 observa-se que existem variabilidades superiores aos restantes resultados, para os sete dias, no B10CV20CF (13,09%) e no B20CV40CF (14,17%); para os 91 dias, no B20CV40CF (11,07%) e no B40CV20CF (13,02%). Quanto aos restantes resultados dos desvios padrão e os coeficientes de variação verifica-se que estes apresentam valores aceitáveis quando comparado com Silva (2013).

A Figura 4.1 representa as curvas de evolução da resistência à compressão em função da idade (a) e em função da percentagem de substituição pelas adições (f_{ad}) (b), para todos os betões em estudo.

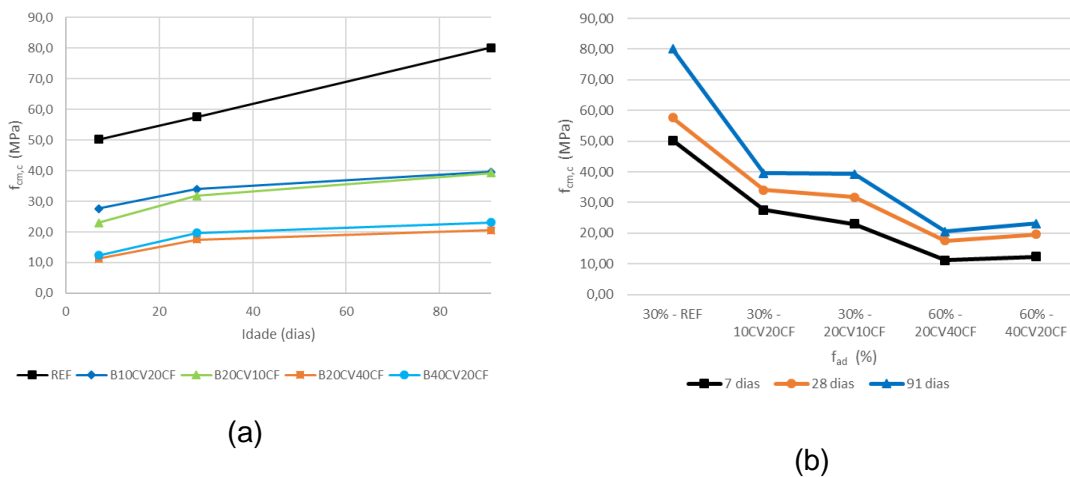


Figura 4.1 - Resistência à compressão em cubos

Analisando tanto a Tabela 4.2 como a Figura 4.1 é possível verificar que todas as misturas com CFRSU atingem grande parte da resistência até aos 7 dias, com destaque para o B10CV20CF, com 70% da resistência em relação aos 91 dias. As restantes misturas atingem 58% (B20CV10CF), 55% (B20CV40CF) e 53% (B40CV20CF). Entre os 28 dias e os 91 dias os betões incorporando CFRSU tendem a estabilizar os valores de resistência, apresentando uma evolução muito reduzida. Quanto à mistura de referência, esta segue a tendência das restantes misturas no desenvolvimento rápido de resistência até aos 7 dias, com 63% da resistência em relação aos 91 dias. No entanto, e ao contrário das misturas com CFRSU, apresenta uma evolução significativa da resistência dos 28 dias para os 91 dias.

Pela observação dos dois gráficos da Figura 4.1, é notória uma quebra da resistência, para todas as idades, nas misturas com CFRSU relativamente ao betão de referência, que se acentua com o aumento da idade de ensaio e com o aumento de f_{ad} . Para os 91 dias, os resultados obtidos demonstram que no patamar de 30% de substituição, a redução foi de 51% nas duas misturas (B10CV20CF e B20CV10CF). Enquanto que para a mesma idade, no patamar de 60% de substituição, a redução foi de 74% e 71%, B20CV40CF e B40CV20CF, respetivamente.

A mesma tendência de redução de resistência foi verificada por Amat *et al.* (2017), com misturas binárias de CFRSU e f_{ad} até 30%. Também para misturas binárias, com f_{ad} até 40%, Jurič *et al.* (2006), Lin e Lin (2006) e Cheng (2012) obtiveram um decréscimo da resistência com o aumento de CFRSU na mistura. Li *et al.* (2012) estudou misturas ternárias (CFRSU e CV) obtendo o mesmo comportamento, com decréscimo médio aos 28 dias de 25% e 34%, para f_{ad} = 30% e

$f_{ad} = 40\%$, respetivamente. No entanto, todos os autores utilizam como base de comparação um betão com 100% de cimento.

Segundo Zajac *et al.* (2014) para adições mais elevadas de fíler calcário, o efeito de diluição do cimento por parte da adição leva a uma diminuição da resistência à compressão. Sendo a calcite o principal mineral constituinte do fíler calcário, quando esta se encontra em excesso, em detrimento do cimento, promove o efeito diluidor (Matschei *et al.*, 2007). Deste modo, a redução da resistência à compressão verificada no presente trabalho, poderá dever-se aos altos níveis de calcite presente nas CFRSU, conforme verificado no gráfico de difração por raio X (Figura 3.8).

Devido à forte presença de calcite nas CFRSU, torna-se importante comparar os resultados obtidos com a influência do FC em misturas ternárias. Apesar da tendência de evolução das misturas ternárias (CV e FC) de Silva e Brito (2015) serem idênticas para os mesmos pares de substituição, os valores obtidos foram, em média, 35 MPa mais elevados do que os valores das quatro misturas deste trabalho.

Adicionalmente, alguns autores referem que a presença de zinco (Zn) no betão poderá retardar a hidratação do cimento, verificando esse efeito nos seus trabalhos com o aumento da quantidade de Zn nas misturas (Balderas *et al.*, 2001; Behfarnia *et al.*, 2013; Pokorný *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2010). O zinco na forma de óxido de zinco (ZnO) e na presença de um forte ambiente alcalino, transforma-se em hidróxido de zinco (Zn(OH)₂), sendo este composto o responsável pelo retardamento da hidratação ao envolver os grãos de cimento e não permitir que estes reajam (Pokorný *et al.* 2016). Além de atrasar a hidratação do cimento e conseqüentemente todo o processo de cura, Behfarnia *et al.* (2013) e Pokorný *et al.* (2016) registaram uma degradação das propriedades mecânicas do betão com o aumento da percentagem de ZnO, obtendo resultados para a compressão axial substancialmente mais baixos à medida que se aumenta a quantidade de ZnO. Behfarnia *et al.* (2013) referem ainda que a adição de dióxido de titânio (TiO₂) ao betão contribuiu para o decréscimo da resistência à compressão, produzindo provavelmente os mesmos efeitos do ZnO na mistura. De facto, verifica-se a presença de pequenas quantidades de ZnO e TiO₂ na composição das CFRSU, relatadas por outros autores (Tabela 3.6).

Por outro lado, registou-se um retardamento da presa na mistura B20CV40CF, tendo sido realizada a sua desmoldagem apenas às 48 horas por não estarem garantidas as condições de endurecimento. Quanto às restantes misturas com CFRSU, não foi possível quantificar o provável retardamento de presa uma vez que, às 24 horas, todos os provetes foram desmoldados. Contudo, o retardamento de presa poderá ter

igualmente acontecido, mas em menor escala do que o verificado na B20CV40CF, devido à diferença de percentagens de CFRSU entre estas misturas.

Na Tabela 4.3, são apresentados os coeficientes de endurecimento (C_{end}) dos betões produzidos, de acordo com a expressão 4.10, demonstrando a evolução da resistência à compressão. Como referência, são também apresentados os valores de C_{end} de acordo com a expressão sugerida pelo Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão (EC2) (NP EN 1992-1-1, 2010).

$$C_{end} = \frac{f_{cm,c,id}}{f_{cm,c,28d}} \quad 4.10$$

onde:

C_{end} = coeficiente de endurecimento;

$f_{cm,c,id}$ = resistência média à compressão na idade i ;

$f_{cm,c,28d}$ = resistência média à compressão aos 28 dias.

Tabela 4.3 - Coeficientes de endurecimento dos BAC

Amassadura	Coeficiente de endurecimento		
	$C_{end,7d}$	$C_{end,28d}$	$C_{end,91d}$
REF	0,87	1,00	1,39
B10CV20CF	0,81	1,00	1,16
B20CV10CF	0,72	1,00	1,24
B20CV40CF	0,64	1,00	1,18
B40CV20CF	0,63	1,00	1,17
EC 2	0,82	1,00	1,09

No patamar de $f_{ad} = 30\%$ é possível observar que a resistência à compressão aos 7 dias é de 81% para o B10CV20CF e 72% para o B20CV10CF em relação aos valores obtidos aos 28 dias. Já no patamar de $f_{ad} = 60\%$, aos 7 dias, os valores são mais próximos com 64% (B20CV40CF) e 63% (B40CV20CF) do valor obtido aos 28 dias.

Comparando com o valor obtido, segundo as indicações do EC 2, é possível verificar que a mistura B10CV20CF é a que apresenta valores mais próximos do EC2. No entanto aos 91 dias todas as misturas apresentam valores superiores aos do EC2.

Em suma, verifica-se que o betão com maior resistência aos 91 dias é o de referência, com 80,11 MPa. Enquanto que o betão mais fraco é o B20CV40CF, com 20,58 MPa aos 91 dias.

4.2.1.2 Resistência à compressão em cilindros

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em cilindros, realizado segundo a NP EN 12390-3 (2009), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.2. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.4 os valores médios de resistência à compressão ($f_{cm,cil,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). É ainda apresentada a relação entre a resistência à compressão de provetes cilíndricos e cúbicos ($f_{cm,cil}/f_{cm,c}$), para os 28 e 91 dias. Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.2.2.

De acordo com o referido no capítulo 3, os cilindros utilizados no ensaio de compressão, foram previamente ensaiados para a determinação do módulo de elasticidade secante. Os ciclos de carga e descarga a que foram sujeitos no referido ensaio poderão provocar o aparecimento de microfissuras, influenciando assim a resistência à compressão.

Tabela 4.4 - Resistência à compressão em cilindros

Amassadura	Ensaio de compressão em cilindros									
	$f_{cm,cil,28d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$f_{cm,cil,91d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$f_{cm,cil}/f_{cm,c}$	
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	28 dias	91 dias
REF	55,38	12,49	22,56	0,00	65,58	12,41	18,92	0,00	0,96	0,82
B10CV20CF	14,43	1,43	9,94	-73,94	16,73	1,39	8,32	-74,48	0,42	0,42
B20CV10CF	24,58	1,74	7,07	-55,61	26,34	2,53	9,61	-59,83	0,77	0,67
B20CV40CF	6,16	0,11	1,86	-88,87	8,79	0,70	7,94	-86,60	0,35	0,43
B40CV20CF	8,64	0,71	8,20	-84,39	10,01	1,75	17,47	-84,73	0,44	0,43

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a resistência à compressão aumentou com idade para todas as misturas. No entanto, a quebra de resistência conforme o aumento de f_{ad} , verificada nos cubos, ocorreu de novo nos cilindros. Tal redução pode ser justificada pelo mesmo motivo referido nos cubos.

A variabilidade dos resultados é semelhante à obtida nos cubos, no entanto, salientam-se os valores elevados da amassadura de referência, com 22,56% (28 dias) e 18,92% (91 dias) e do B40CV20CF com 17,47% aos 91 dias.

Na Figura 4.2, são apresentadas para os 28 dias e 91 dias, as linhas de tendência da comparação direta entre a resistência à compressão de cilindros e cubos.

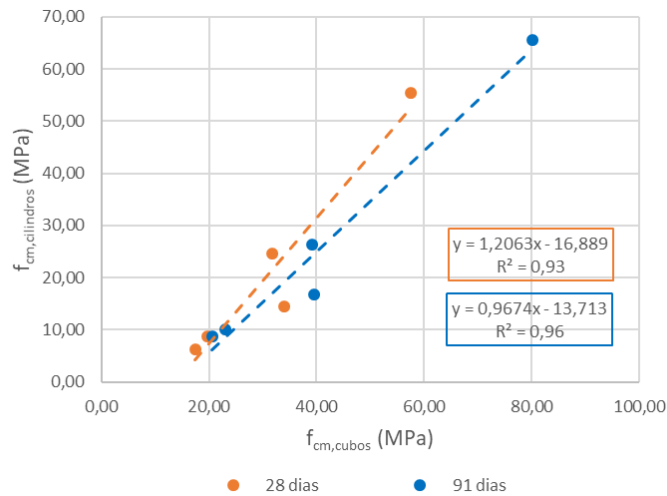


Figura 4.2 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias

Da análise da Figura 4.2, é possível observar que a correlação entre provetes cilíndricos e cúbicos é elevada, tanto para os 28 dias ($R^2=0,93$) como para os 91 dias ($R^2=0,96$). No entanto, a relação $f_{cm,cil}/f_{cm,c}$ baixa consideravelmente nas quatro misturas em estudo relativamente à mistura de referência. Os valores da resistência em cilindros são muito mais baixos dos que os obtidos nos cubos para todas as amassaduras, com exceção da mistura de referência. De facto, os valores de $f_{cm,cil}/f_{cm,c}$ para a referência estão de acordo com os apresentados no Quadro 7 da NP EN 206-1 (2007), que variam entre 0,80 (classe C16/20) e 0,82 (classe C70/85). Já a relação $f_{cm,cil}/f_{cm,c}$ das restantes misturas apresenta valores muito abaixo do que seria suposto, destacando-se aos 91 dias, o B10CV20CF (0,42), o B20CV40CF (0,43) e o B40CV20CF (0,43).

Os resultados obtidos para a relação $f_{cm,cil}/f_{cm,c}$ poderão estar relacionados com a tendência de decréscimo da resistência à compressão (Carminho, 2012). De facto, as diferenças entre cubos e cilindros são originadas pelo atrito gerado entre os pratos da prensa e as faces do provete, que cria um efeito de confinamento lateral, restringindo a deformação transversal do provete. Como o cubo apresenta uma maior área de contacto com a prensa do que o cilindro, este efeito é maior, conduzindo a uma resistência à compressão mais elevada (Carminho, 2012). Sendo o coeficiente de Poisson o principal regulador das deformações transversais ocorridas no provete quando sujeito a cargas axiais, é possível que este apresente um valor alterado, decorrente do comportamento desigual nas duas direções do provete cilíndrico.

4.2.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizado segundo a NP EN 12390-6 (2011), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.3 e Figura 4.5. Para cada amassadura e idade de ensaio estão detalhados, na Tabela 4.5, os valores médios de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). É ainda apresentada a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros ($f_{ctm,sp}/f_{cm,cil}$) para os 28 e 91 dias. Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.2.3.

Tabela 4.5 - Resistência à tração por compressão diametral

Amassadura	Ensaio de tração por compressão diametral									
	$f_{ctm,sp,28d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$f_{ctm,sp,91d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$f_{ctm,sp}/f_{cm,cil}$	
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	28 dias	91 dias
REF	5,03	0,02	0,48	0,00	4,88	0,11	2,18	0,00	0,091	0,074
B10CV20CF	3,12	0,29	9,17	-38,03	3,44	0,14	4,01	-29,58	0,216	0,206
B20CV10CF	2,79	0,58	20,66	-44,51	3,80	0,17	4,50	-22,22	0,114	0,144
B20CV40CF	1,80	0,02	1,11	-64,33	2,31	0,04	1,90	-52,61	0,291	0,263
B40CV20CF	2,25	0,16	6,94	-55,34	2,85	0,13	4,49	-41,54	0,260	0,285

Analisando a Tabela 4.5, verifica-se que a resistência aumenta com a idade do betão. No entanto, a resistência da mistura de referência decresce ligeiramente dos 28 para os 91 dias, mas ainda assim dentro de valores aceitáveis. A variabilidade dos resultados aos 28 dias está dentro da média dos valores obtidos para a compressão uniaxial em cubos e cilindros, apesar da mistura B20CV10CF apresentar um coeficiente de variabilidade mais elevado que as restantes misturas ($C_{var}=20,66$). Para os 91 dias, o valor médio de C_{var} é mais baixo do que nos restantes ensaios de compressão uniaxial.

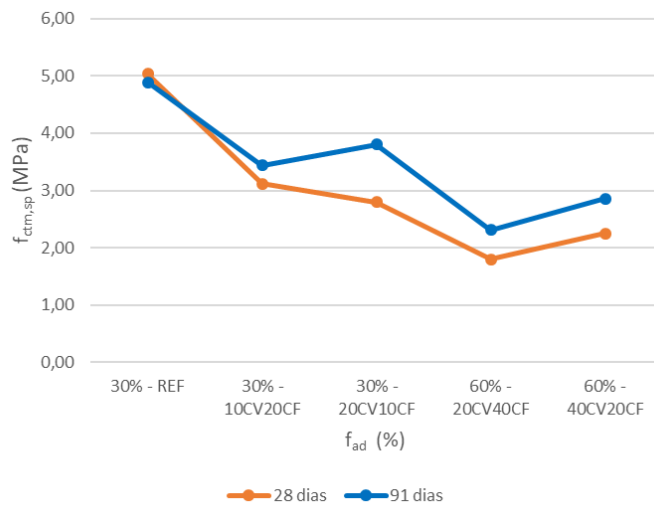


Figura 4.3 - Variação da resistência com f_{ad}

Pela Figura 4.3, é visível que a resistência à tração decresce com o aumento da percentagem de substituição de cimento e com a adição de CFRSU. As misturas com maior percentagem de incorporação de CFRSU (B10CV20CF e B20CV40CF) apresentam uma quebra de resistência maior relativamente ao betão de referência, com valores aos 91 dias mais baixos em 30% e 53%, respetivamente. Collivignarelli *et al.* (2017) substituíram parte do agregado por CFRSU e obtiveram uma quebra semelhante relativamente ao betão de referência, contudo, o aumento da percentagem de substituição provocou uma ligeira subida na resistência à compressão.

Através deste ensaio é possível observar a superfície de rotura dos provetes. Na Figura 4.4, são apresentadas as secções obtidas para os betões em estudo aos 91 dias. Verifica-se que o agregado grosso se distribui uniformemente por todo o provete sem aglomeração de partículas nem a ocorrência de qualquer fenómeno de segregação ou exsudação. Observa-se ainda que a superfície de rotura atravessa o agregado para as misturas REF, B10CV20CF e B20CV10CF. No entanto, para as restantes misturas verifica-se que a rotura ocorre pela zona de interface do agregado com a pasta, sobretudo na B20CV40CF. Este poderá ser um sinal da fraca qualidade da zona de transição agregado-pasta, potenciado pela maior percentagem de substituição de cimento, incorporação de CFRSU e pelo aumento da relação a/c. Os materiais finos ao ocuparem os espaços entre os agregados mais grossos (de forma semelhante ao efeito de parede ocorrido entre o agregado grosso e a superfície do molde) alteram a compactidade do betão na zona de transição entre a pasta e o agregado grosso, enfraquecendo-a.

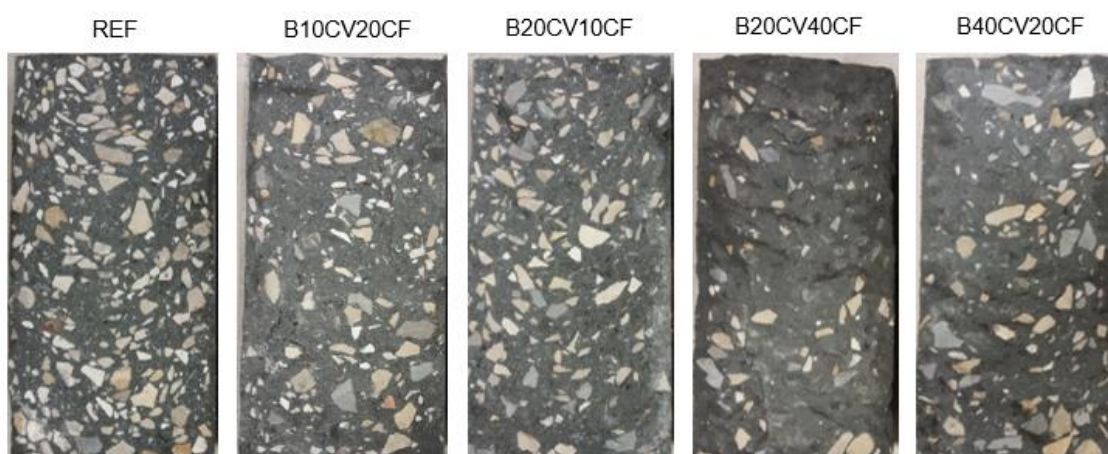


Figura 4.4 - Superfície de rotura dos provetes aos 91 dias

Os valores de $f_{ctm,sp} / f_{cm,cil}$, presentes na Tabela 4.5, variam entre 7,4% e 29,1%. Entre os 28 e os 91 dias não ocorrem grandes variações, no entanto o valor sofre um acréscimo com o aumento da percentagem de CFRSU na mistura. Este valores encontram-se muito acima dos obtidos por Silva (2013), que registou variações entre 6,9% e 11,9%.

Na Figura 4.5, são apresentadas as relações entre os valores $f_{ctm,sp}$ e $f_{cm,cil}$ para todos os BAC em estudo, aos 28 dias e 91 dias, e para a proposta do EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010). O EC 2 apresenta, no Quadro 3.1, duas expressões para betões convencionais que permitem calcular a resistência média à tração, através dos valores médios de resistência à compressão obtidos em cilindros:

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck} \left(\frac{2}{3}\right) \leq C50/60 \quad 4.2$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left(1 + \frac{f_{cm,cil}}{10}\right) > C50/60 \quad 4.3$$

Para as expressões 4.2 e 4.3 considerou-se que a resistência à tração axial corresponde a 90% da resistência à tração por compressão diametral, tal como referido no EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

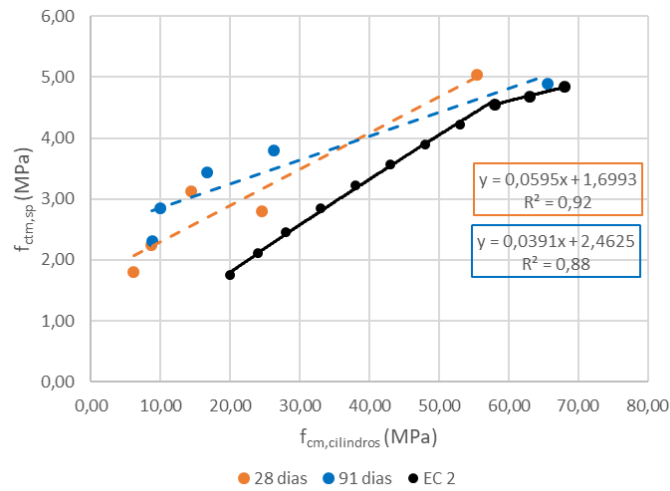


Figura 4.5 - Variação da resistência à tração por compressão diametral com a resistência à compressão

Observando a Figura 4.5 verifica-se que a correlação para as duas idades é elevada, com $R^2 = 0,92$ aos 28 dias e $R^2 = 0,88$ aos 91 dias, demonstrando que para todas as misturas as duas propriedades evoluem da mesma forma. Comparando com os resultados obtidos através da expressão do EC 2, é visível que os valores obtidos experimentalmente são próximos da proposta do EC 2, acompanhando a mesma tendência evolutiva. No entanto, os resultados experimentais foram mais elevados do que os sugeridos pelo EC 2.

4.2.1.4 Módulo de elasticidade secante

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade, realizado segundo a especificação LNEC E 397 (1993), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.6 e na Figura 4.6. Para cada amassadura e idade de ensaio estão detalhados, na Tabela 4.6, os valores médios do módulo de elasticidade secante ($E_{cm,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.2.4.

Tabela 4.6 - Módulo de elasticidade secante

Amassadura	$E_{cm,28d}$ (GPa)	S (GPa)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$E_{cm,91d}$ (GPa)	S (GPa)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)
REF	45,42	4,70	10,34	0,00	41,56	0,98	2,35	0,00
B10CV20CF	23,33	6,54	28,02	-48,63	19,95	0,38	1,91	-52,00
B20CV10CF	28,31	0,23	0,82	-37,66	24,93	0,35	1,42	-40,01
B20CV40CF	14,61	3,30	22,56	-67,84	16,34	1,57	9,61	-60,68
B40CV20CF	12,62	2,66	21,08	-72,21	17,52	0,11	0,65	-57,84

A variabilidade dos resultados obtidos apresenta algumas oscilações sendo, em média, muito mais elevada aos 28 dias (16,56%) do que aos 91 dias (3,19%). Relativamente aos C_{var} obtidos para a compressão uniaxial em cilindros, os valores registados para o módulo de elasticidade são mais altos aos 28 dias e mais baixos aos 91 dias. Comparativamente com o valor obtido por Silva (2013) aos 28 dias (4,21%), os C_{var} registados para a mesma idade são, de facto, elevados.

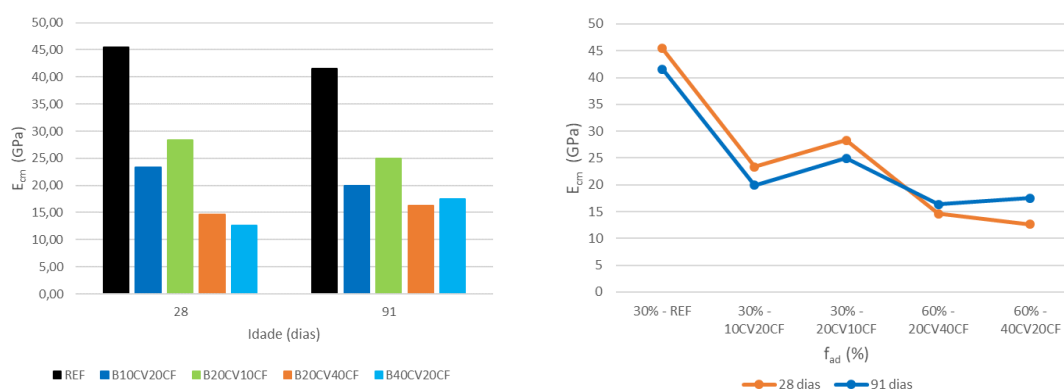


Figura 4.6 - Variação do módulo de elasticidade com a idade e com f_{ad}

Analisando a Figura 4.6, verifica-se que o valor de E_{cm} aumenta dos 28 para os 91 dias apenas nas misturas com $f_{ad}=60\%$, enquanto que nas restantes misturas os valores decrescem, incluindo o betão de referência. Este decréscimo pode estar relacionado com algum fator externo, provavelmente derivado à calibração do equipamento de ensaio.

Tal como nos restantes ensaios de resistência mecânica, é possível observar uma redução considerável dos valores obtidos nas misturas com adição de CFRSU relativamente à mistura de referência, redução essa que se acentua com o aumento de f_{ad} . Aos 28 dias, o módulo de elasticidade das misturas com $f_{ad}=60\%$ apresenta uma

redução de cerca de 70% relativamente à referência. Enquanto que para a mesma idade, o valor do B10CV20CF é reduzido em 49% e o B20CV10CF em 38%. Para os 91 dias, as reduções de E_{cm} relativamente ao BAC de referência acentuam-se no patamar de substituição de 30%, com variações de 52% e 40%, respetivamente para B10CV20CF e B20CV10CF. No patamar de 60% de substituição, a redução relativamente ao betão de referência apresentou-se menos acentuada dos 28 dias para os 91 dias, no entanto os valores obtidos continuam a apresentar uma redução significativa em cerca de 60%. Consta-se assim, que os valores reduzidos de E_{cm} obtidos nas quatro misturas em estudo estão fora do normal, indiciando um efeito negativo das CFRSU nesta propriedade do BAC.

Lynn *et al.* (2016) obtiveram reduções de 56% para o betão de referência, aos 28 dias, justificando-as com a expansão do betão devido à presença de alumínio (Al) nas CFRSU. No entanto, o estudo incidiu na incorporação de 85% de CFRSU como agregado, tendo como referência um betão com 100% de agregados naturais. Também Bertolini *et al.* (2004) registaram uma expansão do betão, provocada pela formação de hidrogénio decorrente do processo de corrosão do Al presente nas CFRSU. As pequenas bolhas de hidrogénio ficam encurraladas na restante pasta produzindo um aumento de volume. Já Pokorný *et al.* (2016) obtiveram uma redução do valor do módulo de elasticidade para uma maior adição de Zn na mistura, bem como referiram o efeito do hidrogénio, proveniente da corrosão do Zn, no aumento de volume das amostras.

Efetivamente, verificou-se não só a presença de óxido de alumínio (Al_2O_3) na composição das CFRSU por parte de outros autores (Tabela 3.6), como também se registou um aumento do volume dos provetes ainda dentro do molde (Figura 4.7), agravado pelo aumento da percentagem de CFRSU nas misturas. Desta forma, é provável que a presença de Al_2O_3 tenha afetado as propriedades mecânicas dos BAC com CFRSU.



Figura 4.7 - Expansão verificada nos provetes

Com os mesmos pares de substituição e utilizando FC no lugar das CFRSU, Silva & Brito (2015) obtiveram valores semelhantes entre o betão com 30% de CV e as misturas ternárias com $f_{ad}=30\%$, tanto aos 28 como aos 91 dias. Para $f_{ad}=60\%$, verificou-se uma redução do módulo de elasticidade de 10% relativamente à mistura com 30% de CV.

Na Figura 4.8, são apresentadas as correlações entre o E_{cm} e a resistência à compressão dos cilindros ($f_{cm,cil}$) para o betão de referência e para as restantes misturas com CFRSU, bem como a correlação obtida pela expressão proposta pelo EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

A fórmula apresentada no Quadro 3.1 do EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), permite calcular o E_{cm} através dos valores médios de resistência à compressão em cilindros, obtidos experimentalmente:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm,cil}}{10} \right)^{0,3} \quad 4.4$$

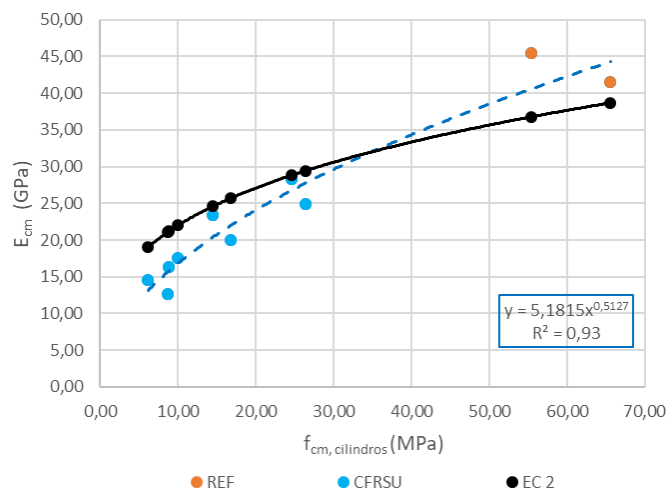


Figura 4.8 - Relação entre E_{cm} e o $f_{cm,cil}$ para todas as misturas e para a proposta do EC 2

Avaliando a Figura 4.8, verifica-se que a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros é elevada, com um valor de $R^2=0,93$, demonstrando assim a baixa dispersão dos resultados obtidos. Comparando os resultados obtidos experimentalmente com a correlação determinada de acordo com a expressão proposta pelo EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), é notório que a evolução das duas curvas é semelhante. No entanto, para valores de $f_{cm,cil}$ inferiores a aproximadamente 35 MPa, os resultados registados na campanha experimental são

mais baixos que os do EC 2, correspondendo às misturas com CFRSU. Por outro lado, o BAC de referência apresenta resultados superiores ao EC 2.

4.2.1.5 Retração

Os resultados obtidos na determinação da extensão total de retração, realizada segundo a especificação LNEC E 398 (1993), durante 91 dias, são apresentados na Tabela 4.7 e na Figura 4.9 e Figura 4.10. Para cada amassadura e dado o elevado número de leituras, estão apenas detalhados na Tabela 4.7 os valores médios obtidos aos 3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Durante o período que decorreu o ensaio, foram verificadas algumas variações fora do intervalo definido para a temperatura e humidade relativa, no entanto, estas afetaram todos os BAC em estudo de igual forma. As tabelas completas com os dados de todas as leituras e os registos das temperaturas e humidades relativas são apresentados no anexo A.2.5.

Tabela 4.7 - Extensão total de retração ao longo do tempo

Amassadura	Extensão de retração ($\mu\text{m}/\text{m}$)					
	ϵ_{cs3}	ϵ_{cs7}	ϵ_{cs14}	ϵ_{cs28}	ϵ_{cs56}	ϵ_{cs91}
REF	-28	-109	-204	-361	-450	-495
B10CV20CF	-80	-148	-262	-473	-571	-654
B20CV10CF	-130	-166	-364	-473	-613	-674
B20CV40CF	-22	-133	-382	-563	-706	-804
B40CV20CF	5	-20	-150	-326	-406	-452

Analisando a tabela, verifica-se que a extensão total de retração aumenta com a idade, para todos os BAC em estudo, estabelecendo uma variação de retração, aos 91 dias, entre 452 e 804 $\mu\text{m}/\text{m}$. A extensão total de retração caracteriza-se por uma rápida evolução inicial em todas as misturas, atingindo 50% da retração final (91 dias) entre os 14 e os 28 dias, com a exceção do B20CV10CF, que atinge esse valor antes dos 14 dias.

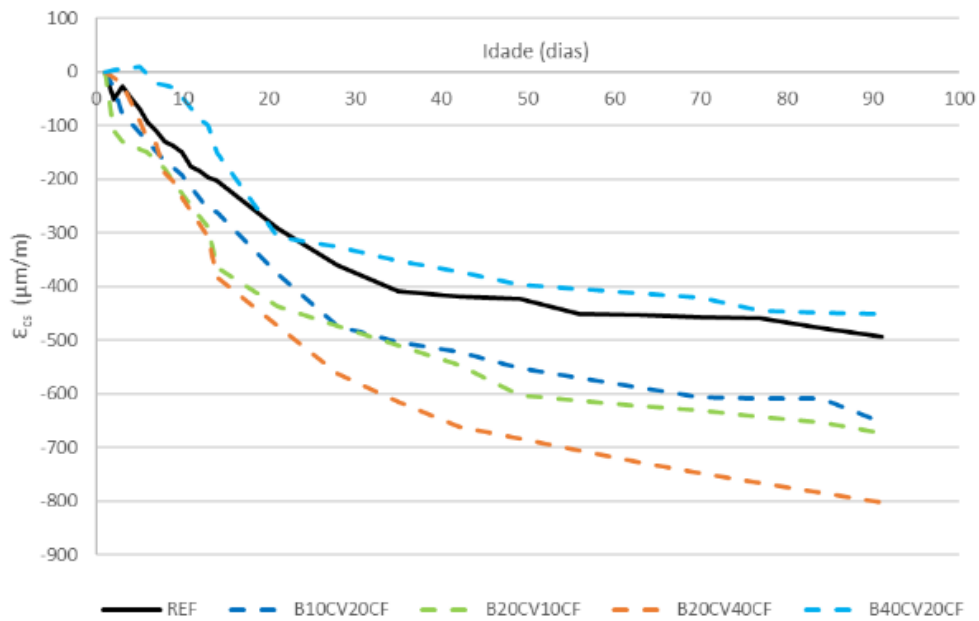


Figura 4.9 - Extensão total de retração ao longo de 91 dias

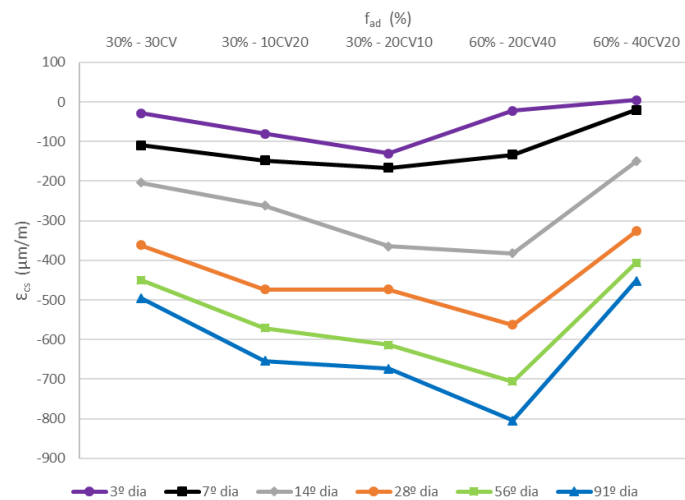


Figura 4.10 - Variação da extensão de retração em função de f_{ad}

Observando as Figura 4.9 e Figura 4.10, é possível verificar que todas as misturas apresentam um comportamento inicial semelhante, exceto a mistura B40CV20CF, que nos primeiros dias passa por uma fase de expansão e só a partir do terceiro dia começa a retrair.

Comparando as misturas em estudo com o BAC de referência, é notório um aumento da extensão de retração com o aumento de CFRSU no BAC que se acentua ao longo do tempo. No entanto, o B40CV20CF não segue a mesma tendência, obtendo

em todas as idades, valores mais baixos de retração do que a mistura de referência, em cerca de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tal redução, dever-se-á ao aumento de CV em 10% relativamente à referência, e não à adição de CFRSU. Com o aumento do volume de CV em substituição do cimento, é provável que se obtenha um grau de hidratação inferior, que provocará um maior volume de material não hidratado, induzindo assim as CV a funcionarem como micro agregado potenciador da diminuição da retração (Silva, 2013) As misturas com $f_{ad}=30\%$ atingem aos 91 dias valores semelhantes de retração, enquanto que o B20CV40CF apresenta o resultado mais elevado, com 804 $\mu\text{m}/\text{m}$ aos 91 dias. De salientar ainda, que a mistura B20CV40CF iniciou o ensaio de retração 24 horas mais tarde que as restantes misturas, uma vez que os provetes só foram desmoldados às 48 horas tal como referido em 4.2.1.1.

Na Tabela 4.8, é apresentada uma previsão da extensão de retração de acordo com a expressão 4.5 proposta no EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010) para betão convencional:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad 4.5$$

onde:

ϵ_{cs} = extensão total de retração;

ϵ_{cd} = extensão de retração por secagem;

ϵ_{ca} = extensão de retração autogénea.

De modo a facilitar a comparação entre os resultados obtidos e o EC 2 e, como o cálculo é afetado pela resistência mecânica, foram determinadas apenas as extensões de retração para o intervalo de resistência mecânica obtido na presente dissertação (Figura 4.11).

Tabela 4.8 - Previsão da extensão de retração segundo o EC 2

Amassadura	Extensão de retração ($\mu\text{m}/\text{m}$)					
	ϵ_{cs3}	ϵ_{cs7}	ϵ_{cs14}	ϵ_{cs28}	ϵ_{cs56}	ϵ_{cs91}
EC2 (20 MPa)	-92	-219	-352	-482	-584	-635
EC2 (30 MPa)	-90	-207	-329	-448	-543	-590
EC2 (50 MPa)	-88	-189	-293	-396	-479	-521
EC2 (60 MPa)	-89	-183	-280	-377	-455	-495
EC2 (70 MPa)	-90	-179	-270	-361	-436	-474

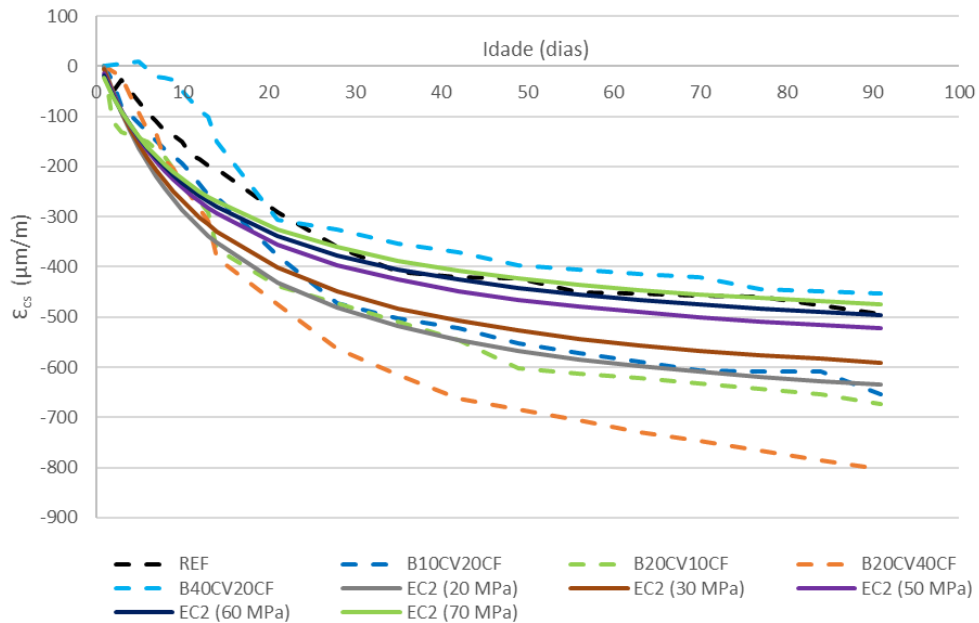


Figura 4.11 - Extensão de retração das misturas em estudo e do modelo de previsão do EC 2

Da análise da Figura 4.11, é possível observar que a previsão do EC 2 apresenta uma retração mais acentuada, nos primeiros dias, relativamente às misturas em estudo. Para o mesmo patamar de resistência mecânica, o BAC de referência e o B10CV20CF apresentam valores semelhantes aos sugeridos pelo EC 2, enquanto que o B20CV10CF e o B20CV40CF registam valores mais elevados. A exceção ocorre, mais uma vez, para o B40CV20CF, que obtém valores de retração muito menores do que o patamar equivalente de resistência mecânica dado pelo EC 2. Esta mistura chega mesmo a ser inferior à estimativa para uma resistência mecânica de 70 MPa, valor que é muito elevado relativamente ao obtido no ensaio de resistência à compressão.

Cheng (2012) obteve a mesma tendência de aumento da extensão de retração com o aumento da percentagem de CFRSU nas misturas, estudando argamassas com f_{ad} entre 10% e 40%. Também Lynn et al. (2016) registaram valores mais elevados para betões com CFRSU em relação à mistura de referência, no entanto as CFRSU foram incorporadas como agregado e não como substituto do cimento, sendo o betão de referência composto por 100% de agregados naturais.

Substituindo igualmente o agregado por CFRSU, Pera et al. (1997) estudou três betões com diferentes percentagens de substituição (0%, 50% e 100%), obtendo aos 14 dias valores de 330 $\mu\text{m/m}$ para 0% e 50% de substituição, e 250 $\mu\text{m/m}$ para 100%. O autor considerou que as CFRSU não afetavam negativamente o betão quando todas as reações devidas ao alumínio (Al) foram eliminadas.

As misturas ternárias estudadas por Silva e Brito (2015) com incorporação de CV e FC, para os mesmos pares de substituição, obtiveram valores mais baixos de retração em todas as misturas relativamente aos betões da presente dissertação. A adição de FC não afetou tão negativamente esta propriedade como as CFRSU, demonstrando ainda um comportamento inverso ao baixar a extensão de retração com o aumento de f_{ad} .

4.2.1.6 Ultra-sons

Os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons, realizado segundo a NP EN 12504-4 (2007), para as idades de 7, 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.9 e na Figura 4.12. Para cada amassadura e idade de ensaio estão detalhados, na Tabela 4.9, os valores médios da velocidade dos ultra-sons ($V_{usm,c,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.2.6.

Tabela 4.9 - Resultados de ultra-sons para todos os BAC

Amassadura	$V_{usm,c,7d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$V_{usm,c,28d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}	$V_{usm,c,91d}$	S	C_{var}	Δ_{REF}
	(m/s)	(m/s)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)	(%)	(%)
REF	4710,14	73,20	1,55	0,00	4692,64	41,89	0,89	0,00	4918,11	24,19	0,49	0,00
B10CV20CF	4177,09	128,99	3,09	-11,96	4151,53	38,13	0,92	-11,53	4204,14	56	1,33	-14,52
B20CV10CF	3998,53	111,80	2,80	-15,73	4065,78	67,65	1,66	-13,36	4159,06	23,9	0,58	-15,43
B20CV40CF	3672,03	181,53	4,94	-22,61	3755,84	80,89	2,15	-19,96	3644,43	62,1	1,70	-25,90
B40CV20CF	3810,30	95,50	2,51	-19,69	3812,76	117,26	3,08	-18,75	3740,96	42	1,12	-23,93

Numa primeira análise aos resultados da Tabela 4.9, verifica-se que a variabilidade da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas é reduzida. Os desvios padrão obtidos diminuem com a idade de ensaio, apresentando um valor máximo de 181,53 (m/s) e uma média global de 76,34 (m/s). No que diz respeito ao coeficiente de variação, este apresenta a mesma tendência de diminuição com a idade, registando um valor máximo de 4,94 % e uma média global de 1,92 %.

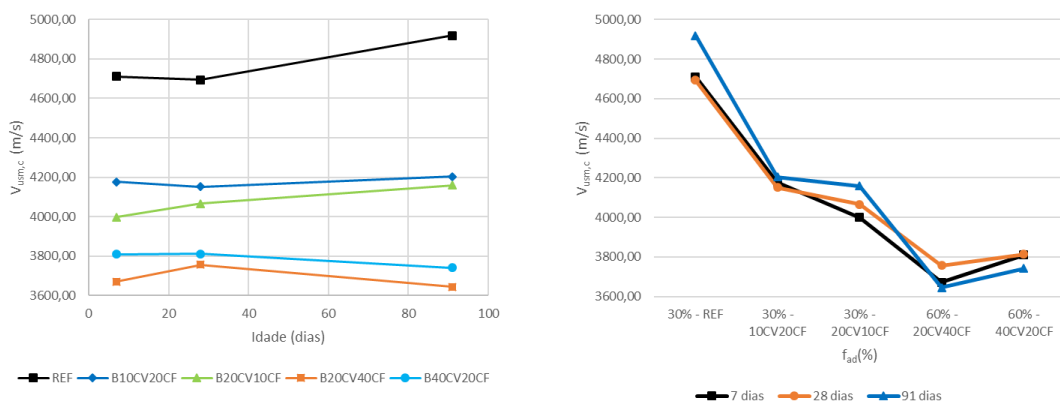


Figura 4.12 - Variação da velocidade de propagação de ultra-sons com a idade e com f_{ad}

Observando a Figura 4.12, é notório um comportamento distinto, ao longo do tempo, entre o BAC de referência e as restantes misturas. Nas primeiras idades, as velocidades de propagação não sofreram grandes alterações, chegando mesmo a diminuir ligeiramente na referência e no B10CV20CF. Dos 28 para os 91 dias, a mistura de referência apresenta um aumento mais acentuado da velocidade, enquanto que nas restantes misturas o valor tende a estagnar, diminuindo ligeiramente para f_{ad} de 60%. No geral, verifica-se um decréscimo na velocidade de propagação dos ultra-sons com o aumento de f_{ad} . As misturas com f_{ad} de 30%, apresentam um decréscimo médio de 15% relativamente à referência, enquanto que para f_{ad} de 60% esse decréscimo aumenta para uma média de 25%.

Dixit et al.(2016) obtiveram a mesma tendência de decréscimo da velocidade de propagação com o aumento de f_{ad} a partir de 10% até 40%. Contudo, utilizou CFRSU em substituição do agregado fino em percentagens de 5% a 40%.

Na Figura 4.13, é apresentada a relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a resistência à compressão uniaxial ($f_{cm,c}$), para todas as misturas estudadas em todas as idades.

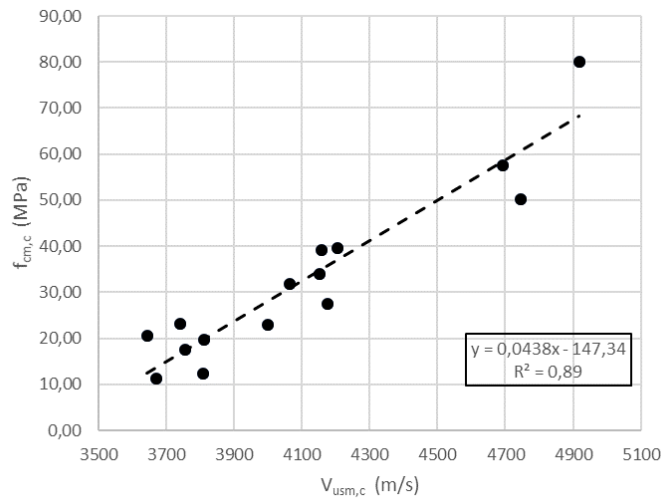


Figura 4.13 - Relação entre $V_{usm,c}$ e $f_{cm,c}$ para todas as misturas

Da análise da Figura 4.13, é possível observar a reduzida dispersão dos resultados obtidos, sustentada pelo valor do coeficiente de correlação registado ($R^2=0,89$).

Na Tabela 4.10, são apresentados valores de referência para a velocidade de propagação dos ultra-sons, segundo o documento da IAEA (2002), relativo a ensaios não-destrutivos em estruturas de betão.

Tabela 4.10 - Classificação do betão em função da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, (adaptado de IAEA (2002))

V_{usm} (m/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 - 4500	Bom
3000 - 3500	Comportamento duvidoso
2000 - 3000	Pobre
< 2000	Muito pobre

Comparando os valores propostos na Tabela 4.10 com os obtidos no procedimento experimental, verifica-se que segundo o IAEA (2002), aos 91 dias, o BAC de referência apresenta uma qualidade excelente, enquanto que as restantes misturas se enquadram num betão de boa qualidade.

4.2.2 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

4.2.2.1 Absorção de água por imersão

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão, realizado segundo a especificação LNEC E 394 (1993), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.11 e na Figura 4.14. O ensaio de absorção de água por imersão permite avaliar a porosidade aberta do betão. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.11, os valores médios da absorção de água por imersão ($A_{m,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.3.1.

Tabela 4.11 – Absorção de água por imersão

Amassadura	$A_{m,28d}$ (%)	S (%)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$A_{m,91d}$ (%)	S (%)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)
REF	13,50	0,67	4,95	0,00	10,05	0,14	1,42	0,00
B10CV20CF	13,87	0,45	3,28	2,75	13,76	0,37	2,67	36,92
B20CV10CF	13,04	0,55	4,22	-3,42	13,26	2,86	21,59	31,95
B20CV40CF	14,76	1,29	8,77	9,29	17,24	2,29	13,26	71,62
B40CV20CF	14,26	1,02	7,12	5,63	13,91	0,65	4,64	38,49

Numa primeira análise, é possível observar que os desvios padrão e coeficientes de variação apresentam valores normais. No entanto, aos 91 dias, o C_{var} regista valores mais elevados para as misturas B20CV10CF (21,59%) e B20CV40CF (13,26%).

A maioria dos BAC, não apresenta grandes variações no valor de absorção dos 28 para os 91 dias, com a exceção da referência que desce ligeiramente e a mistura B20CV40CF que aumenta o seu valor. No entanto, o desvio padrão mais elevado da mistura B20CV40CF, aos 91 dias, poderá estar na origem do valor mais díspar relativamente aos restantes BAC.

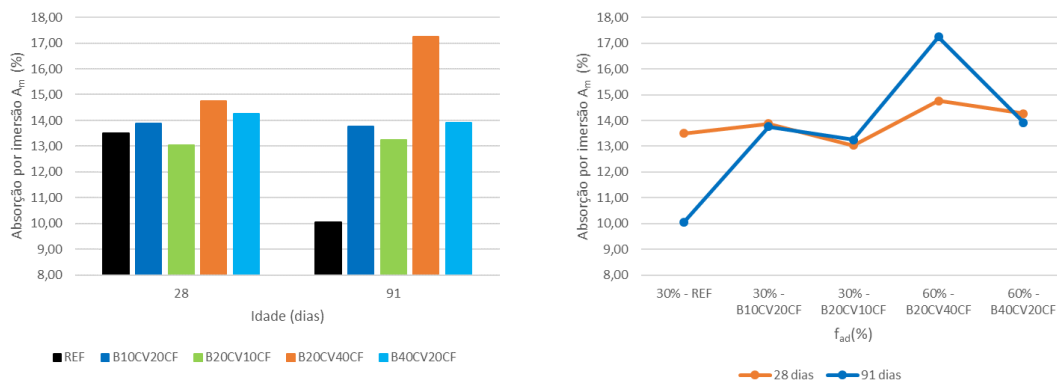


Figura 4.14 - Variação da absorção de água por imersão com a idade e com a f_{ad}

Pela análise da Figura 4.14, verifica-se que a mistura B20CV40CF obteve a maior absorção de água por imersão, tanto aos 28 dias como aos 91 dias. Registou-se um aumento desta propriedade com o aumento de f_{ad} , apesar de, não ser influenciada pelo tipo de adição no betão, mas sim pela percentagem de substituição considerada. O patamar de $f_{ad}=30\%$ manteve valores semelhantes à mistura de referência, com variações médias de 3% e 34%, respetivamente aos 28 e 91 dias. Enquanto que no patamar de $f_{ad}=60\%$, a mistura B20CV40CF obteve um aumento relativamente à mistura de referência no valor de 9% aos 28 dias e 71% aos 91 dias. Constata-se assim, que a porosidade aberta do betão e principal contacto com exterior, que conduz à absorção de água, não é afetada pela idade de ensaio.

A mesma tendência foi verificada por Silva (2013), nas misturas ternárias com CV e FC. Para os mesmos pares de substituição, os valores de absorção por imersão registados foram semelhantes aos obtidos no presente trabalho, com exceção da mistura B20CV40CF que obteve um valor mais elevado aos 91 dias. A tendência evolutiva é justificada por Silva (2013) com a variação da razão a/c.

4.2.2.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão, realizado segundo a especificação LNEC E 393 (1993), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.12 e na Figura 4.15 e Figura 4.16. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.12, os valores médios da absorção capilar nos diversos tempos de ensaio (Abs_m), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}), o coeficiente de absorção capilar ($Coef_{abs}$) e a diferença de $Coef_{abs}$ entre

as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.3.2

Tabela 4.12 - Resultados da absorção de água por capilaridade

Amassadura	Idade (dias)	Absorção t _{3 h}			Absorção t _{6 h}			Absorção t _{24 h}			Absorção t _{72 h}			Coeficiente de absorção		
		Abs _m (kg/m ²)	S (%)	C _{var} (%)	Abs _m (kg/m ²)	S (%)	C _{var} (%)	Abs _m (kg/m ²)	S (%)	C _{var} (%)	Abs _m (kg/m ²)	S (%)	C _{var} (%)	Coef _{abs} (mm/min ^{0,5})	R ² (%)	Δ_{REF} (%)
REF	28	1,43	0,28	19,37	1,83	0,33	18,12	2,57	0,46	17,83	2,96	0,42	14,34	0,095	0,98	0,00
	91	0,93	0,20	21,21	1,04	0,23	22,04	1,34	0,27	19,97	1,72	0,39	22,44	0,052	0,86	0,00
B10CV20CF	28	1,49	0,06	3,95	1,94	0,09	4,45	2,72	0,11	4,17	3,26	0,14	4,36	0,099	0,97	3,68
	91	0,40	0,17	43,45	0,47	0,16	34,64	0,74	0,20	26,65	1,08	0,25	22,94	0,023	0,90	-54,95
B20CV10CF	28	1,27	0,08	6,67	1,60	0,12	7,35	2,23	0,16	7,34	2,60	0,20	7,53	0,081	0,95	-15,44
	91	1,01	0,09	8,57	1,21	0,09	7,16	1,62	0,14	8,78	2,06	0,14	6,93	0,061	0,93	18,06
B20CV40CF	28	1,45	0,22	14,88	1,81	0,28	15,63	2,81	0,38	13,41	3,73	0,40	10,61	0,091	0,95	-4,10
	91	1,28	0,30	23,59	1,53	0,32	20,62	2,19	0,34	15,59	2,83	0,40	14,00	0,077	0,92	49,51
B40CV20CF	28	1,34	0,02	1,22	1,68	0,03	1,95	2,38	0,06	2,38	3,00	0,06	1,89	0,084	0,95	-11,55
	91	0,77	0,07	8,45	0,89	0,07	7,37	1,28	0,07	5,09	1,70	0,10	5,77	0,043	0,86	-15,92

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os desvios padrão e os coeficientes de variação apresentam alguns valores acima da média, indicando alguma variabilidade dos resultados. Aos 28 dias, o coeficiente de variação apresenta um valor médio de 9%, enquanto que aos 91 dias esse valor aumenta para 17%. No que diz respeito aos vários tempos de ensaio, a variabilidade é maior às 3 horas (15%), decrescendo com o avançar do ensaio. Comparando as diferentes misturas, verifica-se uma maior variabilidade no BAC de referência (19%), no B10CV20CF (18%) e no B20CV40CF (16%), enquanto que o B20CV10CF e o B40CV20CF registam valores consideravelmente mais baixos, 8% e 4% respetivamente.

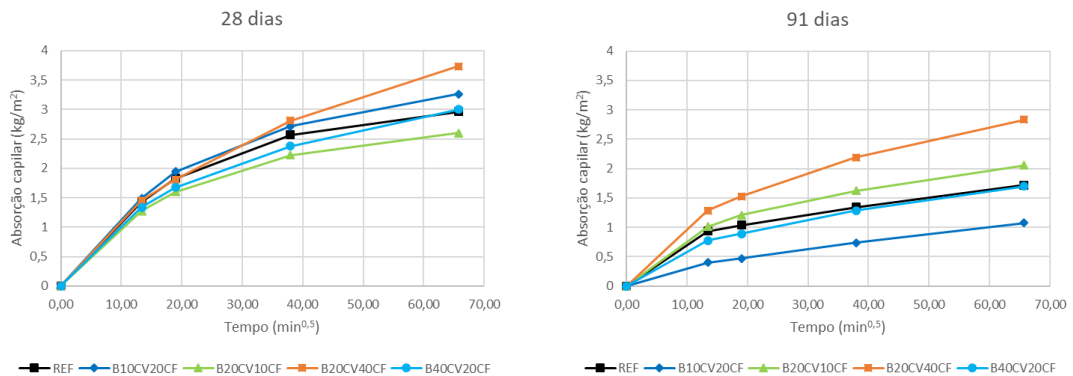


Figura 4.15 - Curvas de absorção capilar, aos 28 e 91 dias

Observando a Figura 4.15, é notório que tanto aos 28 dias como aos 91 dias, a absorção de água por capilaridade é mais acentuada nas primeiras três horas, diminuindo de intensidade nas horas seguintes. É também visível que o valor de absorção diminui com a idade para todas as misturas em estudo. O BAC B20CV40CF apresenta o valor mais elevado de absorção aos 28 e 91 dias, ao passo que a mistura de referência e o B40CV20CF registam valores muito próximos nas duas idades de ensaio. No entanto, no patamar de $f_{ad}=30\%$, o B10CV20CF desce consideravelmente o valor de absorção dos 28 para os 91 dias, sendo mesmo o mais baixo de todos os BAC, enquanto que a mistura B20CV10CF regista um decréscimo muito menos acentuado.

Na Figura 4.16, são apresentados os coeficientes de absorção capilar para todas as misturas em estudo, obtidos a partir do declive da reta que correlaciona a absorção de água por capilaridade e a raiz quadrada do tempo.

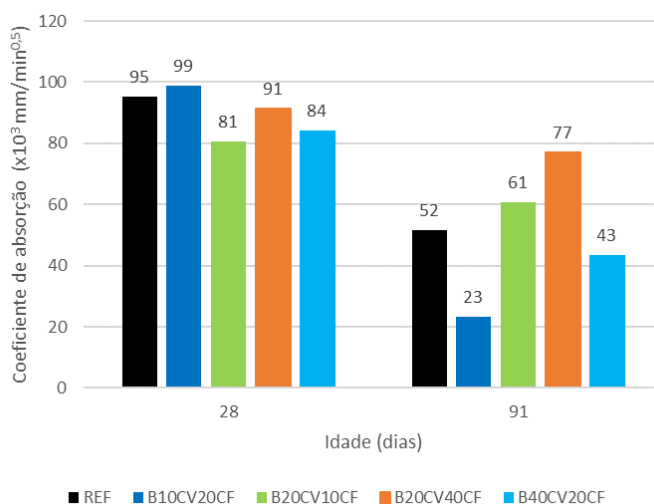


Figura 4.16 - Coeficientes de absorção capilar, aos 28 e 91 dias

Pela análise da Figura 4.16, verifica-se que aos 28 dias a mistura B10CV20CF é a única que apresenta um coeficiente de absorção capilar ligeiramente superior à referência, enquanto que todas as outras registam valores mais baixos. Aos 91 dias, constata-se que o coeficiente de absorção desce para todas as misturas relativamente aos 28 dias. Tal decréscimo é mais acentuado nas misturas B10CV20CF e B40CV20CF com valores mais baixos em 76% e 49%, ambas com 20% de incorporação de CFRSU.

Os valores apresentados dos 28 para os 91 dias poderão estar relacionados não só com as reações mais lentas provocadas pelas CV, mas também com o possível retardamento da hidratação do cimento provocado pelas CFRSU e referido em 4.2.1.1. Segundo Behfarnia et al. (2013), é possível que o efeito do zinco no betão perdure

mesmo depois dos 28 dias, levando a que as reações de hidratação ocorram mais tardiamente, ocupando os poros existentes.

Relativamente ao betão de referência, para os 91 dias, destaca-se a mistura B10CV20CF com um decréscimo do coeficiente de absorção capilar na ordem dos 55%. De facto, esta mistura apresenta o valor de Coef_{abs} mais baixo, com $0,023 \text{ mm/min}^{0,5}$.

Lin (2005) obteve um decréscimo dos poros capilares com a idade de ensaio, no entanto, registou uma tendência de aumento dos poros com o aumento de f_{ad} . O estudo incidiu na substituição de parte do cimento por CV da queima de RSU, com f_{ad} de 10%, 20% e 40%.

Os valores obtidos por Silva e Brito (2012) para misturas ternárias com CV e FC, demonstraram uma tendência de decréscimo do coeficiente de absorção com a idade de ensaio e de aumento com a percentagem de substituição. Contudo, os valores de coeficiente de absorção capilar obtidos na presente dissertação foram mais baixos aos 91 dias, para todas as misturas, relativamente aos registados por Silva e Brito (2012). Os coeficientes das misturas com CV e CFRSU, aos 91 dias, variaram entre $0,023$ e $0,077 \text{ mm/min}^{0,5}$, enquanto que as misturas com CV e FC variaram entre $0,068$ e $0,084 \text{ mm/min}^{0,5}$.

Na Tabela 4.13, são apresentados valores de coeficiente de absorção propostos por Browne (1991) e Neville (1995), que permitem caracterizar a durabilidade do betão ao avaliar a sua qualidade.

Tabela 4.13 - Qualidade do betão em função do seu coeficiente de absorção capilar (adaptado de Browne (1991) e Neville (1995))

Qualidade do betão	Coeficiente de absorção, S (mm/min^{0,5})
Baixa	$S > 0,2$
Média	$0,1 < S < 0,2$
Elevada	$S < 0,1$

Comparando os resultados obtidos na presente dissertação com os coeficientes propostos na Tabela 4.13, e tendo presente a diferença nos procedimentos de ensaio da proposta relativamente ao tempo de absorção considerado, verifica-se que todas as misturas apresentam uma classificação de qualidade elevada, tanto aos 28 dias como aos 91 dias. De facto, os valores apresentados pelas misturas com CFRSU encontram-se num patamar tão baixo, podendo este facto justificar as variações entre as misturas aos 91 dias.

4.2.2.3 Difusão de cloretos

Os resultados obtidos no ensaio de penetração de cloretos, realizado segundo a especificação LNEC E 463 (2004), para as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.14 e na Figura 4.17. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.14, os valores médios do coeficiente de difusão ($D_{m,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.3.3.

Tabela 4.14 - Coeficientes de difusão de cloretos

Amassadura	$D_{m,28d}$ ($10^{-12}m^2/s$)	S	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$D_{m,91d}$ ($10^{-12}m^2/s$)	S	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)
REF	5,36	0,95	17,81	0,00	2,84	0,46	16,18	0,00
B10CV20CF	12,52	1,55	12,38	133,59	8,56	0,40	4,72	201,13
B20CV10CF	11,80	1,02	8,62	120,15	7,58	0,43	5,65	166,37
B20CV40CF	16,84	2,58	15,30	214,38	7,73	1,00	12,96	171,96
B40CV20CF	10,36	2,17	20,99	93,32	6,05	1,17	19,43	112,61

Analisando a Tabela 4.14, verifica-se que, em média, os desvios padrão e os coeficientes de variação não são muito elevados. Aos 28 dias, o desvio padrão apresenta um valor médio de $1,65 \times 10^{-12} m^2/s$, sendo mais elevado nas misturas com $f_{ad}=60\%$, o que poderá justificar o valor de D_m mais elevado na mistura B20CV40CF. Para os 91 dias, o desvio padrão médio é de $0,69 \times 10^{-12} m^2/s$, com as misturas de $f_{ad}=60\%$ a apresentarem os valores mais elevados. No que diz respeito ao coeficiente de variação, este regista um decréscimo dos 28 dias para os 91 dias, estando dentro dos valores indicados na E 463 (2004). No entanto, a mistura de referência e as misturas com $f_{ad}=60\%$ apresentam valores de C_{var} mais elevados que as restantes.

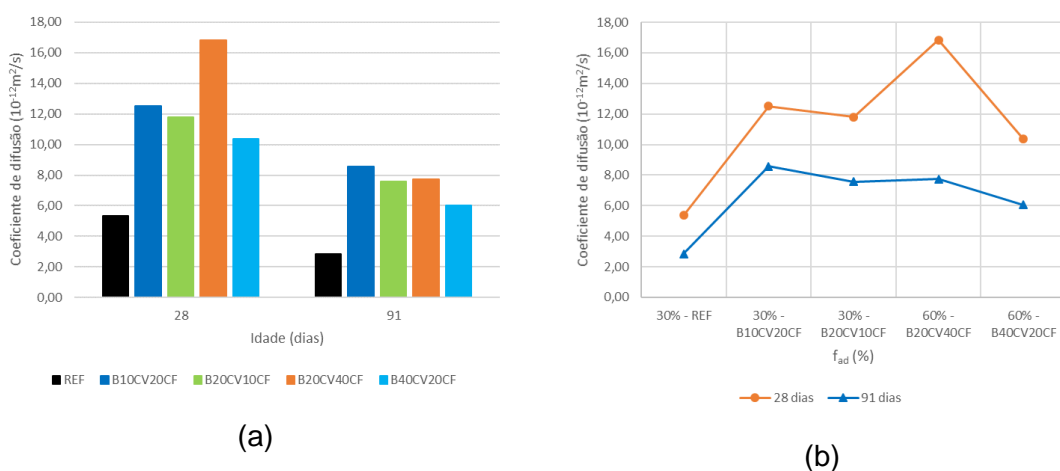


Figura 4.17 - Variação do coeficiente de difusão com a idade (a) e com f_{ad} (b)

Numa primeira análise aos resultados obtidos na Figura 4.17, verifica-se que os coeficientes de difusão descem dos 28 para os 91 dias, em média, 34% para $f_{ad}=30\%$ e 48% para $f_{ad}=60\%$. Apesar disso, a incorporação de CFRSU na mistura provocou um aumento do coeficiente de difusão relativamente à mistura de referência. Esse aumento foi mais evidente nas misturas com maior percentagem de CFRSU (B10CV20CF e B20CV40CF), com valores superiores nas duas idades de ensaio. Constata-se assim, que a diminuição de CV na mistura e, conseqüente aumento de CFRSU, provocou um acréscimo no coeficiente de difusão de cloretos.

Wegen *et al.* (2013), obtiveram a mesma tendência de aumento do coeficiente de difusão de cloretos com a incorporação de CFRSU. No entanto, o estudo incidiu na substituição de agregado fino e grosso por cinza de fundo lavada.

As misturas ternárias com CV e FC estudadas por Silva (2013), obtiveram a mesma tendência de aumento do coeficiente de difusão com a diminuição de CV na mistura. O autor justifica a dificuldade de penetração dos iões cloretos nas misturas com maior percentagem de CV, com o facto das suas partículas mais arredondadas contribuírem para uma maior compacidade do betão. Contudo, para os mesmos pares de substituição de Silva (2013), os coeficientes de difusão obtidos no presente trabalho foram mais elevados, verificando-se um efeito mais negativo das CFRSU do que o FC.

4.2.2.4 Resistividade Elétrica

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica, realizado segundo a proposta de norma europeia apresentada pelo grupo de trabalho Chlortest (2005), para

as idades de 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.15 e na Figura 4.18. Para cada amassadura e idade de ensaio, estão detalhados na Tabela 4.15, os valores médios da resistividade elétrica ($\rho_{m,id}$), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a diferença entre as misturas com CFRSU e a mistura de referência (Δ_{REF}). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.3.4.

Tabela 4.15 - Resistividade elétrica

Amassadura	$\rho_{m,28d}$ ($\Omega \cdot m$)	S ($\Omega \cdot m$)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)	$\rho_{m,91d}$ ($\Omega \cdot m$)	S ($\Omega \cdot m$)	C_{var} (%)	Δ_{REF} (%)
REF	79,78	8,40	10,53	0,00	229,58	15,78	6,88	0,00
B10CV20CF	37,51	4,15	11,06	-52,99	84,97	7,56	8,90	-62,99
B20CV10CF	46,71	1,64	3,51	-41,46	162,43	10,41	6,41	-29,25
B20CV40CF	56,92	6,55	11,50	-28,65	125,78	15,03	11,95	-45,21
B40CV20CF	76,07	4,03	5,30	-4,64	225,55	14,77	6,55	-1,75

Numa primeira análise aos resultados obtidos, verifica-se que o coeficiente de variação apresenta valores aceitáveis, não sofrendo grandes alterações entre as misturas e nas diferentes idades. Aos 28 dias, regista-se um C_{var} médio de 8,38%, e aos 91 dias de 8,14%, valores muito abaixo dos propostos pelo Chlortest (2005). Quanto aos desvios padrão, estes aumentam com a idade, passando de 4,95 $\Omega \cdot m$ aos 28 dias, para 12,71 $\Omega \cdot m$, contudo são valores razoáveis tendo em conta a ordem de grandeza dos resultados obtidos nas diferentes misturas.

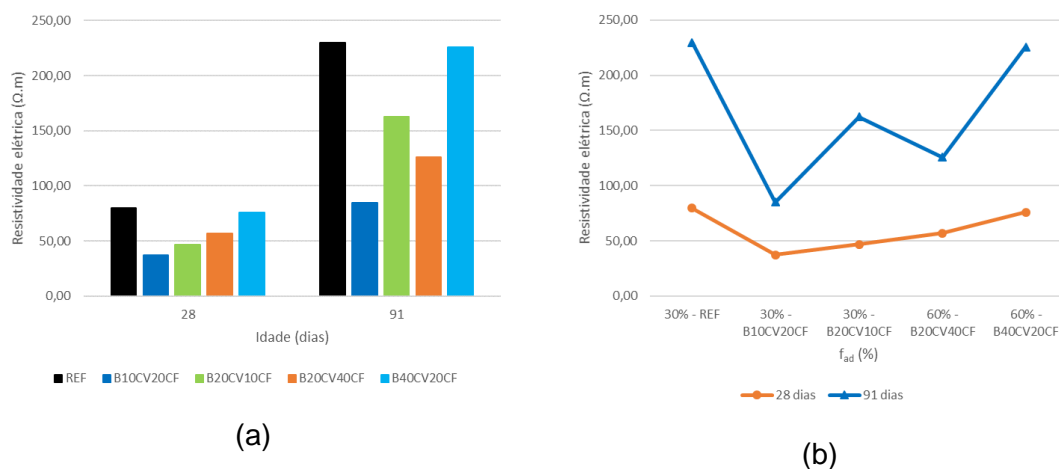


Figura 4.18 - Variação da resistividade elétrica com a idade (a) e com f_{ad} (b)

Observando a Figura 4.18, verifica-se que a resistividade elétrica aumenta com a idade em todas as misturas. É ainda possível constatar que, aos 28 dias, as misturas com incorporação de CFRSU apresentam uma tendência de aumento com a f_{ad} , contudo o patamar de $f_{ad}=30\%$ regista um decréscimo médio de 47%, relativamente à mistura de referência. Já a mistura B40CV20CF apresenta um resultado muito próximo da mistura REF para a mesma idade. Aos 91 dias, a tendência altera-se ligeiramente, com as misturas com maior percentagem de CV (B20CV10CF e B40CV20CF) a acompanharem o BAC de referência numa subida mais acentuada da resistividade elétrica. Quanto às misturas B10CV20CF e B20CV40CF, aos 91 dias, apresentam um decréscimo de 63% e 45%, respetivamente, em relação à mistura REF. Constata-se assim, que o valor de resistividade elétrica é bastante condicionado pela percentagem de CV presente na mistura.

Silva e Brito (2012) obtiveram a mesma tendência em misturas ternárias com CV e FC, tendo a CV influenciado positivamente a resistividade elétrica dos BAC estudados. Comparando diretamente os mesmos pares de substituição, verifica-se que os valores obtidos pelos autores são mais elevados que os registados no presente trabalho para todas as misturas. Conclui-se assim que a incorporação de CFRSU nas misturas ternárias, provoca um efeito mais negativo na resistividade elétrica do que a incorporação de FC.

4.2.2.5 Carbonatação

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à carbonatação, realizado segundo a especificação LNEC E 391 (1993), para as idades de 14, 21, 49, 70 e 91 dias, são apresentados na Tabela 4.16 e na Figura 4.19. Para cada amassadura e idade de ensaio estão detalhados, na Tabela 4.16, os valores médios da profundidade de carbonatação (d_{km}), o desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}), o coeficiente de carbonatação (K_c). Os dados individuais e os cálculos auxiliares relativos a este ensaio são apresentados no anexo A.3.5. A designação “menor que um” (<1), nas profundidades de carbonatação presentes nas tabelas, significa que para essas misturas e idades, não foi encontrada carbonatação passível de ser medida, sendo atribuído o valor mínimo de $1 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ao respetivo coeficiente.

Tabela 4.16 - Profundidades de carbonatação e respetivos coeficientes

Amassadura	14 dias			21 dias			49 dias			70 dias			91 dias			K_c (mm/ano ^{0,5})	R^2
	d_{km}	S	C_{var}	d_{km}	S	C_{var}	d_{km}	S	C_{var}	d_{km}	S	C_{var}	d_{km}	S	C_{var}		
	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)		
REF	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	1,00	-
B10CV20CF	2	0,28	13,35	3	0,64	22,53	3	0,42	13,60	5	1,40	31,13	5	1,45	30,06	9,44	0,97
B20CV10CF	3	0,43	16,28	3	0,69	23,56	5	0,79	17,18	6	0,74	12,15	6	1,36	21,49	13,06	0,99
B20CV40CF	17	0,50	3,02	16	0,55	3,36	20	0,50	2,51	41	7,07	17,38	39	0,43	1,12	79,24	0,90
B40CV20CF	20	0,88	4,45	18	0,92	5,17	22	2,85	12,93	37	7,55	20,58	49	0,58	1,19	87,14	0,90

Avaliando a variabilidade dos resultados obtidos, verifica-se que os coeficientes de variação são mais elevados nas misturas com $f_{ad}=30\%$, apresentando uma tendência de aumento com o avançar da idade de ensaio. Quanto aos desvios padrão, apresentam a mesma tendência de aumento com a idade, mas só até aos 70 dias, variando entre 0,28 mm e 7,55mm e com um valor médio de 1,50 mm.

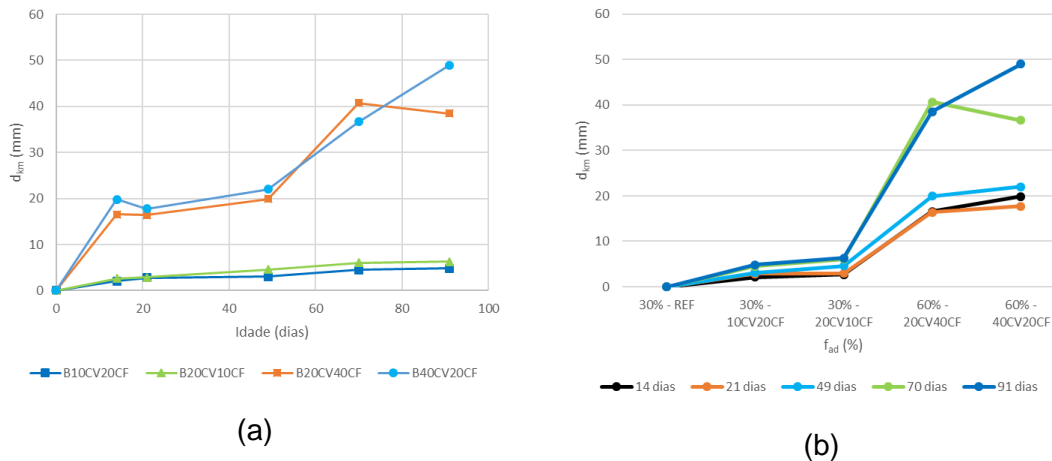


Figura 4.19 - Variação da profundidade de carbonatação com a idade (a) e com f_{ad} (b)

Pela análise da Figura 4.19, observa-se que a mistura de referência não apresentou qualquer efeito de carbonatação durante os 91 dias de ensaio. As restantes misturas demonstram uma tendência de aumento da profundidade de carbonatação com o período de exposição e com o aumento de f_{ad} . As misturas com incorporação de CFRSU e f_{ad} de 30%, apresentam um comportamento muito semelhante em todas as idades de exposição, enquanto que as misturas com f_{ad} de 60% registam valores de carbonatação muito mais elevados que as restantes, em todas as idades. Esta tendência de aumento da profundidade de carbonatação está relacionada com a relação a/c, que para as misturas com $f_{ad}=30\%$ é de 0,41 e para $f_{ad}=60\%$ aumenta para 0,72. De salientar ainda que a mistura B20CV40CF estabiliza os valores de carbonatação, dos

70 para os 91 dias, enquanto que o BAC B40CV20CF mantém uma tendência de subida no referido intervalo, atingindo praticamente a totalidade de carbonatação do provete aos 91 dias.

Silva e Brito (2015) verificam a mesma tendência de aumento da carbonatação com o aumento da relação a/c, no estudo de misturas ternárias com CV e FC. No entanto, as relações a/c registadas foram 0,36 ($f_{ad}=30\%$), 0,57 e 0,60 ($f_{ad}=60\%$), o que provocou uma menor profundidade de carbonatação relativamente aos mesmos pares de substituição deste trabalho.

A carbonatação do betão pode ser avaliada pelo coeficiente de carbonatação, que relaciona a profundidade de carbonatação com o período de ensaio, através da expressão $x=k\sqrt{t}$ ($x=kt^{1/n}$ com $n=2$). Na Figura 4.20, são apresentadas as relações entre a profundidade de carbonatação e a idade de ensaio para todas as misturas em estudo.

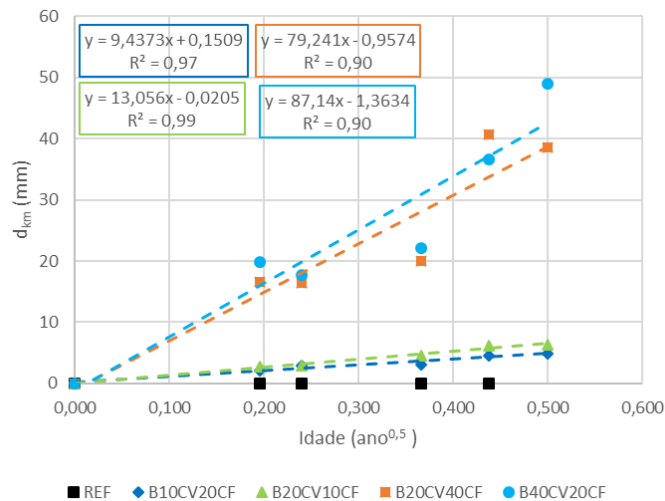


Figura 4.20 - Profundidade de carbonatação em função da \sqrt{t}

Avaliando a Figura 4.20, verifica-se que a referida expressão representa de forma adequada a variação da profundidade de carbonatação em função do tempo, registando coeficientes de correlação elevados para todas as misturas, com valores iguais ou superiores a 0,90. Contudo, para os mesmos patamares de substituição, as misturas com maior percentagem de CFSRU apresentam valores de K_c mais baixos do que as misturas com maior percentagem de CV.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da presente dissertação, que teve como principal objetivo estudar o efeito da incorporação de CFRSU em misturas de BAC com CV. São também indicadas propostas de desenvolvimento para trabalhos futuros.

O trabalho desenvolvido assentou numa campanha experimental, descrita no capítulo 3, que consistiu na produção de misturas ternárias de BAC com diferentes percentagens de substituição de cimento e na aferição das suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

Desse modo, expõem-se neste capítulo as conclusões mais relevantes obtidas da análise crítica aos ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

5.1 Estado fresco

No estado fresco, foram avaliados o tempo e o diâmetro de espalhamento, o tempo de escoamento no funil V e a capacidade de passagem na caixa L, de modo a cumprir os critérios definidos na NP EN 206-9 (2010) para os parâmetros de trabalhabilidade no BAC.

Foi possível verificar que todas as amassaduras cumpriram os requisitos, constatando-se que os BAC produzidos apresentaram fluidez, viscosidade e capacidade de passagem de acordo com o exigido.

5.2 Estado endurecido

No estado endurecido, foram avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade dos BAC produzidos.

As propriedades mecânicas estudadas designam-se resistência à compressão em cubos e em cilindros, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração e velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas.

No que diz respeito à resistência à compressão e à tração, concluiu-se que a incorporação de CFRSU afetou negativamente o desempenho destas propriedades, possivelmente devido à calcite verificada nas CFRSU e à presença de zinco na sua composição. O aumento da percentagem de CFRSU na mistura provocou uma diminuição da resistência mecânica, sendo a amassadura B20CV40CF a que obteve o pior desempenho (20,58 MPa em cubos e 8,79 MPa em cilindros, aos 91 dias). A degradação da zona de transição pasta-agregado verificada na rotura do ensaio de tração por compressão diametral, poderá estar relacionada com o aumento da percentagem de CFRSU e da relação a/c, o que aumentou a porosidade do betão, enfraquecendo-o.

Verificou-se que o módulo de elasticidade diminuiu consideravelmente com o aumento da percentagem de CFRSU no BAC e com o aumento da f_{ad} , possivelmente devido à expansão verificada nos provetes, justificada pela presença de alumínio nas CFRSU.

Quanto à retração, os valores apresentaram um incremento com o aumento da percentagem de CFRSU. Por outro lado, a mistura B40CV20CF obteve um valor de retração, aos 91 dias, mais baixo que o betão de referência, justificado principalmente pela influência do aumento de CV na mistura.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas é menor quanto maior a percentagem de CFRSU e a f_{ad} , no entanto, os valores obtidos enquadram-se num betão de boa qualidade de acordo com o IAEA (2002).

Quanto às propriedades de durabilidade, foram avaliadas a absorção de água por imersão e por capilaridade, a resistência à penetração de cloretos, a resistividade elétrica e a resistência à carbonatação.

Não se registou grande variação na absorção de água por imersão entre as misturas, apesar de ter aumentado ligeiramente com o aumento da razão a/c. Isto sugere que as CFRSU não afetaram a porosidade aberta.

Na absorção de água por capilaridade, os resultados demonstraram uma menor absorção para todas as misturas aos 91 dias, relativamente aos 28 dias, destacando-se

a mistura B10CV20CF com um decréscimo do coeficiente de absorção capilar de 76%. Este efeito pode estar relacionado com a combinação do efeito das CV com o atraso na hidratação do cimento devido ao zinco presente nas CFRSU, que preencheu os poros existentes mais tardiamente.

No que diz respeito à difusão de cloretos, a introdução de CFRSU afetou negativamente o BAC, aumentando o coeficiente de difusão de cloretos relativamente a REF. Este aumento estará relacionado com a degradação da qualidade da pasta com a adição de CFRSU, que permitiu a maior facilidade na penetração de cloretos. Contudo, as misturas com $f_{ad}=60\%$ apresentam, aos 91 dias, resultados mais favoráveis do que com $f_{ad}=30\%$.

A resistividade elétrica diminuiu consideravelmente nas misturas B10CV20CF e B20CV40CF relativamente ao BAC de referência. Este efeito pode ser justificado não só pelo aumento de CFRSU nestas misturas, mas sobretudo pela diminuição das CV. De facto, a amassadura com maior percentagem de CV (B40CV20CF) acompanha a evolução do BAC de referência, com valores bastante próximos entre si.

A resistência à carbonatação também registou uma diminuição com a incorporação de CFRSU, resultante da degradação da pasta e sobretudo do aumento da razão a/c. As misturas com $f_{ad}=60\%$ e a/c mais elevadas, registaram valores de profundidade muito mais elevados que as misturas com $f_{ad}=30\%$ e a/c mais baixas.

Por último, apresentam-se as seguintes conclusões gerais, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados:

- As propriedades físicas e químicas das CFRSU podem estar na origem da degradação das propriedades do betão, carecendo de análise mais aprofundada para confirmar as hipóteses referidas por outros autores;
- Apesar da degradação da generalidade das propriedades mecânicas do BAC verificada em todas as misturas com CFRSU, o patamar de $f_{ad}=30\%$ (B10CV20CF e B20CV10CF) poderá ser passível de obter melhorias com um tratamento adequado às CFRSU para eliminação de metais pesados;
- Quanto a durabilidade, os resultados obtidos nos diversos ensaios demonstraram alguma disparidade no comportamento dos BAC, provavelmente devido à influência das CFRSU na microestrutura do betão;
- De uma forma geral, os valores registados na absorção capilar são bons apesar da variação demonstrada pelas misturas com CFRSU;

relativamente à penetração de cloretos, os BAC com $f_{ad}=60\%$ apresentaram valores ligeiramente favoráveis quando comparados com os restantes betões com CFRSU; enquanto que para a carbonatação as misturas B10CV20CF e B20CV10CF apresentam-se muito mais vantajosas do que o patamar de $f_{ad}=60\%$.

5.3 Propostas de trabalhos futuros

A presente dissertação permitiu obter um maior conhecimento relativamente aos efeitos das CFRSU nas propriedades mecânicas e de durabilidade do BAC, nomeadamente na incorporação em misturas ternárias com CV. No entanto, é importante o desenvolvimento e aprofundamento da investigação com vista à compreensão de alguns fenómenos que afetaram as propriedades do betão. Assim, sugerem-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Análise química às CFRSU, com identificação dos elementos e compostos químicos mais frequentes;
- Análise granulométrica às CFRSU;
- Avaliação da atividade pozolânica das CFRSU através de ensaios alternativos;
- Testes de lixiviação às CFRSU e ao betão para perceber quais os metais pesados libertados;
- Trituração das CFRSU ainda húmidas;
- Lavagem das cinzas com hidróxido de sódio;
- Avaliação de BAC com novas percentagens de substituição até 30%;
- Avaliação da microestrutura do BAC em diversas idades de cura;
- Avaliação da viabilidade económica da produção de misturas ternárias de BAC com CFRSU;
- Avaliação da vida útil do BAC com CFRSU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amat, R. C., Ismail, K. N., & Noor, N. M. (2017). The effects of bottom ash from MSWI used as mineral additions in concrete. *MATEC Web of Conferences 97, 01053 (2017)*, 1053, 6. doi:10.1051/matecconf/20179701053.
- APA. (2017). Relatório de Avaliação PERSU 2020, 2016. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- Artigo 3.º do Decreto-Lei nº 73/2011 de 17 de Junho, Pub. L. No. Diário da República: 1.ª série N.º116, 1 (2011).
- Assié, S. (2004). *Durabilité des bétons autoplacants*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Balderas, A., Navarro, H., Flores-Velez, L. M., & Dominguez, O. (2001). Properties of portland cement pastes incorporating nanometer-sized franklinite particles obtained from electric-arc-furnace dust. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(3–12), 2909–2913. doi:10.1111/j.1151-2916.2001.tb01114.x.
- Barros, P. (2008). *Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas.
- Behfarnia, K., Keivan, A., & Keivan, A. (2013). The effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 14(4), 517–531.
- Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A. Q., & Collepari, M. (2004). MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1899–1906. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.001.

- Browne, R. D. (1991). Field investigations, site & laboratory tests, maintenance, repair and rehabilitation of concrete structures. Lisboa: CEEC. Citado por Silva (2013).
- Carminho, F. (2012). *Resistência do betão à compressão em cubos vs cilindros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Consultado em Setembro de 2017 em <http://run.unl.pt/handle/10362/7853>.
- Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hjelmar, O., Kosson, D. S., Sawell, S. E., Vehlow, J., ... Hartlén, J. (1997). *Municipal solid waste incinerator residues* (Vol. 67). Amsterdam: Elsevier.
- Cheng, A. (2012). Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. *Materials and Design*, 36, 859–864. doi:10.1016/j.matdes.2011.05.003.
- Chlortest. (2005). Guideline for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress, CHLORTEST - EU funded research project , document prepared by Tang Luping. Borås, Sweden: Testing and Research Institute.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Sorlini, S., & Bruggi, M. (2017). Evaluation of concrete production with solid residues obtained from fluidized-bed incineration of MSW-derived solid recovered fuel (SRF). *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(4), 1374–1383. doi:10.1007/s10163-016-0523-y.
- DA 58. (2015). Documento de aplicação, AEIRU, Agregados artificiais de escórias de incineração de resíduos urbanos para pavimentos rodoviários. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Dixit, M., Jain, A., Kumawat, D., Swami, A., & Sharma, M. (2016). Replacement of fine aggregate in concrete with municipal solid waste bottom ash from incinerator. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 3(7), 74–78.
- Donatello, S., Tyrer, M., & Cheeseman, C. R. (2010). Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 32,(2,), 121–127.
- Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288.
- Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., & Lehman, D. (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 161–168.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste. A global review of solid waste management. *Urban Development Series Knowledge Papers*, 281(19), 44

doi:10.1111/febs.13058.

- IAEA. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. *Training Course Series*. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Jardim, H. (2015). *Caracterização de escórias de incineração de resíduos urbanos e recuperação do vidro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- JSCE. (1998). Recommendation for self-compacting concrete. In *Proceedings of the International Workshop on Self-compacting Concrete* (pp. 417–437). Kochi, Japan.
- Jurič, B., Hanžič, L., Ilić, R., & Samec, N. (2006). Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management*, 26(12), 1436–1442. doi:10.1016/j.wasman.2005.10.016.
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775–792.
- Li, X.-G., Lv, Y., Ma, B.-G., Chen, Q.-B., Yin, X.-B., & Jian, S.-W. (2012). Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 32, 96–100. doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.038.
- Lin, K. L. (2005). The influence of municipal solid waste incinerator fly ash slag blended in cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 979–986. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.011.
- Lin, K. L., & Lin, D. F. (2006). Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement. *Cement and Concrete Composites*, 28(9), 817–823. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.03.003.
- Liu, M. (2010). Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1245–1252.
- LNEC E 391. (1993). Betões, determinação da resistência à carbonatação. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC E 393. (1993). Betões, determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC E 394. (1993). Betões, determinação da absorção de água por imersão. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC E 397. (1993). Betões, determinação do módulo de elasticidade em compressão. Lisboa:

Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- LNEC E 398. (1993). Betões, determinação da retracção e da expansão. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC E 463. (2004). Betões, determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Lynn, C. J., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S. (2016). Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 504–517.
- Madalena, L. M. (2013). Influência do teor em pozolana na reatividade e nas características mecânicas de argamassas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia.
- Makishima, O., Tanaka, H., Itoh, Y., Komada, K., & Satoh, F. (2001). Evaluation of mechanical properties and durability of super quality concrete. In *Second International Symposium on Self-Compacting Concrete* (pp. 377–386).
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. doi:10.1016/j.cemconres.2006.10.013.
- Naik, T. R., Kumar, R., Ramme, B. W., & Canpolat, F. (2012). Development of high-strength, economical self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 463–469.
- Nepomuceno, M. (2005). *Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Harlow: Pearson. Citado por Silva (2013).
- NP EN 1008. (2003). Água de massadura para betão, especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12350-10. (2010). ensaios do betão fresco, Parte 10: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento na caixa L. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12350-8. (2010). ensaios do betão no estado fresco, Parte 8: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12350-9. (2010). ensaios do betão fresco, Parte 9: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento no funil V. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).

- NP EN 12390-3. (2009). Ensaio do Betão Endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12390-6. (2011). Ensaio do betão endurecido, resistência à tracção por compressão de provetes. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12504-4. (2007). Ensaio de Betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12620. (2010). Agregados para betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 197-1. (2012). Cimento, Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 1992-1-1. (2010). Eurocódigo 2- Projecto de estruturas de betão, parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 206-1. (2007). Betão Parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade, desempenho, produção e conformidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 206-9. (2010). Betão Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC). Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 450-1. (2012). Cinzas volantes para betão, Parte 1: definição, especificações e critérios de conformidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 934-2. (2012). Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- Okamura, H., K. Ozawa, & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete Journal*, 1(1), 3–17.
- Ouchi, M. (1998). History of development and applications of self-compacting concrete in Japan. In *International Workshop on self-compacting Concrete* (pp. 1–10).
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J., & Chababbet, M. (1997). Use of incinerator bottom ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 1-5-8846–7.
- Pokorný, P., Dobiáš, D., & Čítek, D. (2016). The influence of corrosion of zinc powder on mechanical properties of concrete. *Ceramics-Silikáty*, 60(3), 195–199. doi:10.13168/cs.2016.0029.
- Portaria n.º 187-A/2014 de 17 de setembro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, Pub. L. No. Diário da República: I série, N.º 179 (2014).

- Puna, J. F. B., & Baptista, B. dos S. (2008). A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos - perspectiva ambiental e económico-energética. *Quim. Nova*, 31(3), 645–654.
- Şahmaran, M., Yaman, İ. Ö., & Tokyay, M. (2009). Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 99–106.
- Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*, 32(3), 1501–1507.
- Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y. (2012). Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 29, 73–81.
- Silva, P. (2013). *Avaliação da durabilidade de betões autocompactáveis (BAC)*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Silva, P., & Brito, J. de. (2012). Resistividade eléctrica e permeabilidade de BAC com incorporação de cinzas volantes e filler calcário. In *4º Congresso Nacional Construção 2012* (pp. 1–12). Coimbra.
- Silva, P., & Brito, J. de. (2015). Propriedades mecânicas e retração de BAC produzido em misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e filler calcário. In *IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável - BAC2015*. Porto.
- Silva, P. R., & Brito, J. de. (2009). Betão auto-compactável (BAC) - estado actual do conhecimento. *Engenharia Civil- Revista UM*, (35), 13–32.
- Silva, P. R. da, & Brito, J. de. (2015). Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, 86(7), 101–112. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110.
- Siong, G. K., & Cheong, C. P. (2001). Incineration bottom ash as raw materials for concrete products, 1–5.
- Souza, C. A. C. De, Machado, A. T., Lima, L. R. P. D. A., & Cardoso, R. J. C. (2010). Stabilization of electric-arc furnace dust in concrete. *Materials Research*, 13(4), 513–519.
- Valorsul. (2017). Relatório & Contas 2016. Lisboa: Valorsul, S.A.
- Van Dr Wegen, G., Hofstra, U., & Speerstra, J. (2013). Upgraded MSWI bottom ash as aggregate in concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 4(4), 737–743.

Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B. (2014). Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 46, 99–108. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007.

Zhang, T., & Zhao, Z. (2014). Optimal use of MSWI bottom ash in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 173-182-14-73-4.

ANEXOS

A.1 Composição das misturas

Identificação do betão:		70% C + 30% CV	10% CV + 20% CFRSU	20% CV + 10% CFRSU	20% CV + 40% CFRSU	40% CV + 20% CFRSU	
Parâmetros da composição	D_{max} [mm] =	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	
	MN =	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	
	V_m/V_g =	2,275	2,275	2,275	2,275	2,275	
	V_v [m ³] =	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	
	Mistura de agregados: Brita ₁ =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	Brita ₂ =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Cálculos auxiliares	δ_p [kg/m ³] =	2888,00	2928,00	2908,00	2716,00	2676,00	
	V_{sp}/V_p [m ³ /m ³] =	0,020243	0,024628	0,024460	0,022845	0,022508	
	V_g [m ³ /m ³] =	0,296183	0,296183	0,296183	0,296183	0,296183	
	V_m [m ³ /m ³] =	0,673817	0,673817	0,673817	0,673817	0,673817	
	V_p [m ³ /m ³] =	0,219467	0,212251	0,212262	0,212370	0,212392	
	V_u [m ³ /m ³] =	0,175574	0,191026	0,191036	0,191133	0,191153	
	V_{sp} [m ³ /m ³] =	0,004443	0,005227	0,005192	0,004852	0,004781	
	V_s [m ³ /m ³] =	0,274334	0,265313	0,265327	0,265462	0,265491	
	V_g/V_m [m ³ /m ³] =	0,407134	0,393747	0,393768	0,393968	0,394010	
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg] =	482,39	466,53	466,55	266,74	266,76
		Adição CV [kg] =	151,43	48,82	97,64	97,69	195,40
CRSU [kg] =		0,00	106,13	53,07	212,37	106,20	
S _p [Litros] =		4,44	5,23	5,19	4,85	4,78	
S _p [kg] =		4,75	5,59	5,56	5,19	5,12	
Água [Litros] =		175,57	191,03	191,04	191,13	191,15	
Areia ₀₂ [kg] =		353,89	342,25	342,27	342,45	342,48	
Areia ₀₄ [kg] =		349,78	338,27	338,29	338,46	338,50	
Agregados Finos _{Total} [kg] =		703,67	680,53	680,56	680,91	680,98	
Brita ₁ [kg] =		383,56	383,56	383,56	383,56	383,56	
Brita ₂ [kg] =		390,96	390,96	390,96	390,96	390,96	
Volume Real		Cimento [m ³] =	0,154	0,149	0,149	0,085	0,085
		Adição CV [m ³] =	0,066	0,021	0,042	0,042	0,085
		CRSU [m ³] =	0,000	0,042	0,021	0,085	0,042
		S _p [m ³] =	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005
		Água [m ³] =	0,176	0,191	0,191	0,191	0,191
		Areia ₀₂ [m ³] =	0,137	0,133	0,133	0,133	0,133
		Areia ₀₄ [m ³] =	0,137	0,133	0,133	0,133	0,133
		Brita ₁ [m ³] =	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148
		Brita ₂ [m ³] =	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148
		Total =	1	1	1	1	1
		W/C =	0,364	0,409	0,409	0,717	0,717
Quantidades para:		56 [Litros]	Cimento [kg] =	27,01	26,13	26,13	14,94
	Adição CV [kg] =	8,48	2,73	5,47	5,47	10,94	
	CRSU [kg] =	0,00	5,94	2,97	11,89	5,95	
	S _p [Litros] =	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	
	S _p [g] =	266,2	313,2	311,1	290,7	286,5	
	Água [Litros] =	10,64	11,49	11,49	11,50	11,50	
	Areia ₀₂ [kg] =	19,70	19,05	19,05	19,06	19,06	
	Areia ₀₄ [kg] =	19,37	18,74	18,74	18,75	18,75	
	Brita ₁ [kg] =	21,17	21,17	21,17	21,17	21,17	
	Brita ₂ [kg] =	21,73	21,73	21,73	21,73	21,73	

A.2 Resultados dos ensaios no BAC no estado endurecido, comportamento mecânico

A.2.1 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de compressão				
Amassadura	Provete	Idade (dias)	L (mm)	H (mm)	Secção (cm ²)	Carga (kN)	f _{c,c}	f _{cm,c} (MPa)	S	C _{var} (%)
REF	1	7	150	150	225	1215,40	54,02	50,27	5,30	10,55
	2		150	150	225	1046,70	46,52			
	3	28	150	150	225	1327,10	58,98	57,60	4,23	7,34
	4		150	150	225	1189,20	52,85			
	5		150	150	225	1371,80	60,97			
	6	91	150	150	225	1743,00	77,47	80,11	2,95	3,68
	7		150	150	225	1874,00	83,29			
	8		150	150	225	1790,60	79,58			
B10CV20CF	1	7	150	150	225	705,22	31,34	27,59	3,61	13,09
	2		150	150	225	614,09	27,29			
	3		150	150	225	543,09	24,14			
	4	28	150	150	225	719,60	31,98	34,03	2,71	7,97
	5		150	150	225	742,70	33,01			
	6		150	150	225	834,90	37,11			
	7	91	150	150	225	877,80	39,01	39,56	0,51	1,29
	8		150	150	225	900,70	40,03			
	9		150	150	225	891,50	39,62			
B20CV10CF	1	7	150	150	225	533,26	23,70	22,97	2,05	8,90
	2		150	150	225	552,34	24,55			
	3		150	150	225	464,83	20,66			
	4	28	150	150	225	746,80	33,19	31,72	1,67	5,25
	5		150	150	225	721,50	32,07			
	6		150	150	225	673,00	29,91			
	7	91	150	150	225	866,40	38,51	39,27	0,77	1,96
	8		150	150	225	883,10	39,25			
	9		150	150	225	901,10	40,05			
B20CV40CF	1	7	150	150	225	273,09	12,14	11,23	1,59	14,17
	2		150	150	225	211,39	9,40			
	3		150	150	225	273,75	12,17			
	4	28	150	150	225	376,20	16,72	17,49	0,75	4,29
	5		150	150	225	394,40	17,53			
	6		150	150	225	409,90	18,22			
	7	91	150	150	225	447,50	19,89	20,58	2,28	11,07
	8		150	150	225	421,40	18,73			
	9		150	150	225	520,30	23,12			
B40CV20CF	1	7	150	150	225	262,87	11,68	12,35	0,95	7,67
	2		150	150	225	293,00	13,02			
	3	28	150	150	225	445,50	19,80	19,67	0,57	2,91
	4		150	150	225	428,60	19,05			
	5		150	150	225	453,90	20,17			
	6	91	150	150	225	581,60	25,85	23,10	3,01	13,02
	7		150	150	225	530,10	23,56			
	8		150	150	225	447,50	19,89			

A.2.2 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CILINDROS

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de compressão				
Amassadura	Provete	Idade (dias)	L (mm)	ϕ (mm)	Secção (cm ²)	Carga (kN)	$f_{c,cil}$	$f_{cm,cil}$ (MPa)	S	C_{var} (%)
REF	1	28	300	150	176,71	822,51	46,54	55,38	12,49	22,56
	2		300	150	176,71	1134,68	64,21			
	3	91	300	150	176,71	1313,86	74,35	65,58	12,41	18,92
	4		300	150	176,71	1003,80	56,80			
B10CV20CF	1	28	300	150	176,71	237,13	13,42	14,43	1,43	9,94
	2		300	150	176,71	272,98	15,45			
	3	91	300	150	176,71	313,00	17,71	16,73	1,39	8,32
	4		300	150	176,71	278,20	15,74			
B20CV10CF	1	28	300	150	176,71	412,67	23,35	24,58	1,74	7,07
	2		300	150	176,71	456,08	25,81			
	3	91	300	150	176,71	433,71	24,54	26,34	2,53	9,62
	4		300	150	176,71	497,05	28,13			
B20CV40CF	1	28	300	150	176,71	110,32	6,24	6,16	0,11	1,86
	2		300	150	176,71	107,46	6,08			
	3	91	300	150	176,71	146,56	8,29	8,79	0,70	7,94
	4		300	150	176,71	163,99	9,28			
B40CV20CF	1	28	300	150	176,71	161,57	9,14	8,64	0,71	8,20
	2		300	150	176,71	143,86	8,14			
	3	91	300	150	176,71	155,08	8,78	10,01	1,75	17,47
	4		300	150	176,71	198,79	11,25			

A.2.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de tração por compressão diametral				
Amassadura	Provete	Idade (dias)	L (mm)	ϕ	Secção (cm ²)	Carga (kN)	$f_{ct,sp}$	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	S	C_{var} (%)
REF	1	28	300	150	176,71	354,60	5,02	5,03	0,02	0,48
	2		300	150	176,71	357,00	5,05			
	3	91	300	150	176,71	349,90	4,95	4,88	0,11	2,18
	4		300	150	176,71	339,30	4,80			
B10CV20CF	1	28	300	150	176,71	206,20	2,92	3,12	0,29	9,17
	2		300	150	176,71	234,80	3,32			
	3	91	300	150	176,71	250,10	3,54	3,44	0,14	4,01
	4		300	150	176,71	236,30	3,34			
B20CV10CF	1	28	300	150	176,71	226,30	3,20	2,79	0,58	20,66
	2		300	150	176,71	168,60	2,39			
	3	91	300	150	176,71	277,50	3,93	3,80	0,17	4,50
	4		300	150	176,71	260,40	3,68			
B20CV40CF	1	28	300	150	176,71	125,90	1,78	1,80	0,02	1,11
	2		300	150	176,71	127,90	1,81			
	3	91	300	150	176,71	165,60	2,34	2,31	0,04	1,90
	4		300	150	176,71	161,20	2,28			
B40CV20CF	1	28	300	150	176,71	166,70	2,36	2,25	0,16	6,94
	2		300	150	176,71	151,10	2,14			
	3	91	300	150	176,71	207,80	2,94	2,85	0,13	4,49
	4		300	150	176,71	195,00	2,76			

A.2.4 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Identificação			Dimensões do provete		Módulo de elasticidade secante			
Amassadura	Provete	Idade (dias)	L (mm)	ϕ	E_c	E_{cm} (GPa)	S	C_{var} (%)
REF	1	28	300	150	42,10	45,42	4,70	10,34
	2		300	150	48,74			
	3	91	300	150	40,87	41,56	0,98	2,35
	4		300	150	42,25			
B10CV20CF	1	28	300	150	18,71	23,33	6,54	28,02
	2		300	150	27,96			
	3	91	300	150	20,22	19,95	0,38	1,91
	4		300	150	19,68			
B20CV10CF	1	28	300	150	28,15	28,31	0,23	0,82
	2		300	150	28,48			
	3	91	300	150	24,68	24,93	0,35	1,42
	4		300	150	25,18			
B20CV40CF	1	28	300	150	12,28	14,61	3,30	22,56
	2		300	150	16,94			
	3	91	300	150	15,23	16,34	1,57	9,61
	4		300	150	17,45			
B40CV20CF	1	28	300	150	14,50	12,62	2,66	21,08
	2		300	150	10,74			
	3	91	300	150	17,60	17,52	0,11	0,65
	4		300	150	17,44			

A.2.5 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RETRAÇÃO

Idade	REF			B10CV20CF			B20CV10CF			B20CV40CF			B40CV20CF		
	Extensão da retração ϵ_{cs}	Ta	HR	Extensão da retração ϵ_{cs}	Ta	HR	Extensão da retração ϵ_{cs}	Ta	HR	Extensão da retração ϵ_{cs}	Ta	HR	Extensão da retração ϵ_{cs}	Ta	HR
(dias)	($\mu\text{m/m}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)
1	0	21,1	64,3	0	21,1	64,4	0	21,1	64,4	0	22,6	71,2	0	21,1	64,4
2	-52	21,1	64,3	-29	21,1	64,4	-110	21,1	64,4	-11	22,6	70,4	3	21,1	65,3
3	-28	21,1	64,3	-80	21,1	65,3	-130	21,1	65,3	-22	22,7	69,5	5	21,4	67,4
4	-50	21,1	64,3	-97	21,4	67,4	-137	21,4	67,4	-57	23,2	70,3	7	21,7	69,5
5	-70	21,1	64,3	-114	21,7	69,5	-144	21,7	69,5	-92	23,9	68,2	10	22,0	70,3
6	-93	21,1	64,3	-130	22,0	70,3	-150	22,0	70,3	-126	24,4	64,4	-5	22,3	70,5
7	-109	21,1	64,3	-148	22,3	70,5	-166	22,3	70,5	-133	24,8	69,4	-20	22,6	71,2
8	-129	21,1	64,5	-165	22,6	71,2	-181	22,6	71,2	-188	24,9	70,7	-24	22,6	70,4
9	-138	21,1	64,9	-179	22,6	70,4	-204	22,6	70,4	-204	24,4	64,6	-28	22,7	69,5
10	-150	21,1	65,3	-193	22,7	69,5	-226	22,7	69,5	-234	24,2	62,2	-48	23,2	70,3
11	-177	21,1	65,3	-214	23,2	70,3	-248	23,2	70,3	-259	23,9	62,7	-68	23,9	68,2
12	-185	21,4	67,4	-235	23,9	68,2	-269	23,9	68,2	-284	23,9	63,4	-87	24,4	64,4
13	-197	21,7	69,5	-257	24,4	64,4	-290	24,4	64,4	-308	23,7	64	-100	24,8	69,4
14	-204	22,0	70,3	-262	24,8	69,4	-364	24,8	69,4	-382	23,8	63,8	-150	24,9	70,7
21	-292	24,4	64,4	-377	23,8	63,6	-437	23,8	63,6	-474	23,2	50,8	-307	22,6	54,2
28	-361	23,7	64	-473	23,4	58,4	-473	23,4	58,4	-563	22,6	57,9	-326	23,2	62,9
35	-409	23,2	50,8	-503	22,6	57,9	-509	22,6	57,9	-614	23,6	67,1	-353	22,6	57,9
42	-420	22,6	57,9	-523	23,6	67,1	-546	23,6	67,1	-662	23,3	61,1	-372	23,6	67,1
49	-423	23,6	67,1	-553	23,3	61,1	-603	23,3	61,1	-684	23,3	61,1	-398	23,3	61,1
56	-450	23,3	61,1	-571	23,3	61,1	-613	23,3	61,1	-706	23,3	67,1	-406	23,3	61,1
63	-453	23,3	61,1	-589	23,3	67,1	-623	23,3	67,1	-729	23,3	67,1	-414	23,3	67,1
70	-457	23,3	67,1	-607	23,3	67,1	-632	23,3	67,1	-748	23,1	60,5	-421	23,3	67,1
77	-459	23,3	67,1	-608	23,1	60,5	-643	23,1	60,5	-766	23,6	68,8	-444	23,1	60,5
84	-477	23,1	60,5	-610	23,6	68,8	-653	23,6	68,8	-785	23,2	58,3	-448	23,6	68,8
91	-495	23,6	68,8	-654	23,2	58,3	-674	23,2	58,3	-804	22,5	64,3	-452	23,2	58,3

A.2.6 RESULTADOS OBTIDOS NO DE ULTRA-SONS

Amassadura	Identificação		Tempo de Transmissão	Distância	Velocidade de Propagação			
	Provete	Idade (dias)	t_{usm} (ms)	L (mm)	$V_{us,c}$ (m/s)	$V_{usm,c}$ (m/s)	S (m/s)	C_{var} (%)
REF	1	7	31,50	150	4761,90	4710,14	73,20	1,55
	2		32,20	150	4658,39			
	3	28	32,20	150	4658,39	4692,64	41,89	0,89
	4		32,05	150	4680,19			
	5		31,65	150	4739,34			
	6	91	30,50	150	4918,03	4918,11	24,19	0,49
	7		30,65	150	4893,96			
	8		30,35	150	4942,34			
B10CV20CF	1	7	35,55	150	4219,41	4177,09	128,99	3,09
	2		35,05	150	4279,60			
	3		37,20	150	4032,26			
	4	28	36,50	150	4109,59	4151,53	38,13	0,92
	5		36,05	150	4160,89			
	6		35,85	150	4184,10			
	7	91	36,15	150	4149,38	4204,14	56,03	1,33
	8		35,70	150	4201,68			
	9		35,20	150	4261,36			
B20CV10CF	1	7	37,50	150	4000,00	3998,53	111,80	2,80
	2		36,50	150	4109,59			
	3		38,60	150	3886,01			
	4	28	37,20	150	4032,26	4065,78	67,65	1,66
	5		36,20	150	4143,65			
	6		37,30	150	4021,45			
	7	91	36,30	150	4132,23	4159,06	23,95	0,58
	8		36,00	150	4166,67			
	9		35,90	150	4178,27			
B20CV40CF	1	7	39,05	150	3841,23	3672,03	181,53	4,94
	2		43,10	150	3480,28			
	3		40,60	150	3694,58			
	4	28	40,65	150	3690,04	3755,84	80,89	2,15
	5		40,20	150	3731,34			
	6		39,00	150	3846,15			
	7	91	41,85	150	3584,23	3644,43	62,11	1,70
	8		41,20	150	3640,78			
	9		40,45	150	3708,28			
B40CV20CF	1	7	39,65	150	3783,10	3810,30	95,50	2,51
	2		38,30	150	3916,45			
	3		40,20	150	3731,34			
	4	28	39,10	150	3836,32	3812,76	117,26	3,08
	5		40,70	150	3685,50			
	6		38,30	150	3916,45			
	7	91	40,55	150	3699,14	3740,96	41,98	1,12
	8		39,65	150	3783,10			
	9		40,10	150	3740,65			

A.3 Resultados dos ensaios no BAC no estado endurecido, durabilidade

A.3.1 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Amassadura	Identificação		Dimensões do provete		Massa do provete			Absorção Água por Imersão			
	Provete	Idade (dias)	L (mm)	H (mm)	Saturado Hidrostática		Seco	A _i	A _m	S (%)	C _{var}
					m ₁	m ₂	m ₃				
REF	1	28	100	100	2297	1250	2162	12,89	13,50	0,67	4,95
	2		100	100	2287	1239	2138	14,22			
	3		100	100	2305	1260	2165	13,40			
	4	91	100	100	2312	1262	2208	9,90	10,05	0,14	1,42
	5		100	100	2301	1251	2194	10,19			
	6		100	100	2312	1257	2206	10,05			
B10CV20CF	1	28	100	100	2195	1132	2053	13,36	13,87	0,45	3,28
	2		100	100	2097	1028	1945	14,22			
	3		100	100	2212	1144	2062	14,04			
	4	91	100	100	2131	1065	1980	14,17	13,76	0,37	2,67
	5		100	100	2130	1068	1985	13,65			
	6		100	100	2197	1134	2054	13,45			
B20CV10CF	1	28	100	100	2150	1095	2008	13,46	13,04	0,55	4,22
	2		100	100	2075	1018	1935	13,25			
	3		100	100	2180	1117	2048	12,42			
	4	91	100	100	2184	1127	2009	16,56	13,26	2,86	21,59
	5		100	100	2198	1146	2074	11,79			
	6		100	100	2210	1160	2090	11,43			
B20CV40CF	1	28	100	100	2070	1002	1905	15,45	14,76	1,29	8,77
	2		100	100	2011	944	1845	15,56			
	3		100	100	2175	1112	2034	13,26			
	4	91	100	100	2151	1083	1977	16,29	17,24	2,29	13,26
	5		100	100	2176	1111	2010	15,59			
	6		100	100	1962	884	1748	19,85			
B40CV20CF	1	28	100	100	2121	1064	1982	13,15	14,26	1,02	7,12
	2		100	100	2037	967	1875	15,14			
	3		100	100	2074	1005	1919	14,50			
	4	91	100	100	2082	1011	1925	14,66	13,91	0,65	4,64
	5		100	100	2139	1074	1995	13,52			
	6		100	100	2142	1073	1997	13,56			

A.3.2 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Amassadura	Identificação		Dimensões		Absorção t ₃ horas					Absorção t ₆ horas					Absorção t ₂₄ horas					Absorção t ₇₂ horas					Coeficiente de Absorção	
	Provete	Idade (dias)	φ (mm)	Secção (m ²)	M _i (g)	Abs (Kg/m ²)	Abs _m	S	C _{var} (%)	M _i (g)	Abs (Kg/m ²)	Abs _m	S	C _{var} (%)	M _i (g)	Abs (Kg/m ²)	Abs _m	S	C _{var} (%)	M _i (g)	Abs (Kg/m ²)	Abs _m	S	C _{var} (%)	Coef _{abs} (mm/min ^{0,5})	R ²
REF	1	28	150	0,01767	14	1,75				16	2,21				20	3,06				25	3,40				0,095	0,98
	2				21	1,27	1,43	0,28	19,37	23	1,58	1,83	0,33	18,12	29	2,15	2,57	0,46	17,83	38	2,55	2,96	0,42	14,34		
	3				15	1,27				16	1,70				22	2,49				28	2,94					
	4	91	150	0,01767	14	0,79				16	0,91				20	1,13				25	1,41				0,052	0,86
	5				21	1,16	0,93	0,20	21,21	23	1,30	1,04	0,23	22,04	29	1,64	1,34	0,27	19,97	38	2,15	1,72	0,39	22,44		
	6				15	0,85				16	0,91				22	1,24				28	1,58					
B10CV20CF	1	28	150	0,01767	4	1,47				5	1,92				9	2,72				14	3,28				0,099	0,97
	2				9	1,44	1,49	0,06	3,95	10	1,87	1,94	0,09	4,45	15	2,60	2,72	0,11	4,17	22	3,11	3,26	0,14	4,36		
	3				9	1,56				10	2,04				15	2,83				21	3,40					
	4	91	150	0,01767	4	0,20				5	0,28				9	0,51				14	0,79				0,023	0,9
	5				9	0,51	0,40	0,17	43,45	10	0,57	0,47	0,16	34,64	15	0,85	0,74	0,20	26,65	22	1,24	1,08	0,25	22,94		
	6				9	0,48				10	0,57				15	0,85				21	1,19					
B20CV10CF	1	28	150	0,01767	18	1,19				21	1,47				29	2,04				36	2,38				0,081	0,95
	2				20	1,27	1,27	0,08	6,67	23	1,64	1,60	0,12	7,35	31	2,32	2,23	0,16	7,34	39	2,72	2,60	0,20	7,53		
	3				17	1,36				20	1,70				26	2,32				34	2,72					
	4	91	150	0,01767	18	0,99				21	1,19				29	1,64				36	2,04				0,061	0,93
	5				20	1,10	1,01	0,09	8,57	23	1,30	1,21	0,09	7,16	31	1,75	1,62	0,14	8,78	39	2,21	2,06	0,14	6,93		
	6				17	0,93				20	1,13				26	1,47				34	1,92					
B20CV40CF	1	28	150	0,01767	15	1,36				17	1,70				24	2,38				32	3,00				0,091	0,95
	2				13	1,33	1,45	0,22	14,88	15	1,64	1,81	0,28	15,63	22	2,32	2,81	0,38	13,41	29	2,94	3,73	0,40	10,61		
	3				13	1,33				15	1,70				22	2,43				29	3,06					
	4	91	150	0,01767	15	0,85				17	0,96				24	1,36				32	1,81				0,077	0,92
	5				13	0,74	1,28	0,30	23,59	15	0,85	1,53	0,32	20,62	22	1,24	2,19	0,34	15,59	29	1,64	2,83	0,40	14,00		
	6				13	0,74				15	0,85				22	1,24				29	1,64					
B40CV20CF	1	28	150	0,01767	22	1,64				26	2,09				38	3,23				50	4,19				0,084	0,95
	2				18	1,22	1,34	0,02	1,22	22	1,53	1,68	0,03	1,95	33	2,49	2,38	0,06	2,38	43	3,45	3,00	0,06	1,89		
	3				29	1,50				33	1,81				45	2,72				57	3,57					
	4	91	150	0,01767	22	1,22				26	1,47				38	2,15				50	2,83				0,043	0,86
	5				18	1,02	0,77	0,07	8,45	22	1,24	0,89	0,07	7,37	33	1,87	1,28	0,07	5,09	43	2,43	1,70	0,10	5,77		
	6				29	1,61				33	1,87				45	2,55				57	3,23					

A.3.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Amassadura	Identificação		Condições de ensaio				Profundidade de penetração (mm)							Coeficiente de difusão ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)					
	Proveite	Idade (dias)	L_{proveite} (mm)	Voltagem aplicada (V)	Duração do Ensaio (horas)	Temperatura média (°C)	x_{d1}	x_{d2}	x_{d3}	x_{d4}	x_{d5}	x_{d6}	x_{d7}	$x_{\text{médio (face)}}$	$x_{\text{médio (proveite)}}$	$D_{\text{médio (proveite)}}$	$D_{\text{médio (amassadura)}}$	S	C_{var} (%)
REF	1 face 1 face 2	28	53	30	24	24,5	9	14	16	15	13	12	10	12,71	12,86	6,07			
	10						11	19	10	13	12	16	13,00						
	11						8	8	6	10	8	12	9,00						
	2 face 1 face 2	28	51	30	24	24,5	10	15	11	12	9	7	8	10,29	9,64	4,28	5,36	0,95	17,81
	10						17	17	10	11	14	17	13,71						
	20						12	14	13	8	8	11	12,29						
3 face 1 face 2	28	49	30	24	24,5	10	17	17	10	11	14	17	13,71	13,00	5,72				
20						12	14	13	8	8	11	12,29							
5 face 1 face 2						91	49	30	24	24,5	5	3	2						12
4	2	3	4	10	9						3	5,00							
4	6	9	15	7	8						9	8,29							
5 face 1 face 2	91	48	30	24	24,5	8	9	7	7	7	8	5	7,29	7,79	3,19	2,84	0,46	16,18	
8						9	7	7	7	8	5	7,29							
6 face 1 face 2						91	49	30	24	24,5	6	7	3						3
6	10	9	11	10	11						10	9,57							
16 face 1 face 2	28	47	25	24	22,8						16	19	21	25	25	30	22	22,57	23,79
19						18	24	23	31	30	30	25,00							
21						24	21	26	30	31	28	25,86							
2 face 1 face 2	28	49	25	24	22,8	19	27	34	31	18	22	23	24,86	25,36	14,02	12,52	1,55	12,38	
19						21	25	23	26	24	22	22,86							
19						22	24	20	21	25	24	22,14							
3 face 1 face 2	28	43	25	24	22,8	16	11	19	13	18	34	34	20,71	18,71	8,26				
15						12	11	13	14	26	26	16,71							
16						16	17	15	20	22	32	19,71							
4 face 1 face 2	91	45	30	24	22,0	16	14	15	18	20	28	33	20,57	20,14	8,41	8,56	0,40	4,72	
16						14	15	18	20	28	33	20,57							
22						17	12	22	19	22	23	19,57							
5 face 1 face 2	91	51	30	24	22,0	16	16	13	17	16	26	29	19,00	19,29	9,02				
16						16	13	17	16	26	29	19,00							
16						16	13	17	16	26	29	19,00							
6 face 1 face 2	91	51	30	24	22,0	17	15	19	29	17	14	15	18,00	19,29	10,65				
18						18	18	29	26	15	20	20,57							
26						24	23	24	20	19	20	22,29							
1 face 1 face 2	28	49	25	24	22,8	27	26	24	26	18	19	25	23,57	22,93	12,59	11,80	1,02	8,62	
27						26	24	26	18	19	25	23,57							
28						23	16	15	18	23	26	21,29							
3 face 1 face 2	28	50	25	24	22,8	24	25	16	17	16	29	29	22,29	21,79	12,14				
24						25	16	17	16	29	29	22,29							
8						6	20	30	21	16	21	17,43							
4 face 1 face 2	91	50	30	24	24,5	20	15	14	14	23	21	16	17,57	17,50	8,04				
16						14	16	14	16	25	25	18,00							
9						27	15	14	20	16	6	15,29							
5 face 1 face 2	91	49	30	24	24,5	11	13	11	15	20	17	25	16,00	16,64	7,48	7,58	0,43	5,65	
10						16	13	15	16	20	23	16,14							
10						16	13	15	16	20	23	16,14							
6 face 1 face 2	91	49	30	24	24,5	17	17	14	16	17	17	21	17,00	16,00	6,76				
29						10	12	11	12	15	16	15,00							
8						13	8	8	14	7	18	10,86							
1 face 1 face 2	28	46	30	24	22,8	23	24	21	23	26	18	17	21,71	20,57	8,80				
23						16	15	23	21	19	19	19,43							
19						16	13	19	20	25	30	20,29							
2 face 1 face 2	28	48	30	24	22,8	22	28	28	24	21	16	15	22,00	21,14	9,43	10,36	2,17	20,99	
27						35	33	29	29	26	21	28,57							
30						31	21	21	23	36	34	28,00							
3 face 1 face 2	28	48	30	24	22,8	17	17	14	16	17	17	21	17,00	16,00	6,76				
29						10	12	11	12	15	16	15,00							
8						13	8	8	14	7	18	10,86							
4 face 1 face 2	91	47	30	24	24,5	17	11	8	9	17	9	10	11,57	11,21	4,69	6,05	1,17	19,43	
11						16	15	9	7	10	15	11,86							
25						22	12	15	16	15	22	18,14							
5 face 1 face 2	91	49	30	24	24,5	11	16	15	9	7	10	15	11,86	15,00	6,69				
25						22	12	15	16	15	22	18,14							
25						22	12	15	16	15	22	18,14							
6 face 1 face 2	91	49	30	24	24,5	25	22	12	15	16	15	22	18,14	15,00	6,69				
25						22	12	15	16	15	22	18,14							
25						22	12	15	16	15	22	18,14							

A.3.4 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Amassadura	Identificação		Dimensões do Provete			Tensão (V)	Corrente (mA)	Resistência			Resistividade Eléctrica			
	Provete	Idade (dias)	L (mm)	ϕ (mm)	Secção (mm ²)			R _T	R _{SPG}	R _C	ρ_i	ρ_m	S	C _{var}
REF	1	28	53	100	7853,98	60	75	797,87		597,87	88,60			
	2		51	100	7853,98	60	90	666,67	200	666,67	71,87	79,78	8,40	10,53
	3		49	100	7853,98	60	87	692,04		692,04	78,87			
	4	91	49	100	7853,98	60	36	1680,67		1480,67	237,33			
	5		48	100	7853,98	60	36	1666,67	200	1666,67	239,98	229,58	15,78	6,88
	6		49	100	7853,98	60	40	1518,99		1518,99	211,41			
B10CV20CF	1	28	47	100	7853,98	60	133	450,79		250,79	41,91			
	2		49	100	7853,98	60	139	430,42	200	430,42	36,93	37,51	4,15	11,06
	3		43	100	7853,98	60	156	384,37		384,37	33,68			
	4	91	48	100	7853,98	60	82	730,82		530,82	86,85			
	5		45	100	7853,98	60	83	723,76	200	723,76	91,41	84,97	7,56	8,90
	6		51	100	7853,98	60	86	697,67		697,67	76,64			
B20CV10CF	1	28	50	100	7853,98	60	122	492,21		292,21	45,90			
	2		49	100	7853,98	60	124	484,65	200	484,65	45,63	46,71	1,64	3,51
	3		50	100	7853,98	60	118	509,34		509,34	48,59			
	4	91	50	100	7853,98	60	49	1232,03		1032,03	162,11			
	5		49	100	7853,98	60	52	1149,43	200	1149,43	152,18	162,43	10,41	6,41
	6		49	100	7853,98	60	47	1279,32		1279,32	173,00			
B20CV40CF	1	28	48	100	7853,98	60	120	501,67		301,67	49,36			
	2		49	100	7853,98	60	104	579,71	200	579,71	60,86	56,92	6,55	11,50
	3		50	100	7853,98	60	103	585,37		585,37	60,53			
	4	91	48	100	7853,98	60	66	911,85		711,85	116,48			
	5		49	100	7853,98	60	64	934,58	200	934,58	117,74	125,78	15,03	11,95
	6		49	100	7853,98	60	55	1092,90		1092,90	143,12			
B40CV20CF	1	28	46	100	7853,98	60	89	671,14		471,14	80,44			
	2		48	100	7853,98	60	93	643,09	200	643,09	72,50	76,07	4,03	5,30
	3		48	100	7853,98	60	91	660,07		660,07	75,28			
	4	91	46	100	7853,98	60	42	1428,57		1228,57	209,76			
	5		47	100	7853,98	60	37	1630,43	200	1630,43	239,03	225,55	14,77	6,55
	6		49	100	7853,98	60	37	1621,62		1621,62	227,87			

A.3.5 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Amassadura	Período de Exposição (dias)	Profundida média e máxima de carbonatação							Coeficiente de carbonatação	
		$d_{k\ m\ 1}$	$d_{k\ m\ 2}$ (mm)	$d_{k\ m\ 3}$	$d_{k\ m}$ (mm)	S	C_{var} (%)	$d_{k\ máx}$ (mm)	K_c (mm/ano ^{0,5})	R^2
REF	14	<1	<1	<1	<1	-	-	-	1,00	-
	21	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	49	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	70	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	91	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
B10CV20CF	14	2	2	2	2,08	0,28	13,35	3	9,44	0,97
	21	3	2	3	2,83	0,64	22,53	5		
	49	3	4	3	3,08	0,42	13,60	5		
	70	5	5	4	4,50	1,40	31,13	8		
	91	6	5	4	4,83	1,45	30,06	10		
B20CV10CF	14	3	3	3	2,67	0,43	16,28	4	13,06	0,99
	21	3	3	3	2,92	0,69	23,56	4		
	49	5	6	3	4,58	0,79	17,18	8		
	70	6	7	6	6,08	0,74	12,15	8		
	91	6	8	5	6,33	1,36	21,49	11		
B20CV40CF	14	17	16	17	16,58	0,50	3,02	18	79,24	0,90
	21	18	15	16	16,38	0,55	3,36	19		
	49	20	20	20	19,92	0,50	2,51	22		
	70	40	41	41	40,71	7,07	17,38	54		
	91	35	41	40	38,50	0,43	1,12	42		
B40CV20CF	14	20	20	20	19,83	0,88	4,45	22	87,14	0,90
	21	19	17	18	17,75	0,92	5,17	20		
	49	22	22	22	22,04	2,85	12,93	26		
	70	28	38	44	36,67	7,55	20,58	66		
	91	48	49	49	48,67	0,58	1,19	49		