



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

**Misturas binárias de betão auto-compactável com
incorporação de cinzas de fundo resultantes da
incineração de resíduos sólidos urbanos**

JOEL RICARDO CAVACO LEITÃO

(Licenciado em Engenharia civil)

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

Orientadores:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva, ISEL

Doutor Rui Vasco Pacheco Santos Silva, IST

Júri:

Presidente: Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto

Vogais:

Doutor Luís Manuel Faria da Rocha Evangelista

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Novembro de 2017

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi desenvolvida ao longo de vários meses e contou com a contribuição de diversas pessoas, às quais expresso o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Pedro Silva, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), orientador desta dissertação, pela disponibilidade, incentivo, partilha de conhecimentos e o apoio científico.

Ao Doutor Rui Silva, do Instituto Superior Técnico (IST), orientador desta dissertação, pelo incentivo, ajuda, disponibilidade, partilha de conhecimentos e apoio científico.

À Professora Doutora Carla Costa, do ISEL, o apoio prestado e a disponibilização das cinzas volantes utilizadas na presente dissertação.

À Valorsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos das Regiões de Lisboa e do Oeste, S.A. – Vila Franca de Xira pelo fornecimento gratuito da adição estudada.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do IST, o apoio dado na execução de alguns ensaios.

Ao Bruno Lourenço, colega e amigo do ISEL, o meu sincero agradecimento pelo companheirismo, partilha e troca de ideias, bem como por a ajuda e disponibilidade prestada ao longo de todo o tempo passado no ISEL.

Aos amigos e colegas com quem tive a possibilidade de privar ao longo do meu percurso académico e que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso académico, para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal, particularmente à Ana Diogo, Andreia Lopes, Guilherme Rosa, Marcos Marques e Vítor Dantas agradeço a ajuda prestada.

À Susana agradeço o carinho, compreensão, paciência e apoio que sempre me deu.

À minha família, em especial à minha mãe e irmão, reconheço e agradeço os sacrifícios que fizeram e o apoio incondicional que sempre me deram ao longo da minha vida, obrigado.

RESUMO

O betão é um dos materiais mais amplamente utilizados no setor da construção e um dos que mais contribui para o seu impacte ambiental. Este contributo deve-se em grande parte ao facto de na sua produção ser tradicionalmente utilizado cimento Portland, que por sua vez é produzido com elevados consumos de energia e emissões de CO₂.

É com o objetivo de encontrar uma alternativa viável à utilização de cimento que se enquadra o presente trabalho, que pretende essencialmente verificar a possibilidade de se utilizarem cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos, em detrimento do cimento, conseguindo reduzir o impacte inerente ao uso do betão como material de construção.

Desta forma, a campanha experimental laboratorial consistiu na análise das propriedades dos betões auto-compactáveis, produzidos com misturas binárias de cimento e cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos (CFRSU), no seu estado fresco (auto-compactabilidade) e no estado endurecido (comportamento mecânico e durabilidade). Para tal foram produzidas quatro amassaduras de betão auto-compactável (BAC), de acordo com a NP EN 206-9 (2010), que pretendem abranger uma gama alargada de substituição de cimento pela adição em estudo (20%, 30%, 40% e 50%). De forma a que seja possível realizar uma análise comparativa de resultados das amassaduras referidas, foi produzida uma quinta amassadura de BAC com incorporação de cinzas volantes para a percentagem de substituição de cimento de 30% que funcionará como betão de referência.

Assim sendo, foi avaliado o desempenho, em todas as vertentes, dos betões para as diferentes razões de substituição de cimento.

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que a utilização de CFRSU contribuiu para o decréscimo das propriedades do BAC, tendo as misturas produzidas apresentado um desempenho inferior ao do betão de referência. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram indicadores promissores no que respeita à durabilidade da mistura com 20% de substituição, com valores muito semelhantes aos de referência.

Palavras chave: Betão auto-compactável, Resíduos sólidos urbanos, Cinzas de fundo

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials in the construction industry and one of the largest contributors to the environmental impact of the sector. This contribution is due in large part to the fact that Portland cement has been traditionally used in the production of concrete, which in turn is produced with high energy consumption and CO₂ emissions.

With the purpose of establishing a viable alternative to the use of cement, the main objective of this study is to verify the possibility of using bottom ash resulting from the incineration of municipal solid waste as a partial cement replacement, reducing the environmental impact associated with the use of concrete as a building material.

The laboratory experimental campaign consisted in the analysis of the properties of the self-compacting concrete produced with binary mixtures of cement and bottom ash from municipal solid waste incinerators, in their fresh state (self-compactability) and in the hardened state (mechanical properties and durability). For this purpose, four self-compacting concrete mixes were produced according to NP EN 206-9 (2010), which are intended to cover a wide range of cement replacement by the aforementioned addition (20%, 30%, 40% and 50%). In order to make a comparative analysis of the results of the mentioned mixtures, a fifth self-compacting concrete mixture with fly ash incorporation was produced with a cement substitution of 30%, acting as reference concrete.

Therefore, the concrete performance for different mixtures of cement substitution were evaluated in all aspects.

When analyzing the obtained results, it is verified that the use of bottom ash from municipal solid waste incinerators contributed to the decrease in the properties of self-compacting concrete, with the mixtures produced having a lower performance than the reference concrete. Nevertheless, the results obtained show promising indicators regarding the durability of the mixture with 20% substitution, with values very similar to those of reference.

Key words: Self-compacting concrete, Municipal solid waste, Bottom ash

ÍNDICE

1	Enquadramento	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Metodologia	2
1.3	Estrutura da dissertação	4
2	Revisão da literatura.....	5
2.1	Betão auto-compactável	5
2.1.1	Materiais constituintes dos BAC.....	6
2.1.2	Aplicabilidade do BAC	8
2.1.3	Propriedades no estado fresco	9
2.1.4	Propriedades do BAC no estado endurecido.....	12
2.2	Resíduos sólidos urbanos.....	16
2.2.1	Produção de resíduos sólidos urbanos em Portugal	16
2.2.2	Valorização energética: Incineração	17
2.2.3	Aplicabilidade das CFRSU	19
2.2.4	Caracterização química das CFRSU	19
3	Campanha experimental laboratorial	21
3.1	Formulação e seleção das misturas	21
3.1.1	Seleção das misturas	21
3.2	Processo de fabrico.....	25
3.2.1	Produção de argamassas	25
3.2.2	Produção de betões	26
3.3	Seleção, preparação e caracterização dos materiais utilizados.....	27
3.3.1	Ligante.....	27
3.3.2	Adições.....	27
3.3.3	Adjuvante.....	32
3.3.4	Agregados	32
3.4	Ensaio no estado fresco.....	34
3.4.1	Ensaio em argamassas	34
3.4.2	Ensaio em betões	36
3.5	Ensaio no estado endurecido.....	40

3.5.1	Ensaio mecânico.....	40
3.5.2	Ensaio de durabilidade	44
3.5.3	Ultra-sons	50
4	Apresentação e análise de resultados	51
4.1	Propriedades do BAC no estado fresco	51
4.2	Propriedades do BAC no estado Endurecido.....	52
4.2.1	Propriedades mecânicas	52
4.2.2	Propriedades de durabilidade.....	66
4.3	Ultra-sons	75
5	Conclusões	79
5.1	Estado fresco.....	79
5.2	Comportamento mecânico	79
5.3	Durabilidade	80
5.4	Ultra-sons	81
5.5	Conclusões gerais	82
5.6	Propostas de desenvolvimento futuro	82
	Referências Bibliográficas	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos	A.1
A.1 Betões auto-compactáveis no estado fresco	A.3
A.2 Betões auto-compactáveis no estado endurecido, propriedades mecânicas	A.11
A.2.1 Resistência à compressão uniaxial – cubos.....	A.13
A.2.2 Resistência à compressão uniaxial – cilindros	A.17
A.2.3 Resistência à tração por compressão diametral	A.21
A.2.4 Módulo de elasticidade secante	A.25
A.2.5 Retração	A.29
A.3 Betões auto-compactáveis no estado endurecido, durabilidade	A.37
A.3.1 Absorção de água por imersão.....	A.39
A.3.2 Absorção de água por capilaridade	A.43
A.3.3 Difusão de cloretos	A.47
A.3.4 Resistividade elétrica	A.53
A.3.5 Carbonatação	A.57
A.4 Betões auto-compactáveis no estado endurecido, ultra-sons	A.61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metodologia do trabalho	3
Figura 2.1 - Reômetro cilíndrico coaxial (a), reômetro de discos paralelos (b)	9
Figura 2.2 - Mecanismo de bloqueio	11
Figura 2.3 - Distribuição dos poros	14
Figura 2.4 - Sistema integrado de gestão de RSU da Valorsul	18
Figura 3.1 - Sequência de amassadura para as misturas de argamassas	25
Figura 3.2 - Misturadora utilizada para misturar as argamassas.....	26
Figura 3.3 - Sequência de amassadura para as misturas de betão	26
Figura 3.4 - Betoneira misturadora utilizada para as misturas de betão	27
Figura 3.5 - Pilhas mensais de escórias (a), crivo rotativo (b).....	29
Figura 3.6 - Máquina de Los Angeles	29
Figura 3.7 - Tempos de moagem das CFRSU	30
Figura 3.8 - Difração de raios X das CFRSU	31
Figura 3.9 - Ensaio de absorção de água	32
Figura 3.10 - Curvas granulométricas dos agregados.....	34
Figura 3.11 - Mini-cone utilizado no ensaio de espalhamento em argamassas.....	35
Figura 3.12 - Mini-funil V utilizado no ensaio de escoamento em argamassas	36
Figura 3.13 - Cone de Abrams e base utilizados no ensaio de espalhamento	37
Figura 3.14 - Funil V utilizado no ensaio de escoamento, dimensões em mm	38
Figura 3.15 - Caixa L utilizada no ensaio de escoamento, dimensões em mm	39
Figura 3.16 - Ensaio de compressão uniaxial em provetes cúbicos.....	41
Figura 3.17 - Ensaio de compressão uniaxial em provetes cilíndricos.....	41
Figura 3.18 - Ensaio de compressão diametral	42
Figura 3.19 - Prensa de ensaio.....	43
Figura 3.20 - Ensaio de retração.....	44
Figura 3.21 - Ensaio de absorção de água por imersão.....	45
Figura 3.22 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	46
Figura 3.23 - Esquema de montagem do ensaio de migração de cloretos	47
Figura 3.24 - Ensaio de resistividade elétrica	48
Figura 3.25 - Ensaio de carbonatação	49
Figura 3.26 - Ensaio dos ultra-sons	50
Figura 4.1 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos, para todas as misturas de BAC	53
Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão uniaxial de provetes cilíndricos, para todas as misturas de BAC.....	57
Figura 4.3 - Relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas de BAC	57
Figura 4.4 - Variação da resistência à tração por compressão diametral para todas as misturas de BAC	59

Figura 4.5 - Superfície de rotura das misturas produzidas aos 91 dias de idade	59
Figura 4.6 - Relação entre a $f_{ctm,sp}$ e a $f_{cm,cil}$ para todas as misturas de BAC e para as expressões propostas pelo EC 2	60
Figura 4.7 - Variação do módulo de elasticidade para todas as misturas de BAC.....	61
Figura 4.8 - Expansão inicial do betão	62
Figura 4.9 - Relação entre o E_{cm} e o $f_{cm,cil}$ para todas as misturas de BAC e para a expressão proposta pelo EC 2.....	63
Figura 4.10 - Evolução da extensão de retração ao longo do tempo	64
Figura 4.11 - Evolução da extensão de retração ao longo do tempo para as misturas produzidas e para a proposta do EC 2, em função da resistência mecânica	65
Figura 4.12 - Evolução da absorção de água por imersão ao longo do tempo	67
Figura 4.13 - Curvas de absorção capilar aos 28 dias para todas as misturas	69
Figura 4.14 - Curvas de absorção capilar aos 91 dias para todas as misturas	69
Figura 4.15 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as misturas	71
Figura 4.16 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por imersão para todas as misturas	72
Figura 4.17 - Resistividade elétrica para todas as misturas	73
Figura 4.18 - Relação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos	74
Figura 4.19 - Profundidade de carbonatação para todas as misturas	75
Figura 4.20 - Velocidade de propagação de ultra-sons para todas as misturas.....	76
Figura 4.21 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultra-sons e a resistência à compressão	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química das CFRSU	20
Tabela 3.1 - Composição do betão REF	23
Tabela 3.2 - Composição do betão B 20	23
Tabela 3.3 - Composição do betão B 30	24
Tabela 3.4 - Composição do betão B 40	24
Tabela 3.5 - Composição do betão B 50	25
Tabela 3.6 - Características físicas das CV	28
Tabela 3.7 - Características químicas das CV	28
Tabela 3.8 - Índice de atividade	31
Tabela 3.9 - Características técnicas do superplastificante	32
Tabela 3.10 - Características dos agregados	33
Tabela 3.11 - Análise granulométrica dos agregados	33
Tabela 4.1 - Resultados no estado fresco	51
Tabela 4.2 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos	53
Tabela 4.3 - Coeficiente de endurecimento das misturas produzidas	56
Tabela 4.4 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cilíndricos	56
Tabela 4.5 - Resistência à tração por compressão diametral	58
Tabela 4.6 - Módulo de elasticidade secante	61
Tabela 4.7 - Extensão de retração ao longo do tempo	63
Tabela 4.8 - Extensão de retração ao longo do tempo, segundo o EC 2	65
Tabela 4.9 - Absorção de água por imersão	66
Tabela 4.10 - Absorção de água por capilaridade	68
Tabela 4.11 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as misturas	70
Tabela 4.12 - Resistividade elétrica para todas as misturas	72
Tabela 4.13 - Profundidade de carbonatação e coeficientes para todas as misturas	74
Tabela 4.14 - Velocidade de propagação de ultra-sons para todas as misturas	76
Tabela 4.15 - Classificação do betão segundo a velocidade de propagação dos ultra-sons	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

- $A_{i,d}$ – Valor da absorção de água por imersão para a idade i
- A/C – Razão em massa entre as quantidades de água e cimento da mistura
- A/MC – Razão em massa entre as quantidades de água e de materiais cimentícios da mistura
- A/MF – Razão em massa entre as quantidades de água e de materiais finos da mistura
- Abs – Valor da absorção capilar
- Abs_m – Valor médio da absorção capilar
- $A_{m,i,d}$ – Valor médio da absorção de água por imersão para a idade i
- AS – Aterro Sanitário
- B 20 – Mistura com substituição de 20% de cimento por CFRSU
- B 30 – Mistura com substituição de 30% de cimento por CFRSU
- B 40 – Mistura com substituição de 40% de cimento por CFRSU
- B 50 – Mistura com substituição de 50% de cimento por CFRSU
- BAC – Betão auto-compactável
- BC – Betão convencional
- C_{end} – Coeficiente de endurecimento
- CFRSU – Cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos
- Coef_{abs} – Coeficiente de absorção capilar
- CTE – Centro de Triagem e Ecocentro
- CTRSU – Central de Tratamento de RSU
- CV – Cinzas volantes
- C_{var} – Coeficiente de variação
- $d_{km,i,d}$ – Valor médio da profundidade de carbonatação para a idade i
- $D_{m,i,d}$ – Coeficiente de difusão de cloretos para a idade i
- DRX – Difração de raios X
- E_c – Valor do módulo de elasticidade secante para a idade i
- $E_{cm,i,d}$ – Valor médio do módulo de elasticidade secante para a idade i
- EDS – Espectroscopia de raios X
- EGAF – Escória granulada de alto forno
- EM – Espalhamento médio, no ensaio de espalhamento
- ETVO – Estação de Tratamento e Valorização Orgânica
- f_{ad} – Percentagem de substituição de cimento pela adição
- FC – Fíler calcário
- $f_{cm,c,i,d}$ – Valor médio da resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos para a idade i
- $f_{cm,cil,i,d}$ – Valor médio da resistência à compressão uniaxial em provetes cilíndricos para a idade i
- $f_{cm,cil}/f_{cm,c}$ – Relação entre a resistência à compressão entre os provetes cilíndricos e os cúbicos
- $f_{ctm,sp,i,d}$ – Valor médio da resistência à tração por compressão diametral em provetes cilíndricos para a idade i
- $f_{ctm,sp}/f_{cm,cil}$ – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial em provetes cilíndricos

G_m – Área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento da argamassa com o mini-cone
IA – Índice de atividade
ITVE – Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias
 K_c – Coeficiente de carbonatação
PL – Índice de capacidade de passagem, no ensaio da caixa L
PP – Pó de pedra-pomes
RC – Resistência do betão ($RC = RT - RSPG$)
REF – Mistura com substituição de 30% de cimento por CV
 R_m – Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez da argamassa com o mini- funil V
RSPG – Resistência do material de contacto
RSU – Resíduos sólidos urbanos
RT – Resistência total
S – Desvio padrão
SF – Sílica de fumo
 S_p – Superplastificante
 $S_p/p\%$ – Razão percentual em massa entre as quantidades totais de superplastificante e de materiais finos da mistura
 t_{500} – Tempo em segundos até ao espalhamento de diâmetro 500 mm, no ensaio com o cone de Abrams
 t_{us} – Tempo de transmissão das ondas ultra-sónicas
 t_v – Tempo de escoamento, no ensaio de escoamento com o funil V
 V_g – Volume absoluto do total de agregados grossos da mistura
 V_m – Volume absoluto de argamassa da mistura
 V_m/V_g – Razão em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos da mistura
 V_p – Volume absoluto do total de material fino da mistura
 V_p/V_s – Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos da mistura
 V_s – Volume absoluto do total de agregados finos da mistura
 V_{sp} – Volume de S_p da mistura
 V_{sp}/V_p – Razão em volume absoluto entre as quantidades de S_p e de materiais finos da mistura
 $V_{us,c,id}$ – Valor da velocidade dos ultra-sons para a idade i
 $V_{usm,c,id}$ – Valor médio da velocidade dos ultra-sons para a idade i
 V_v – Volume de vazios da mistura
 V_w – Volume de água da mistura
 V_w/V_p – Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e materiais finos da mistura
 $\epsilon_{cs,id}$ – Extensão total de retração para a idade i
 $\rho_{,id}$ – Valor de resistividade elétrica para a idade i
 $\rho_{m,id}$ – Valor médio de resistividade elétrica para a idade i

1 ENQUADRAMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação científica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa “Produção de betão auto-compactável (BAC) com cinzas da queima de resíduos sólidos urbanos”, com a finalidade de avaliar a viabilidade da produção de BAC de menor impacte ambiental, recorrendo à substituição de cimento por cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos (CFRSU). Para tal foi avaliado o desempenho de BAC onde uma parte relevante do ligante tradicional (cimento Portland) é substituída por CFRSU, validando a utilização deste tipo de adições e em simultâneo fornecendo indicadores de desempenho.

Um betão auto-compactável pode ser definido como um betão que tem a capacidade de se moldar apenas pela ação do seu próprio peso e da energia cinética gerada no processo de aplicação, sem que ocorra segregação e preenchendo os vazios independentemente dos reforços aplicados (armadura) e da geometria da peça (Brito & Silva, 2015). Este tipo de betão, pelo facto de apresentar um processo de betonagem mais simples onde não é necessário realizar vibração, permite a produção de elementos com melhor qualidade e durabilidade quando comparado com o betão convencional (BC).

A composição destes dois betões é essencialmente a mesma, divergindo apenas no facto dos BAC, por ausência de vibração, implicarem entre outras alterações, o aumento do volume de finos na mistura (cimento e adições) e possibilitar o aumento da quantidade de adições, através de misturas binárias de cimento com um aditivo ou ternárias de cimento com dois aditivos (Brito & Silva, 2015).

Apesar das vantagens apresentadas pelos BAC, estes continuam a recorrer ao cimento como ligante que apresenta uma produção anual de aproximadamente 2,8 mil milhões de toneladas e é expectável que este valor venha a ultrapassar as 4 mil milhões de toneladas (Jani & Hogland, 2014). Considerando ainda o facto de que para a produção de uma tonelada de cimento é necessário consumir entre 1,5 t e 1,7 t de recursos naturais como calcário, argila, areias de sílica, bauxite, gesso, etc. e 0,11 t a 0,15 t de carvão ou outro combustível como petróleo, óleo combustível pesado e gás natural, gerando emissões de CO₂ na ordem de 0,7 t a 1,0 t (Zhang, Gao, Gao, Wei, & Yu, 2013), é importante encontrar uma solução que a agregue a necessidade que os BAC têm de um maior volume de finos com as crescentes preocupações ambientais, nomeadamente a redução do consumo dos recursos naturais e das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento, recorrendo para tal, a curto prazo, à substituição do clínquer e/ou do próprio cimento por outros materiais.

É com o intuito de encontrar um material que se apresente como alternativa para a resolução desta problemática que o presente projeto analisou a utilização de resíduos sólidos urbanos (RSU), pois em todo o mundo são gerados aproximadamente 1,3 mil milhões de toneladas de RSU por ano, sendo que até 2025 é esperado que a sua produção aumente para 2,2 mil milhões de toneladas (Bhada-Tata & Hoornweg, 2012). As cinzas de fundo são o

subproduto mais significativo da incineração dos RSU, correspondendo a uma percentagem dos resíduos resultantes do processo na ordem dos 85% a 95% (Chandler et al., 1997).

Considerando esta alternativa, é então fundamental demonstrar a viabilidade da sua utilização, através da caracterização do comportamento dos betões onde é aplicada.

1.1 Objetivos

A campanha experimental a realizar tem a finalidade de analisar as propriedades dos BAC, produzidos com misturas binárias de cimento e CFRSU, no seu estado fresco (auto-compactabilidade) e no estado endurecido (comportamento mecânico e durabilidade). Para tal foram produzidas quatro amassaduras de BAC, de acordo com a NP EN 206-9 (2010), que abrangessem uma gama alargada de substituição de cimento pela adição em estudo (20%, 30%, 40% e 50%). De forma a que seja possível realizar uma análise comparativa de resultados das amassaduras referidas, foi produzida uma quinta amassadura com incorporação de cinzas volantes (CV) e percentagem de substituição de cimento de 30%, que funcionou como betão de referência.

Concluída a campanha experimental o principal objetivo do projeto passou por apresentar à indústria uma forma inovadora em termos internacionais de escoamento e valorização dos desperdícios produzidos, reduzindo o consumo de recursos naturais na produção de betão e assim minimizar o impacte ambiental que este processo provoca.

1.2 Metodologia

Para definir a composição das amassaduras foi considerado o método de cálculo de quantidades de amassadura para BAC sugerido por (Nepomuceno, 2005). Este método tem como base os métodos de (Okamura, Ozawa, & Ouchi, 2000) e da JSCE (1998) e implica primeiramente o estudo das misturas em fase de argamassa para aferir alguns dos seus parâmetros e só mais tarde o estudo do betão.

A avaliação dos requisitos do BAC no estado fresco teve como base a norma NP EN 206-9 (2010) e os ensaios realizados de acordo com as normas NP EN 12350 partes 8 a 10 (2010), sendo estabelecido como principal objetivo para a trabalhabilidade dos BAC a não ocorrência de segregação ou exsudação.

Os ensaios no estado endurecido, foram divididos em duas partes, a primeira relativa às propriedades mecânicas e a segunda à durabilidade. O estudo das propriedades mecânicas, ao longo do tempo, conteve a avaliação da compressão uniaxial (em provetes cúbicos e cilíndricos), da tração por ensaio indireto de compressão diametral, do módulo de elasticidade secante e da retração. Para o estudo das propriedades de durabilidade, também ao longo do tempo, foi avaliada a permeabilidade (por ensaio de absorção de água por imersão), capilaridade (com recurso ao ensaio de absorção de água por capilaridade), difusão (através do ensaio de penetração de cloretos e da resistividade elétrica) e a carbonatação (por ensaio de carbonatação

acelerada). Como complemento foi ainda realizado o ensaio de propagação de ondas ultrasónicas. Para a realização dos ensaios no estado endurecido, foram considerados, sempre que possível, os documentos normativos ou internacionais e, quando não foi possível, seguidos procedimentos apresentados em documentos ou trabalhos de referência devidamente justificados caso a caso.

O trabalho desenvolvido pretendeu contribuir para a divulgação do BAC e da sua capacidade de incorporação de quantidades significativas de materiais finos na sua composição, nomeadamente, adições de CFRSU ou outros subprodutos de outras indústrias, resultando numa maior implementação deste tipo de betão e tornando a sua utilização mais simples e generalizada.

A Figura 1.1 apresenta de forma esquematizada a metodologia de trabalho seguida para a realização da presente dissertação.

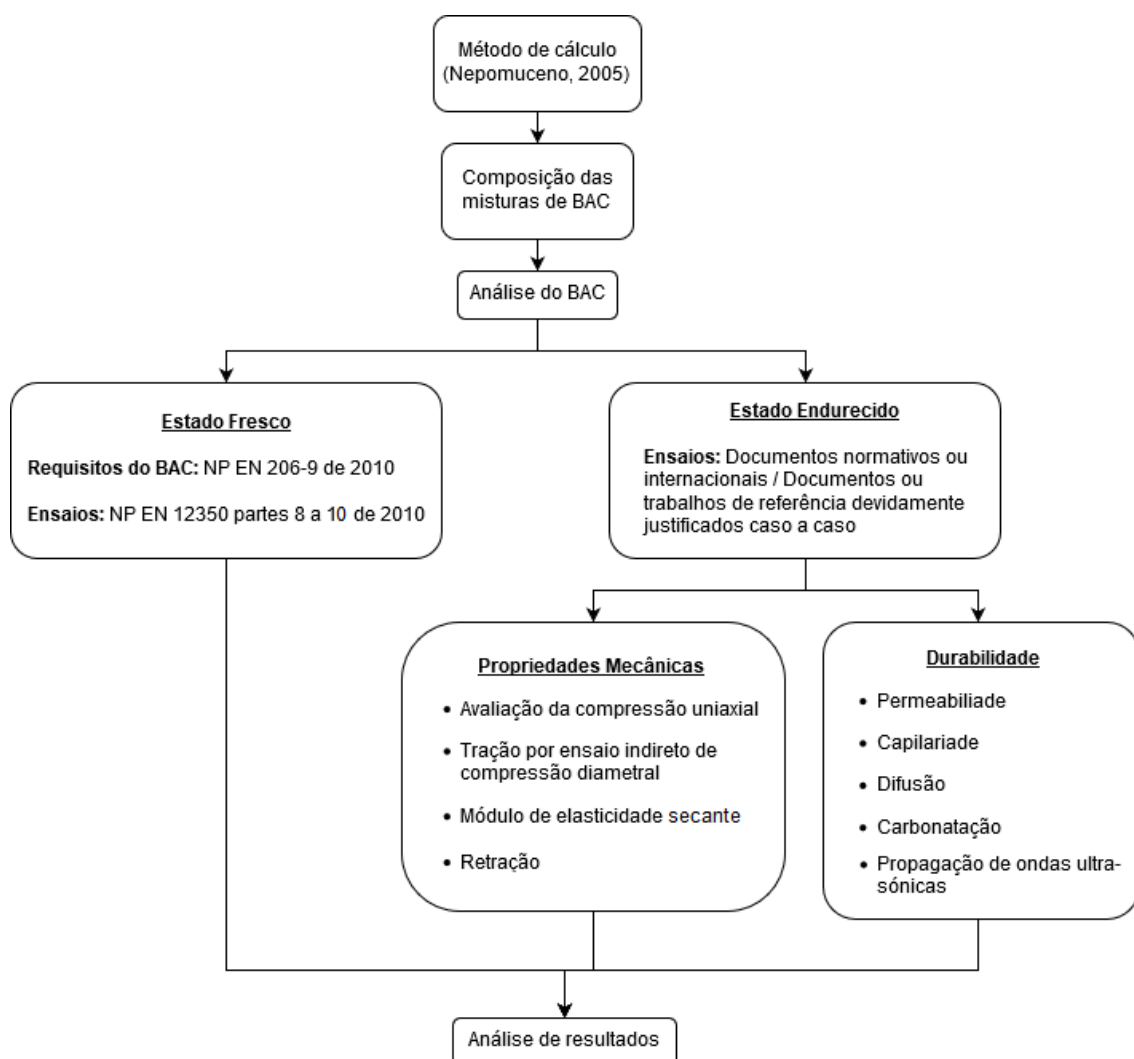


Figura 1.1 - Metodologia do trabalho

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e foi organizada da seguinte forma:

Capítulo 1 – O primeiro capítulo apresenta uma contextualização do tema escolhido, indicando a sua relevância, bem como os objetivos do projeto, a metodologia a seguir e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – O segundo capítulo é de natureza mais teórica e apresenta uma revisão da literatura do BAC e das CFRSU.

Capítulo 3 – O terceiro capítulo enquadra a campanha experimental laboratorial, apresentando a composição das amassaduras, o processo seguido para a concretização das amassaduras, a caracterização dos materiais utilizados e os procedimentos dos vários ensaios.

Capítulo 4 – No quarto capítulo são apresentados, interpretados e criticados os resultados obtidos na campanha experimental laboratorial, de forma a avaliar a viabilidade da utilização de CFRSU.

Capítulo 5 – No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões finais da dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros relativos ao tema em estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Com este capítulo pretende-se a descrição sucinta da temática em análise. O capítulo encontra-se dividido em duas partes, a primeira centrada na apresentação do BAC enquanto material de construção e na descrição das suas propriedades no estado fresco e endurecido. A segunda parte introduz os RSU, fazendo o seu enquadramento na realidade portuguesa e descrevendo de forma sumária o tratamento aplicado aos resíduos. São ainda apresentados alguns estudos relativos à utilização de CFRSU e à sua composição química.

2.1 Betão auto-compactável

A qualidade final de um betão depende da sua composição, das técnicas de controlo de produção, do transporte e essencialmente do processo de compactação em obra (dependente de trabalhadores especializados para assegurar o correto desempenho e durabilidade das estruturas) e do método de cura utilizado “in situ”.

No início da década de 80 do século passado, no Japão, a durabilidade das estruturas de betão armado representava uma grande preocupação do sector da construção, pois à época era verificada uma redução da qualidade das estruturas de betão armado, condicente com a diminuição do número de trabalhadores qualificados envolvidos no processo de compactação do betão. Ciente desta problemática, o professor Okamura da Universidade de Tóquio propôs, em 1986, que se desenvolvesse um betão capaz de produzir estruturas duráveis, que não dependessem da qualidade do processo construtivo. Betão que mais tarde se veria a designar por “betão auto-compactável”.

No Japão o conhecimento sobre este tipo de betão desenvolveu-se de tal forma que no início da década de 90 a sua utilização era recorrente na construção de pontes e em edifícios tendo a capacidade de preencher os moldes na totalidade independentemente da quantidade de armadura presente no elemento e sem que ocorra floculação nem segregação das suas partículas, apenas por ação do próprio peso e sem ser necessário aplicar qualquer método de compactação.

Na Europa, o BAC só começa a ser utilizado no início da década de 90 maioritariamente pela indústria da pré-fabricação e no fornecimento de betão pronto (Brito & Silva, 2009).

Nos dias de hoje a utilização de BAC é ainda condicionada por um conjunto de fatores, nomeadamente (Brito & Silva, 2009; Oliveira, 2009):

- Necessidade de métodos de cálculo de amassaduras mais fáceis de implementar e com maior reprodutibilidade;
- Necessidade de otimizar as misturas para que se tornem mais competitivas, economicamente, face ao betão convencional;
- Carência de avaliação do comportamento dos BAC a longo prazo em termos de durabilidade;

- Debilidades na informação que é divulgada aos intervenientes no processo construtivo.

É com o objetivo de validar a utilização de BAC que nos últimos anos se têm realizado investigações e apresentado resultados que possibilitem a existência de confiança relativamente à utilização do BAC, passando a ser utilizado em construções correntes em detrimento do BC, conseguindo-se desta forma aumentar a qualidade das estruturas e dos processos construtivos, em particular no que respeita à durabilidade das estruturas de betão armado, beneficiando em simultâneo da capacidade de gestão de recursos ambientais que este tipo de betão proporciona (Brito & Silva, 2009; Oliveira, 2009).

2.1.1 Materiais constituintes dos BAC

A produção de BAC pode de um modo geral recorrer a todos os materiais utilizados nos betões convencionais, nomeadamente cimento, agregados finos e grossos, água de amassadura, adições e adjuvantes. Um dos pontos diferenciadores dos BAC e que tem vindo a ser analisado e a servir como base a diversas investigações é a necessidade que estes têm de uma maior quantidade de pasta, que por sua vez, implica um aumento da quantidade de finos (Nepomuceno, 2005).

2.1.1.1 Materiais finos

Como materiais finos são consideradas os constituintes mais finos do betão como cimento e adições. Estes devem ser corretamente dimensionados para evitar um excesso de volume de vazios no betão que o possa tornar sensível à floculação das partículas finas que o constituem (Brito & Silva, 2009; Kordts & Breit, 2000).

Cimento

A Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007) define o cimento como sendo o material inorgânico finamente moído que ao ser misturado com água forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação, mantendo, uma vez endurecida a sua resistência e estabilidade mesmo quando submersa.

O cimento utilizado na produção de BAC não está sujeito a restrições, no entanto há que ter em consideração que o tipo, características e quantidade de cimento influenciam as propriedades do betão, tanto no estado fresco como endurecido. Nawa, Izumi & Edamatsu (1998) sugerem ainda que esta influência é verificada em dois efeitos, na alteração da trabalhabilidade dos BAC quando a adsorção do adjuvante não é feita de forma uniforme pelas partículas de cimento conduzindo a uma dispersão das partículas menos eficiente e na alteração da viscosidade plástica da pasta, que é condicionada pela distribuição das dimensões das partículas e pela sua forma.

Adições

A definição encontrada na Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007) classifica as adições como um material finamente dividido que é utilizado no betão com o objetivo de lhe melhorar as propriedades ou conferir propriedades especiais. A mesma norma estabelece ainda que as adições se dividem em dois tipos: adições quase inertes (tipo I) e adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (tipo II).

As adições do tipo I englobam materiais quimicamente inertes como quartzo, dolomite, rochas calcárias, produtos siliciosos e granito, quando adicionadas ao betão na forma de pó, interagem com a cal e com os álcalis libertados no processo de hidratação do cimento Portland, tendo benefícios a longo prazo na resistência mecânica, química e permeabilidade dos BAC (Nepomuceno, 2005).

Quanto às adições do tipo II, estas são essencialmente materiais siliciosos ou siliciosos e aluminosos como escórias de alto-forno, CV e sílica de fumo (SF), que isoladamente não possuem capacidade cimentícia, mas que quando em pó e na presença de humidade reagem quimicamente com os hidróxidos de cálcio produzindo compostos com propriedades cimentícias semelhantes aos que surgem na hidratação dos constituintes do cimento Portland (Brito & Silva, 2009; Nepomuceno, 2005).

2.1.1.2 Agregados

Agregados finos

Os agregados finos são usualmente areias com uma dimensão variável entre os 0,075 mm e os 0,125 mm, sendo a máxima dimensão os 5 mm. Desta forma, é aconselhável que a areia utilizada tenha uma boa distribuição granulométrica que favoreça o incrementando da resistência à segregação/floculação, compacidade e fluidez (EPG, 2005; Silva, 2013).

No fabrico de betão podem ser utilizados areias naturais ou britadas, sendo que para o fabrico de BAC é preferível que se opte por areias naturais por estas apresentarem partículas com uma forma mais arredondada que, por sua vez, favorece o escoamento do betão. O uso de areias britadas é menos indicado por a utilização destas implicar, para a mesma trabalhabilidade, um maior consumo de água e adjuvantes. Comportamento que se deve ao facto de as areias britadas terem uma maior superfície específica (Silva, 2013).

Agregados grossos

Podem ser classificados como agregados grossos as partículas com um diâmetro superior a 5 mm, sendo que a máxima dimensão recomendada é entre os 20 mm e os 25 mm, devendo ser considerada a disposição das armaduras presentes nos elementos a betonar para evitar bloqueios (Nepomuceno, 2005).

Outro fator que também deve ser avaliado é a forma das partículas do agregado grosso, pois tal como nos agregados finos, partículas mais arredondadas (agregado grosso rolado) facilitam o escoamento do BAC (Silva, 2013).

2.1.1.3 Água de amassadura

A água utilizada nas amassaduras do betão tem a função de hidratar o cimento, conferir à mistura uma adequada consistência (viscosidade e deformabilidade) e molhar os agregados.

A quantidade de água a utilizar deve ser estabelecida através da relação da sua massa com a do cimento (A/C), por sua vez esta relação deve ser cuidadosamente definida de forma a hidratar todo o cimento e assegurar uma correta consistência para que não ocorra segregação da mistura (Okamura & Ouchi, 1999).

2.1.1.4 Adjuvantes

Os adjuvantes são definidos na Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007) como o produto a adicionar durante, ou no caso de superplastificantes ou redutores de água, após o processo de amassadura do betão para modificar a sua consistência.

A auto-compatibilidade que advém da sua utilização, juntamente com a capacidade de empregar uma maior quantidade de materiais finos, sem comprometer a resistência à segregação, constitui um dos princípios mais relevantes na produção de BAC (Brito & Silva, 2009).

Superplastificantes

Um BAC caracteriza-se por apresentar boa trabalhabilidade mantendo a resistência à segregação. É com o propósito de assegurar estas condições que são utilizados os superplastificantes, materiais que deverão apresentar boa capacidade de dispersão para uma baixa relação A/C e reduzida sensibilidade à variação da temperatura (Okamura & Ouchi, 2003).

A utilização deste tipo de adjuvante deverá ser ponderada para evitar a segregação e o bloqueio de fluxo, no entanto permite a redução da água livre da amassadura que conduz a um aumento da fluidez do betão às custas de uma pequena redução da viscosidade (Brito & Silva, 2009).

2.1.2 Aplicabilidade do BAC

Atualmente um maior número de estruturas são produzidas com recurso ao BAC por este incrementar a sua durabilidade e possibilitar que estas tenham formas geométricas mais elaboradas (Pinto, 2011).

Quando comparado com o BC o BAC apresenta ainda as seguintes vantagens (NP EN 206-1, 2007; Nunes, Figueiras & Coutinho, 2004; Skarendahl, 2000):

- Melhoria da produtividade, particularmente em construções de maior dimensão;
- Melhoria da homogeneidade das estruturas, independentemente da sua complexidade ou da taxa de armaduras;
- Melhoria da qualidade da superfície do betão.

2.1.3 Propriedades no estado fresco

O BAC distingue-se do BC por conseguir fluir livremente por ação do próprio peso sem que seja necessário recorrer a qualquer método adicional de compactação, conseguindo ocupar as cofragens na sua totalidade de forma a que as armaduras fiquem corretamente envolvidas e não ocorra segregação ou se formem vazios.

A adequada auto-compatibilidade de um BAC caracteriza-se por uma elevada deformabilidade, resistência à segregação entre os agregados grossos e a argamassa e a capacidade de escoamento e passagem em zonas confinadas (Okamura & Ouchi, 2003). Podendo, segundo os autores, ser conseguida através da otimização da mistura com aplicação de uma ou mais das seguintes medidas:

- Limitação das quantidades e proporção entre os agregados;
- Utilização de superplastificante;
- Baixa relação água/finos.

A auto-compatibilidade por sua vez depende da reologia e da trabalhabilidade do betão.

2.1.3.1 Reologia

A reologia enquadra-se no estudo da mecânica dos fluídos, tendo o princípio de que o BAC no estado fresco apresenta um comportamento equivalente ao de um fluído, temos a possibilidade de adotar uma abordagem direta para a caracterização das propriedades de fluxo de um BAC (Silva, 2013).

As propriedades do BAC que caracterizam o comportamento reológico são a tensão de corte entre as partículas e a taxa de deformação, sendo o baixo valor da tensão de corte e a adequada viscosidade plástica as características pretendidas para o BAC (Khayat & Tangtermsirikul, 2000). Para se conseguir este comportamento, os mesmos autores indicam que podem ser utilizados superplastificantes e/ou ajustar as quantidades de material fino.

Para avaliar as propriedades reológicas do betão fresco, argamassas e pastas são utilizados reómetros, Figura 2.1, que funcionam por corte, por meio de rotação, podendo ser do tipo cilíndricos coaxiais ou de discos paralelos (Silva, 2013).

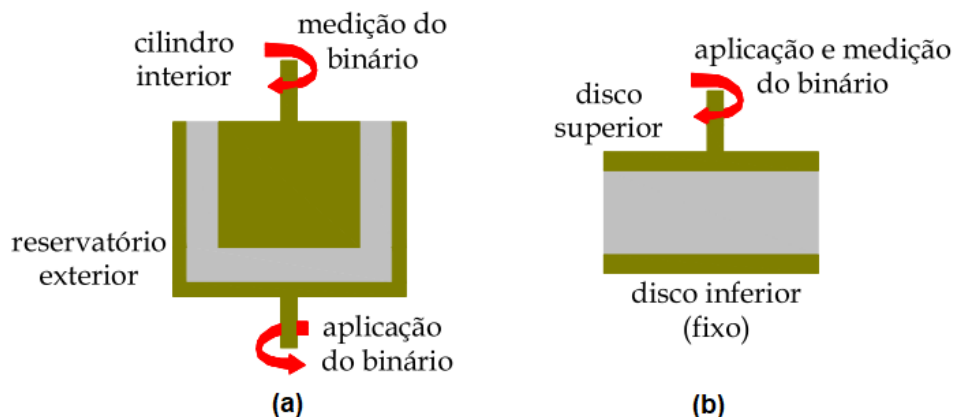


Figura 2.1 - Reómetro cilíndrico coaxial (a), reómetro de discos paralelos (b), (Silva, 2013)

2.1.3.2 Trabalhabilidade

Para facilitar a análise do comportamento reológico do BAC, dada a dificuldade da maioria dos utilizadores de BAC em obter um reómetro, pode recorrer-se a ensaios de trabalhabilidade para estimar as suas propriedades, nomeadamente o ensaio de espalhamento e de fluidez (Nepomuceno, 2005; Silva, 2013).

Um BAC distingue-se de um BC maioritariamente pelo comportamento que apresenta no estado fresco. Desta forma, as propriedades a este requeridas têm de se manter desde o fabrico até à colocação nos molde e respetivo endurecimento (Silva, 2013).

As exigências a respeitar por um BAC no estado fresco passam então por apresentar uma adequada (Khayat & Tangtermsirikul, 2000; Silva, 2013; Skarendahl, 2000):

- Capacidade de escoamento e enchimento;
- Capacidade de passagem e deformabilidade;
- Resistência à segregação.

Estas exigências possibilitam a análise das propriedades do BAC que dependem das condições “in situ”, como a distância entre armaduras, taxa de armaduras, dimensões dos moldes, geometria dos moldes, etc. (Khayat & Tangtermsirikul, 2000; Skarendahl, 2000).

Capacidade de escoamento e enchimento

Esta propriedade está relacionada com a capacidade do betão se deformar de forma a preencher o molde sem que seja necessário recorrer a qualquer método de compactação auxiliar, mas evitando a segregação das suas partículas e o bloqueio do fluxo de betão (Silva, 2007).

Uma boa capacidade de escoamento e enchimento assegura a qualidade de acabamento da superfície do BAC (fator importante quando temos betão à vista) e a correta espessura de recobrimento para proteção das armaduras (Silva, 2013).

Para melhorar a capacidade de escoamento e enchimento devemos assegurar uma adequada viscosidade, aumentar a deformabilidade da pasta e reduzir o atrito entre partículas. Para tal podemos implementar as seguintes medidas para cada uma das situações (Khayat & Tangtermsirikul, 2000; Silva, 2013):

Adequada viscosidade:

- Controlo da quantidade de agregado grosso;
- Equilíbrio da relação água/material fino;
- Utilização de adjuvantes e adições.

Aumento da deformabilidade da pasta:

- Aplicação de adjuvantes superplastificantes;
- Equilíbrio da razão água/material fino.

Redução do atrito entre as partículas:

- Baixar o volume de agregados grossos;
- Aumento do volume de pasta;
- Distribuição ótima dos finos relativamente aos agregados e cimento usados.

A avaliação desta propriedade pode ser realizada pelo estudo da fluidez e coesão do BAC (ensaio de espalhamento e/ou do funil V).

Capacidade de passagem e de deformabilidade

É habitualmente analisada com recurso aos ensaios de caixa L e/ou do anel J e representa a capacidade do betão de fluir dentro da cofragem por entre as armaduras ou aberturas estreitas, idealmente de forma uniforme e sem que ocorram bloqueios. Na Figura 2.2, é apresentado um esquema do funcionamento do mecanismo de bloqueio. Os bloqueios ocorrem em zonas estreitas onde os agregados grossos tendem a colidir, para ultrapassar os obstáculos, podendo assim adotar uma disposição que prejudique o correto fluxo de betão (Silva, 2013).

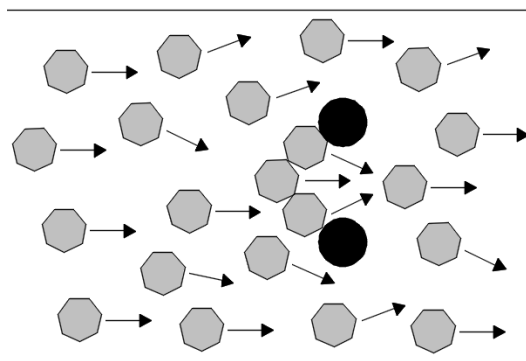


Figura 2.2 - Mecanismo de bloqueio

Para evitar a formação de bloqueios a dimensão e quantidade das partículas de maior dimensão devem ser consideradas e compatibilizadas com o espaçamento entre varões e zonas de maior confinamento da cofragem (Nepomuceno, 2005). O autor sugere ainda que para melhorar o comportamento do BAC, pode-se aprimorar a coesão para reduzir a segregação do agregado ou ajustar as características dos agregados grossos às aberturas do elemento a betonar, sendo que para cada um dos casos podemos adotar as seguintes medidas:

Melhoria da coesão:

- Diminuir a razão água/materiais finos;
- Utilização de modeladores de viscosidade.

Ajustar as características dos agregados grossos:

- Reduzido volume de agregados grossos;
- Reduzir a máxima dimensão dos agregados.

A viscosidade necessária para um BAC manter uma capacidade de passagem e de deformabilidade adequadas está diretamente relacionada com o diâmetro de espalhamento, no entanto, se a viscosidade for demasiado baixa o betão pode ter tendência a segregar.

Resistência à segregação

Silva (2013) considera que a resistência à segregação é a exigência mais importante a respeitar por um BAC durante o seu escoamento e em repouso.

A segregação de agregados é um fenómeno que pode ocorrer tanto na direção horizontal como na vertical durante o escoamento do betão, desta forma, um betão resistente à segregação apresenta os agregados grossos dispersos de forma uniforme (Nepomuceno, 2005).

O BAC quando comparado com o BC, tem uma maior tendência à ocorrência de segregação. Esta diferença de comportamento deve-se ao facto da auto-compatibilidade do BAC ser conseguida com a utilização de superplastificante que reduz a viscosidade do betão (Silva, 2013).

Dada esta condição, o BAC não deve evidenciar, no estado estacionário ou fluído, as seguintes formas de segregação (Khayat & Tangtermsirikul, 2000):

- Exsudação da água;
- Segregação da pasta ou do agregado;
- Segregação do agregado grosso que provoque bloqueios;
- Não uniformidade dos poros de ar.

A resistência à segregação pode ser avaliada através dos ensaios da caixa L, caixa U e ensaio de espalhamento.

2.1.4 Propriedades do BAC no estado endurecido

O estudo das propriedades do BAC no estado endurecido é essencial para prever o comportamento e assegurar a segurança na aplicação do betão. A análise passa geralmente pelo estudo do comportamento mecânico e da durabilidade, sendo as suas propriedades e requisitos no estado endurecido praticamente os mesmos de um BC (NP EN 206-1, 2007).

Como propriedades mecânicas temos a resistência mecânica, deformação por efeito de cargas e a retração. A durabilidade por sua vez implica o estudo dos fenómenos relacionados com a permeabilidade, porosidade, absorção de água, difusão e carbonatação.

2.1.4.1 Propriedades mecânicas

Resistência à compressão

A resistência à compressão é influenciada por vários fatores, nomeadamente, a razão A/C, o tipo de cimento, as propriedades dos agregados, as condições de cura, da microestrutura do betão, tipo de adições utilizadas e de adjuvantes (Bradu, Cazacu, Florea, & Mihai, 2016a).

Quanto à utilização de adições em substituição de cimento, as alterações no valor da resistência à compressão vão depender maioritariamente da percentagem de substituição estabelecida, da razão A/C e do tipo de adição. É, no entanto, comum encontrar referência em diversos trabalhos a um valor ótimo de percentagem de substituição até ao qual a adição tem um efeito benéfico para a resistência mecânica do betão, mas a partir do qual esta é prejudicada.

Bani, Joshaghani, & Hooton (2017), no seu trabalho experimental, desenvolveram e analisaram misturas binárias de BAC com substituição de cimento (10% até 50% com incrementos de 10%) por CV, escória granulada de alto forno (EGAF) e pó de pedra-pomes (PP), tendo verificado uma resistência à compressão semelhante à da amassadura de referência (sem

qualquer tipo de adição) com tendência a diminuir significativamente quando a percentagem de substituição é superior a 30%.

Mohamed (2011) que utilizou como adições para substituição do cimento, CV (10% até 40% com incrementos de 5% e ainda uma mistura com 50% de substituição) e SF (10%,15% e 20%). Ao analisar o efeito das duas adições no betão, é possível observar que as misturas apresentam um comportamento semelhante com tendência a favorecerem a resistência à compressão até se atingir o valor ótimo de substituição e a tomar o sentido oposto com o incremento da percentagem de substituição. Desta forma a autora estabelece que o valor ótimo para a utilização de CV e SF é, respetivamente, 30% e 15%.

Tração por compressão diametral

Esta propriedade está diretamente relacionada com a resistência à compressão, sendo condicionada por diversos fatores como a qualidade e tipo de agregado, distribuição granulométrica, idade do betão, tipo de cura, pela razão A/C e pela zona de transição agregado-pasta. No caso do BAC a zona de transição agregado-pasta tem especial importância, uma vez que é também afetada pelo tipo de superplastificante utilizado e por a maior dosagem de material fino (Parra, Valcuende, & Gómez, 2011).

Jalal, Ramezani pour, & Pool (2013) estudaram a produção de BAC com substituição parcial de cimento por CV (5%, 10% e 15%), mantendo a razão A/C constante e verificaram que quanto maior a substituição de cimento menor é a resistência do betão. Druta (2003) por sua vez, optou por manter constante a percentagem das adições 25%, 15% e 5% para, respetivamente, EGAF, CV e SF e variar a razão A/C (0,3, 0,4, 0,45, 0,5 e 0,6). Os resultados apresentados mostram que o aumento da referida razão provoca um decaimento da resistência do betão. Estes estudos sugerem que tanto o aumento da percentagem de substituição como da razão A/C afetam negativamente a resistência à tração por compressão diametral do betão.

Módulo de elasticidade

De acordo com a NP EN 1992-1-1 (2010), teoricamente o módulo de elasticidade de um betão pode ser calculado considerando apenas o valor da tensão média de rotura do betão à compressão, no entanto, a presente norma ressalva também que esta propriedade depende igualmente da constituição do betão, nomeadamente do tipo e quantidade de agregado utilizado e do seu respetivo módulo de elasticidade e ainda do volume de pasta na amassadura.

A percentagem de adição utilizada assim como a razão A/C influenciam igualmente esta propriedade. Bradu, Cazacu, Florea, & Mihai (2016b) utilizaram fíler calcário (FC) como adição e verificaram que o aumento da percentagem de substituição de cimento reduz o módulo de elasticidade do BAC. Por sua vez, Parra et al. (2011) utilizou igualmente FC como adição, mas optando por fazer variar a razão A/C em vez da percentagem de substituição. Com este procedimento os autores verificaram que o aumento desta razão conduz à redução módulo de elasticidade.

Retração

A retração é influenciada pelo tipo de cimento, razão A/C, condições ambientais (temperatura e humidade), o tipo e quantidade de adição utilizada, de agregados e das condições de cura (El-khoury, 2010).

Consiste essencialmente na mudança de dimensão sem que seja aplicado qualquer carregamento, sendo que pode ser avaliada pela junção da retração autogénea com a retração por secagem. A retração autogénea ocorre na fase de endurecimento do betão e deve-se ao consumo de água que advém das reações de hidratação do cimento. A retração por secagem, por sua vez, consiste na evaporação da água capilar ou livre para o ambiente (EPG, 2005).

Valcuende, Marco, Parra, & Serna (2012) produziram três misturas de BAC com substituição de cimento por FC e verificaram que a retração aumenta com o incremento da percentagem de substituição.

2.1.4.2 Durabilidade

A durabilidade de uma estrutura de betão armado depende sobretudo da permeabilidade da camada superficial do betão que tem a função de proteger as armaduras limitando a penetração e propagação dos agentes agressivos (dióxido de carbono, cloretos, sulfatos, alcalis, etc.) no seu interior. Esta propriedade é também condicionada pelos materiais utilizados, composição do betão, pelos cuidados com o processo de compactação e cura do betão e ainda da razão A/C (EPG, 2005).

Microestrutura do betão

A microestrutura do betão afeta significativamente a permeabilidade e consequentemente a sua durabilidade dado que é através da estrutura porosa que os agentes agressivos, presentes na água absorvida, penetram no betão (Amorim, 2008). O sistema de poros de um betão pode ser dividido em três tipos de poros: macro poros, poros capilares e micro poros, Figura 2.3, sendo os dois primeiros os mais relevantes para durabilidade do betão (Ferreira, 2007).

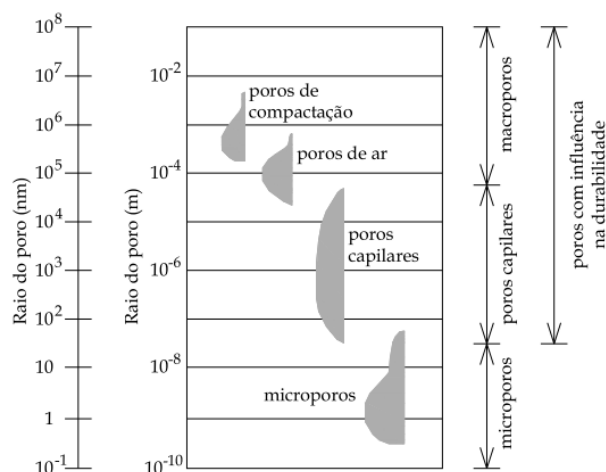


Figura 2.3 - Distribuição dos poros (Silva, 2013)

A dimensão dos poros é fortemente condicionada pelo processo de hidratação e por a razão A/C da mistura. O processo de hidratação condiciona a estrutura porosa do betão na medida em que, o aumento da duração do processo de cura ou da idade do betão faz com que o volume e dimensão dos poros capilares tenham tendência a diminuir (Silva, 2013).

Permeabilidade / Absorção de água

A permeabilidade do betão caracteriza a penetração e escoamento de fluídos através do sistema poroso do betão, estando este saturado, devido a um gradiente de pressão (Coutinho, 1998). O autor distingue ainda a porosidade do betão, como sendo a propriedade que corresponde à razão entre o volume de vazios e o volume total de betão.

Para avaliar a porosidade de um betão podemos recorrer ao ensaio de absorção de água por imersão ou de absorção de água por capilaridade, permitindo a avaliação indireta da permeabilidade do betão. O primeiro ensaio, permite a medição do volume de poros acessíveis, apresentando algumas limitações por não possibilitar uma avaliação do volume de poros fechados. O ensaio de absorção capilar, por sua vez, avalia a penetração de fluídos no interior do betão por diferença de pressão entre a superfície da água livre dos líquidos junto ao betão e a superfície dos poros capilares. A absorção capilar está diretamente relacionada com a porosidade aberta, velocidade de absorção por ascensão capilar e com a humidade relativa do betão (Amorim, 2008; Silva, 2013).

Difusão

A difusão corresponde ao mecanismo que possibilita a um fluído penetrar no interior do betão, podendo transportar iões agressivos, por ação de gradiente de concentração. Para avaliar esta propriedade é habitualmente utilizado um ensaio acelerado, por aplicação de uma corrente elétrica nos dois topos do provete, o que permite estudar o processo de difusão de iões num período temporal aceitável, dado que a simples aplicação de uma diferença de concentração entre os dois topos de uma amostra se revela um processo lento e pouco prático (Coutinho & Gonçalves, 1994).

Paralelamente a este método, é também comum a realização do ensaio de resistividade elétrica que possibilita uma avaliação indireta do fenómeno de difusão. Esta propriedade representa a maior ou menor dificuldade dos iões em se deslocarem no interior do betão e está diretamente relacionada com o teor de humidade do betão, temperatura e porosidade aberta do betão saturado (Silva, 2013).

Penetração de cloretos

A penetração de cloretos no BAC depende tanto da quantidade de adição utilizada como das possíveis variações da razão A/C que alteram a microestrutura do betão. Os cloretos podem ter origem externa, surgindo por contaminação do ambiente envolvente ao betão ou origem interna. Estando presentes nos materiais constituintes do betão, a penetração dos cloretos no interior do betão pode dar-se por ação capilaridade, permeabilidade ou por difusão. Ao

contactarem com a as armaduras de aço, na forma de cloretos livres, reduzem o pH da zona envolvente a estas para valores inferiores a seis, limitando a proteção das armaduras nessa zona (Silva, 2013).

Carbonatação

Tanto a utilização de adições como o aumento da razão A/C influenciam a carbonatação do BAC. O processo de carbonatação consiste numa reação química entre o dióxido de carbono presente no ar e os produtos de hidratação do cimento. Ao ocorrer, esta reação provoca a redução do pH do betão causando a despassivação das armaduras e posterior corrosão (Silva, 2013).

Barros (2008) indica que em betões onde se proceda à substituição parcial de cimento por uma determinada adição, situação habitual em BAC, se deve considerar que, a adição tanto pode prejudicar o comportamento do betão por reduzir o pH da pasta como por outro lado, favorecer a formação de betão com uma matriz mais densa e menos porosa reduzindo a penetração dos agentes agressivos.

2.2 Resíduos sólidos urbanos

De acordo com o disposto na alínea mm) do artigo 3.º do Decreto-Lei 73/2011, de 17 de Junho, que alterou e republicou o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, um resíduo urbano é um resíduo que tem origem em habitações ou que de acordo com a sua natureza ou composição se assemelhe ao resíduo proveniente de habitações.

Com o princípio de estabelecer uma política de prevenção de resíduos que os hierarquize, foi desenvolvida a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008 relativa aos resíduos, que prioriza as opções a tomar por a prevenção e redução, preparação para a reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e eliminação.

2.2.1 Produção de resíduos sólidos urbanos em Portugal

De acordo com o PERSU2020 (2014), em 2012, Portugal gerou um total de 4,8 milhões de toneladas de RSU, que corresponde a 34% do conjunto de resíduos produzidos. Destes, considera-se que os bio-resíduos, resíduos verdes (recolha em separado), vidro, compósitos, madeira, metais, papel/cartão e plástico, perto de 73% dos RSU produzidos, são os preferenciais para a reutilização e recuperação material.

O destino dos RSU pode passar por (Jardim, 2015; PERSU2020, 2014):

- Deposição em aterro, método mais comum, que deve ser feita de forma a não contaminar os solos, lençóis freáticos ou o ar;
- Recolha seletiva através de contentores distintos para a recolha de materiais como papel/cartão, plástico, embalagens de vidro e pilhas para reciclagem;

- Valorização orgânica por compostagem, processo biológico de decomposição controlado com recurso a microrganismos que transformam a matéria orgânica num composto passível de ser utilizado mais tarde para aplicação agrícola;
- Valorização energética com a obtenção de energia elétrica a partir da incineração de resíduos.

No mesmo ano, das 4,53 milhões de toneladas de RSU produzidos em Portugal Continental, 53,7% foram encaminhados para aterro, 12,4% alvo de recolha seletiva para posterior reciclagem, 15,7% sofreram uma valorização orgânica e os restantes 18,2% para valorização energética (PERSU2020, 2014).

2.2.2 Valorização energética: Incineração

O objetivo primário da gestão de resíduos é lidar com os resíduos produzidos tanto do ponto de vista ambiental como económico. Desta forma, a valorização energética, nomeadamente a incineração de RSU, quando comparada com os restantes métodos surge como a alternativa mais viável para a reduzir a quantidade de desperdícios que são depositados em aterro (Sabbas et al., 2003).

Existem diversas configurações possíveis de aplicar numa instalação de incineração, sendo estas classificadas de acordo com o sistema usado como (Quina, 2005):

- Queima em massa (queima de resíduos não submetidos a qualquer pré-tratamento);
- Queima seletiva (separação dos resíduos como combustíveis ou não combustíveis);
- Leito fluidizado.

No processo industrial de incineração, para o tratamento dos RSU, estes são conduzidos até à câmara de combustão do incinerador, sendo o calor libertado usado para produzir vapor numa caldeira que é posteriormente conduzido até um turbogerador para produzir eletricidade (Jardim, 2015).

O processo de combustão dos RSU por sua vez produz vários subprodutos relevantes, nomeadamente, as CV, os resíduos de controlo de poluição, as emissões gasosas, escórias (cinzas de fundo) de incineração e as águas residuais usadas no seu apagamento (Quina, 2005; Sabbas et al., 2003).

Quando comparado com os restantes métodos de tratamento de RSU a incineração apresenta as seguintes vantagens (Jardim, 2015; Quina, 2005):

- Redução da parte orgânica dos resíduos em 70% da massa e do volume em 90%;
- Rentabilidade do processo por permitir a valorização energética;
- Não necessitar de uma recolha seletiva ou pré-tratamento dos resíduos;
- Redução da quantidade de gases de efeito de estufa.

Por outro lado, apresenta algumas desvantagens:

- Impossibilita a valorização de alguns materiais com a reciclagem;

- Produção de resíduos sólidos que podem ser considerados perigosos;
- Elevados custos operacionais e de investimento;
- Necessidade de mão-de-obra técnica especializada.

2.2.2.1 Central de tratamento de RSU

A adição estudada no presente trabalho teve origem nos resíduos resultantes do tratamento e valorização de escórias da Valorsul S.A., empresa responsável pelo tratamento e valorização dos resíduos produzidos por 19 Municípios da Grande Lisboa e da Região Oeste (Alcobaça, Alenquer, Amadora, Arruda dos Vinhos, Azambuja, Bombarral, Cadaval, Caldas da Rainha, Lisboa, Loures, Lourinhã, Nazaré, Óbidos, Odivelas, Peniche, Rio Maior, Sobral de Monte Agraço, Torres Vedras e Vila Franca de Xira).

Para a correta gestão dos resíduos a Valorsul tem implementado um sistema integrado de gestão de RSU, Figura 2.4, que assegura que os processos de tratamento são executados de acordo com a composição e destino dos resíduos (Puna & Baptista, 2008).

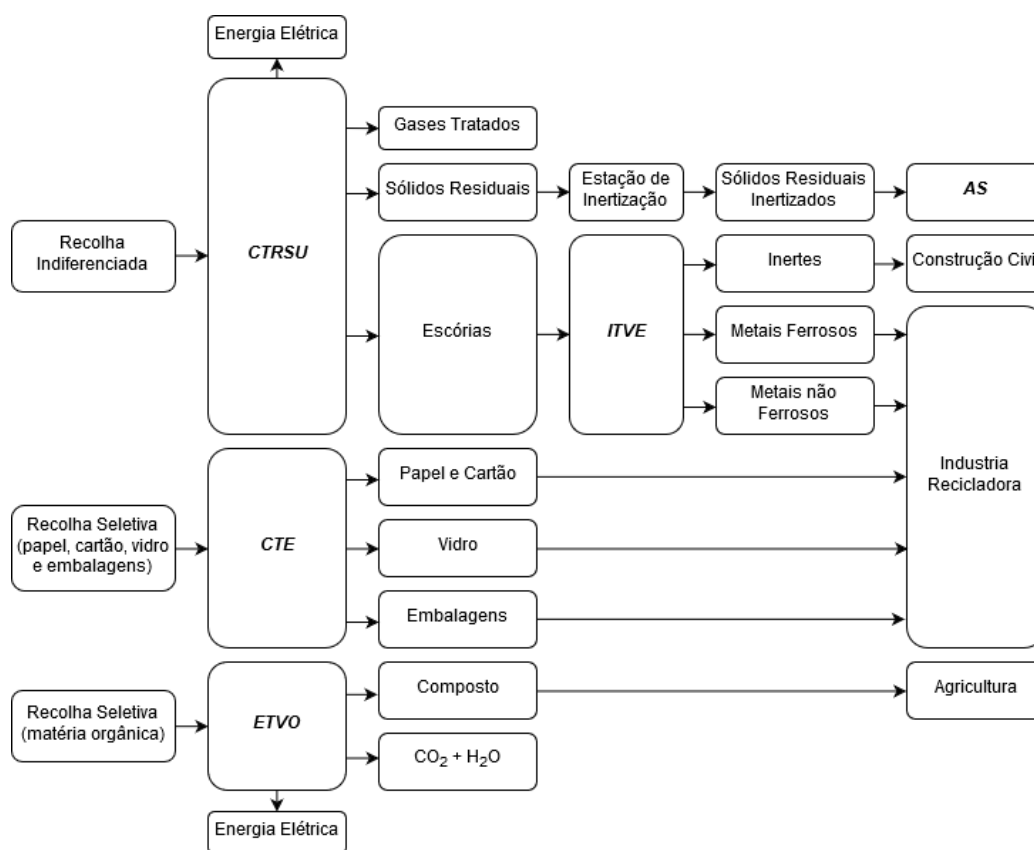


Figura 2.4 - Sistema integrado de gestão de RSU da Valorsul, (adaptado de Puna & Baptista (2008))

Este sistema é composto por cinco instalações essenciais, Central de Tratamento de RSU (CTRSU), Centro de Triagem e Ecocentro (CTE), Estação de Tratamento e Valorização Orgânica (ETVO), Aterro Sanitário (AS) e Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias (ITVE) (Puna & Baptista, 2008).

As escórias valorizadas usadas como adição no presente trabalho resultam da linha de inertes que deriva da ITVE.

2.2.3 Aplicabilidade das CFRSU

Atualmente, em Portugal, a utilização mais comum das CFRSU é como material de construção para camadas não ligadas de pavimentos rodoviários (LNEC DA 58, 2015). No entanto, como o objetivo de responder à procura de novos materiais que minimizem o impacto ambiental do setor da construção, diversos estudos têm sido desenvolvidos para validar a utilização de CFRSU na produção de argamassas e betões.

2.2.3.1 CFRSU em argamassas

No que respeita à produção de argamassas, os estudos desenvolvidos avaliam essencialmente as propriedades mecânicas. Li et al. (2012) utilizaram CFRSU como substituto parcial de cimento e verificaram uma redução da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição. Cheng (2012) obteve resultados idênticos de resistência à compressão, tendo ainda verificado um aumento da retração com a utilização de CFRSU.

2.2.3.2 CFRSU em betões

Quanto ao estudo em betões, Amat, Ismail, Noor, & Ibrahim (2017) substituíram parcialmente o cimento e verificaram que o aumento da substituição implica a redução da resistência à compressão do betão.

Ravasan (2014) realizou diversas amassaduras com substituição parcial do agregado fino por CFRSU e verificou uma redução da resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade do betão com o aumento da percentagem de substituição. Dixit, Jain, Kumawat, Swami, & Sharma (2016), ao substituírem agregado fino, observaram que a velocidade de ultrasons e a resistência mecânica aumentam até se alcançarem percentagens de substituição de 15% e 20%, respetivamente, diminuindo a partir desses valores. Pera, Coutaz, Ambroise, & Chababbet (1997), por sua vez, substituíram o agregado grosso e verificaram uma redução da resistência à compressão. Van Der Wegen, Hofstra, & Speerstra (2013), realizaram amassaduras com substituição de agregado fino e de agregado grosso, tendo apresentado valores de resistência à compressão e de difusão de cloretos que variaram de forma negativa com o aumento da percentagem de substituição, tendo a resistência à carbonatação por sua vez, apresentado uma evolução positiva para essa mesma variação.

2.2.4 Caracterização química das CFRSU

Para a caracterização química das cinzas foi feito um levantamento de diversos trabalhos onde é estudada a sua composição química.

Como elementos mais comuns temos o Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, e o Cl. A oxidação destes elementos, quanto sujeitos a um ambiente alcalino, produz os respetivos óxidos que, por sua vez, representam aproximadamente 80% a 90% do peso das CFRSU. A presença de elementos metálicos como Pb, Cu, Zn, Cd, Cr e Ni é igualmente habitual, ao reagirem os metais produzem hidróxidos que provocam a expansão das cinzas (Dou et al., 2017). Os autores

realçam também a possibilidade de as CFRSU apresentarem, quando se verifique uma elevada concentração de cálcio, um comportamento hidráulico similar ao do cimento.

Amat et al. (2017), ao recorrerem ao ensaio de espectroscopia de raios X (EDS) identificaram os elementos Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, e o Cl e os óxidos SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, Na₂O e K₂O como sendo os mais comuns. Os autores salientam igualmente a possibilidade de as CFRSU poderem apresentar um comportamento hidráulico ou mesmo alguma atividade pozolânica.

O estudo desenvolvido por Pavlík, Keppert, Pavlíková, Volfová, & Černý (2011), avalia a substituição de agregado fino por CFRSU em argamassas. Para caracterizar a adição, os autores realizaram o ensaio de EDS e confirmaram a existência de óxidos dos elementos mais comuns identificados anteriormente, nomeadamente: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O. Relativamente aos elementos metálicos os autores verificaram a presença de ZnO.

Gao, Yuan, Yu, & Brouwers (2017), recorreram ao mesmo ensaio e verificaram a presença dos elementos mais comuns das CFRSU, tendo registado, no entanto uma maior variedade de elementos metálicos, com presença de Cr₂O₃, NiO, CuO, ZnO e PbO.

Na Tabela 2.1, apresenta-se uma análise química representativa das CFRSU, em função dos resultados obtidos por Amat et al. (2017), Gao et al. (2017), Li et al. (2012) e Pavlík et al. (2011), com especial incidência sobre os elementos referidos.

Tabela 2.1 - Composição química das CFRSU

Composição química	Valor [%]
Al	4,07
Ca	63,94
Cl	1,10
Cr	0,12 - 0,17
Cu	0,27
Fe	4,47
K	2,83
Si	9,59
Al ₂ O ₃	12,04 - 18,61
CaO	19,40 - 43,12
Cr ₂ O ₃	0,15
CuO	0,87
Fe ₂ O ₃	5,50 - 9,31
K ₂ O	0,85 - 2,29
MgO	1,32 - 2,12
Na ₂ O	1,32 - 3,60
NiO	0,04
PbO	0,32
SiO ₂	19,12 - 59,59
ZnO	0,80 - 1,29

É de ressaltar, que a composição química das CFRSU depende inevitavelmente do processo de incineração, do tratamento aplicado e do tipo de RSU.

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL LABORATORIAL

A campanha experimental realizada teve como objetivo o estudo do comportamento do BAC, com incorporação de CFRSU, no estado fresco e endurecido. Desta forma, o capítulo inicia-se pela formulação e seleção das misturas utilizadas, focando-se posteriormente na produção de argamassas e betões auto-compactáveis, na caracterização dos materiais utilizados e nos ensaios utilizados para verificar a sua conformidade das misturas de BAC.

3.1 Formulação e seleção das misturas

A composição de um betão afeta o seu comportamento tanto no estado fresco como no estado endurecido. O BAC, em particular, deve apresentar no estado fresco um comportamento auto-compactável adequado e no estado endurecido uma massa homogénea, compacta, durável, reduzida porosidade assegurando a proteção contra os agentes agressivos e um comportamento mecânico adequado.

O presente trabalho, ainda que não o tenha seguido na íntegra, assentou sobre o método proposto por Nepomuceno (2005) na sua tese de doutoramento que tem por base o método de Okamura et al. (2000) e da JSCE (1998).

3.1.1 Seleção das misturas

Como referido no capítulo 1, foram produzidas cinco misturas binárias de BAC de acordo com a NP EN 206-9 (2010), com o objetivo de abranger uma gama alargada de substituição de cimento. De forma a facilitar a identificação das misturas de BAC produzidas, estas foram designadas por:

- REF – Substituição de 30% de cimento por CV;
- B 20 – Substituição de 20% de cimento por CFRSU;
- B 30 – Substituição de 30% de cimento por CFRSU;
- B 40 – Substituição de 40% de cimento por CFRSU;
- B 50 – Substituição de 50% de cimento por CFRSU.

Para determinar as quantidades de amassadura, o estudo foi dividido em duas etapas, a primeira centrou-se na análise de argamassas auto-compactáveis para estabelecer os parâmetros a utilizar no cálculo das quantidades de amassadura das misturas. A segunda etapa, consistiu na produção de amassaduras de BAC a partir dos parâmetros das argamassas.

3.1.1.1 Estudo em argamassas

Nesta etapa, no que respeita aos parâmetros de composição das misturas, foi necessário estabelecer algumas diretrizes para que se conseguisse avaliar diretamente o efeito da variação das diferentes percentagens de substituição de cimento no comportamento da argamassa.

Em função dos resultados obtidos por Silva (2013), definiu-se como constante a razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos (cimento e adições) e de agregados finos da mistura, (V_p/V_s), em 0,80;

Para cada mistura, a razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e materiais finos (V_w/V_p) e a razão percentual, em massa, entre as quantidades totais de superplastificante e materiais finos na mistura ($S_p/p\%$), variou de acordo com a necessidade de água e S_p .

Tendo em conta estas premissas e considerando os resultados de Silva (2013), para a realização das amassaduras das diferentes misturas, começou-se por utilizar valores iniciais de V_w/V_p e $S_p/p\%$ que foram sendo modificados conforme as necessidades de trabalhabilidade requeridas em cada mistura (não ocorrer segregação ou exsudação, conseguindo ainda assim um espalhamento satisfatório). Para além das condições de trabalhabilidade, as alterações feitas aos referidos parâmetros tiveram em consideração que o objetivo último desta fase, era estabelecer, para estes, valores comuns a todos as misturas de forma a estudar efetivamente os efeitos que as diferentes percentagens de substituição produzem, para numa fase posterior servirem como base ao estudo em betões. Concluídas as amassaduras das diferentes misturas, fixou-se os valores a utilizar em $V_w/V_p = 0,8$ e $S_p/p\% = 0,75$, para a mistura REF e em $V_w/V_p = 1,0$ e $S_p/p\% = 1,0$ para as restantes.

3.1.1.2 Estudo em betões

Nesta fase foi estabelecido que o volume de vazios (V_v) é constante ($0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e que tanto entre agregados finos (areias) como grossos (britas), se utilizaria uma proporção em volume absoluto de 50%, ou seja, uma razão para as areias $0,5 \text{ Areia}_{0/2} + 0,5 \text{ Areia}_{0/4}$ e para as britas de $0,5 \text{ Brita}_1 + 0,5 \text{ Brita}_2$.

Para determinar as quantidades de amassadura das diferentes misturas, foram utilizados os parâmetros estabelecidos na fase de argamassas e o produto entre V_p/V_s e a razão, em volume absoluto, entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos na mistura (V_m/V_g).

A composição dos BAC produzidos para cada mistura é apresentada de forma sucinta da Tabela 3.1 à Tabela 3.5, podendo ser consultado no anexo A.1 os parâmetros auxiliares de cálculo.

Tabela 3.1 - Composição do betão REF

Composição de betão-autocompactável						
Mistura - REF			Quantidades teóricas para 1 m ³			
Parâmetros da composição	V _p /V _s	0,80		Cimento	[kg]	482,39
	V _w /V _p	0,80		CV	[kg]	151,43
	S _p /P%	0,75		CRSU	[kg]	0,00
	V _m /V _g	2,275		S _p	[l]	4,44
	V _v [m ³]	0,03		S _p	[kg]	4,75
	Cimento	142,5 R		Água	[l]	175,57
	f _{ad} (CV+CFRSU)	0,30		Areia 0/2	[kg]	353,89
	CV	0,30		Areia 0/4	[kg]	349,78
	CFRSU	0,00		Brita 1	[kg]	383,56
Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50	Brita 2	[kg]	390,96	
	Areia 0/4	0,50	A/C		0,364	
	Brita 1	0,50	A/MC		0,277	
	Brita 2	0,50	A/MF		0,277	
			Massa total	[kg]	2292,33	

Tabela 3.2 - Composição do betão B 20

Composição de betão-autocompactável						
Mistura - B 20			Quantidades teóricas para 1 m ³			
Parâmetros da composição	V _p /V _s	0,80		Cimento	[kg]	495,53
	V _w /V _p	1,00		CV	[kg]	0,00
	S _p /P%	1,00		CRSU	[kg]	98,63
	V _m /V _g	2,275		S _p	[l]	5,55
	V _v [m ³]	0,03		S _p	[kg]	5,94
	Cimento	142,5 R		Água	[l]	197,27
	f _{ad} (CV+CFRSU)	0,20		Areia 0/2	[kg]	318,09
	CV	0,00		Areia 0/4	[kg]	314,39
	CFRSU	0,20		Brita 1	[kg]	418,72
Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50	Brita 2	[kg]	426,80	
	Areia 0/4	0,50	A/C		0,398	
	Brita 1	0,50	A/MC		0,398	
	Brita 2	0,50	A/MF		0,332	
			Massa total	[kg]	2275,37	

Tabela 3.3 - Composição do betão B 30

Composição de betão-autocompactável						
Mistura - B 30			Quantidades teóricas para 1 m ³			
Parâmetros da composição	V _p /V _s	0,80		Cimento	[kg]	451,88
	V _w /V _p	1,00		CV	[kg]	0,00
	S _p /P%	1,00		CRSU	[kg]	154,19
	V _m /V _g	2,275		S _p	[l]	5,66
	V _v [m ³]	0,03		S _p	[kg]	6,06
	Cimento	142,5 R		Água	[l]	205,59
	f _{ad} (CV+CFRSU)	0,30		Areia 02	[kg]	331,51
	CV	0,00		Areia 04	[kg]	327,65
CFRSU	0,30	Brita 1		[kg]	383,56	
Mistura de agregados	Areia 02	0,50	Brita 2	[kg]	390,96	
	Areia 04	0,50	A/C		0,455	
	Brita 1	0,50	A/MC		0,455	
	Brita 2	0,50	A/MF		0,339	
			Massa total	[kg]	2251,39	

Tabela 3.4 - Composição do betão B 40

Composição de betão-autocompactável						
Mistura - B 40			Quantidades teóricas para 1 m ³			
Parâmetros da composição	V _p /V _s	0,80		Cimento	[kg]	387,39
	V _w /V _p	1,00		CV	[kg]	0,00
	S _p /P%	1,00		CRSU	[kg]	205,62
	V _m /V _g	2,275		S _p	[l]	5,54
	V _v [m ³]	0,03		S _p	[kg]	5,93
	Cimento	142,5 R		Água	[l]	205,62
	f _{ad} (CV+CFRSU)	0,40		Areia 02	[kg]	331,57
	CV	0,00		Areia 04	[kg]	327,71
CFRSU	0,40	Brita 1		[kg]	383,56	
Mistura de agregados	Areia 02	0,50	Brita 2	[kg]	390,96	
	Areia 04	0,50	A/C		0,531	
	Brita 1	0,50	A/MC		0,531	
	Brita 2	0,50	A/MF		0,347	
			Massa total	[kg]	2238,37	

Tabela 3.5 - Composição do betão B 50

Composição de betão-autocompactável						
Mistura - B 50			Quantidades teóricas para 1 m ³			
Parâmetros da composição	V_p/V_s	0,80		Cimento	[kg]	322,89
	V_w/V_p	1,00		CV	[kg]	0,00
	$S_p/P\%$	1,00		CRSU	[kg]	257,08
	V_m/V_g	2,275		S_p	[l]	5,42
	V_v [m ³]	0,03		S_p	[kg]	5,80
	Cimento	142,5 R		Água	[l]	205,66
	f_{ad} (CV+CRSU)	0,50		Areia 0/2	[kg]	331,63
	CV	0,00		Areia 0/4	[kg]	327,77
	CRSU	0,50		Brita 1	[kg]	383,56
Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50	Brita 2	[kg]	390,96	
	Areia 0/4	0,50	A/C		0,637	
	Brita 1	0,50	A/MC		0,637	
	Brita 2	0,50	A/MF		0,355	
			Massa total	[kg]	2225,34	

3.2 Processo de fabrico

Todas as misturas em argamassas e betões foram executas nas instalações do Laboratório de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, onde foram armazenados todos os materiais num ambiente devidamente controlado e adequado aos requisitos de cada um. A medição dos materiais foi feita com recurso a uma balança eletrónica com a capacidade máxima de 30 kg e uma divisão de escala de 1 g.

3.2.1 Produção de argamassas

Para o estudo em argamassas foram produzidas diversas amassaduras para cada mistura, todas aplicando o mesmo procedimento, até se obterem as propriedades reológicas pretendidas. A sequência de amassadura seguida para as misturas de argamassas foi a adotada por Silva (2013), Figura 3.1, sendo que para a sua execução foi utilizada uma misturadora com temporizador incorporado, Figura 3.2, destinada à produção de pastas e argamassas normalizadas.

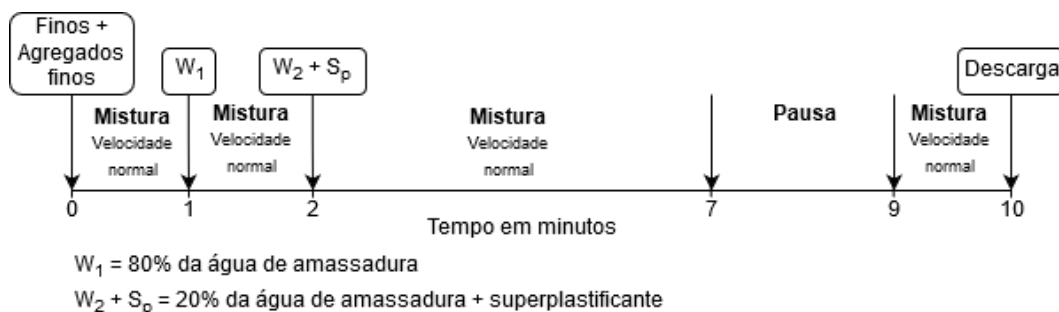


Figura 3.1 - Sequência de amassadura para as misturas de argamassas, (adaptado de Silva (2013))



Figura 3.2 - Misturadora utilizada para misturar as argamassas

A sequência de amassadura demora 10 minutos e tem início com a colocação dos finos e dos agregados, com posterior mistura, durante um minuto. Ao fim desse minuto é introduzida, de forma lenta e sem interrupção do processo de mistura para conseguir uma distribuição o mais homogênea possível, a primeira parcela de água (80% da água de amassadura) e misturada por mais um minuto. Ao fim dos dois minutos é adicionada, da mesma forma que o processo anterior, a segunda parcela de água (20% da água de amassadura com superplastificante). Passados mais cinco minutos de mistura, a misturadora é desligada ficando a amassadura em repouso durante dois minutos (se necessário, nesta fase pode-se proceder à limpeza da pá da misturadora). Passados esses dois minutos, a misturadora é ligada por mais um minuto e no fim desse período iniciam-se os ensaios no estado fresco.

3.2.2 Produção de betões

Para a realização das amassaduras de betão foi seguido o mesmo procedimento que nas misturas de argamassas.

A Figura 3.3 ilustra a sequência de amassadura adotada para as misturas de betão. A betoneira utilizada foi a apresentada na Figura 3.4, para a medição dos tempos foi utilizado um cronómetro eletrónico.

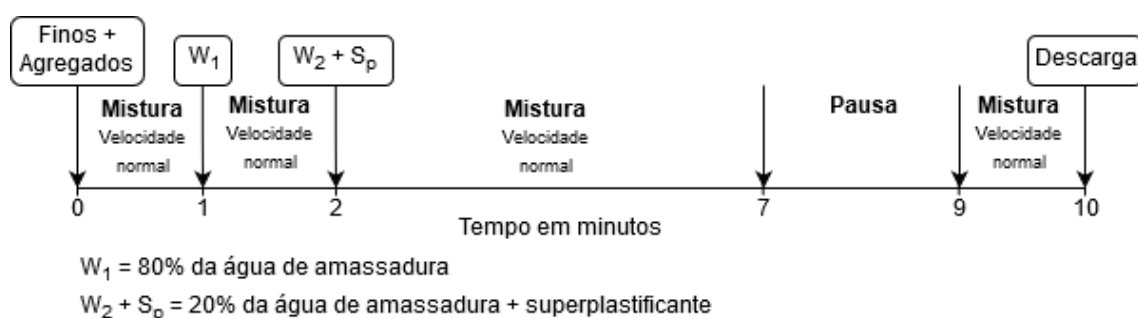


Figura 3.3 - Sequência de amassadura para as misturas de betão, (adaptado de Silva (2013))



Figura 3.4 - Betoneira misturadora utilizada para as misturas de betão

3.3 Seleção, preparação e caracterização dos materiais utilizados

A escolha dos materiais a utilizar na presente campanha experimental teve por base a produção de betões em que os materiais são de fácil aquisição no mercado local e que sejam correntemente utilizados no fabrico de BC.

3.3.1 Ligante

Como ligante foi utilizado o Cimento Portland Normal do tipo CEM I 42,5 R da Cimpor, classificado de acordo com a NP EN 197-1 (2012), produzido na fábrica de Alhandra e fornecido em sacos de 25 kg. O cimento é constituído essencialmente por clínquer (superior a 95%), tendo valores mínimos de resistência à compressão para os dois dias e para os 28 dias de, respetivamente, 20 MPa e 42,5 MPa.

3.3.2 Adições

Para a realização do presente trabalho foram utilizadas duas adições distintas, CV, utilizadas para a produção da mistura REF, de acordo com NP EN 450-1 (2012) e NP EN 450-2 (2006) e cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos para as restantes misturas, de acordo com DA 58 (2015) e NP EN 13242:2002+A1 (2010).

3.3.2.1 Cinzas volantes

As CV foram fornecidas pela EDP – Gestão da produção de Energia, S.A. e produzidas na fábrica do Centro de Produção de Sines.

Nas Tabela 3.6 e Tabela 3.7, são apresentadas as características físicas e químicas das CV, fornecidas pela empresa fabricante.

Tabela 3.6 - Características físicas das CV

Propriedades		Valores
Massa Volúmica	[kg/m ³]	2300
Superfície específica	[cm ² /g]	3210
Resíduo de peneiração (45 µm)	[%]	< 15
Humidade	[%]	0,01 – 0,30

Tabela 3.7 - Características químicas das CV

Análise química		Valores [%]
Óxido de alumínio	Al_2O_3	24,70
Óxido de cálcio	CaO	2,63
Cloretos	Cl^-	< 0,01
Óxido de ferro	Fe_2O_3	5,40
Óxido de potássio	K_2O	1,112
Óxido de magnésio	MgO	1,01
Óxido de sódio	Na_2O	0,89
Óxido de silício	SiO_2	54,70
Sulfatos	SO_3	1,38
Perda ao fogo	PF	5,10

3.3.2.2 CFRSU

As CFRSU foram disponibilizadas pela empresa Valorsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos das Regiões de Lisboa e do Oeste, S.A. – Vila Franca de Xira e correspondem ao lote, já maturado, de março de 2017.

Ao serem recolhidas na CTRSU, as escórias são encaminhadas para a ITVE onde são condicionadas por pilhas em lotes mensais, que terão de passar obrigatoriamente por um período de maturação de três meses antes de poderem servir qualquer fim, Figura 3.5. Neste período são expostas às condições atmosféricas com o objetivo de dar tempo para que o potencial de lixiviação dos metais se reduza através das reações potenciadas pelo contacto com o meio envolvente (LNEC DA 58, 2015).

O processamento das escórias realizado da ITVE, é feito por uma linha de tratamento que tem início com a passagem do material, concluído o período de maturação, por uma grelha metálica com abertura de 250 mm por 300 mm para remover o material de maior dimensão. O material que passa pela grelha é de seguida encaminhado para um crivo rotativo, Figura 3.5, que o vai separar em três grupos de dimensões distintas, entre 0 mm e 12 mm, dos 12 mm aos 35 mm e os elementos com dimensão superior a 35 mm (LNEC DA 58, 2015).

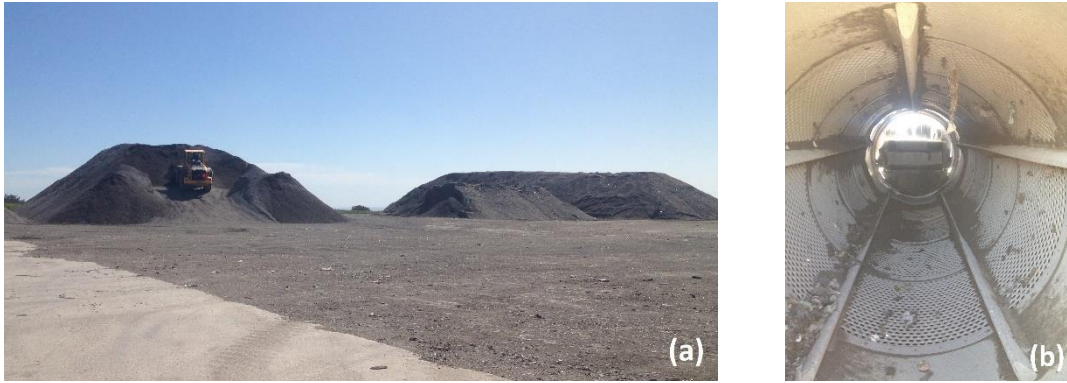


Figura 3.5 - Pilhas mensais de escórias (a), crivo rotativo (b)

A primeira parcela granulométrica (0 mm a 12 mm) é separada no primeiro troço do crivo e direcionada para a linha de escórias processadas. A segunda fração granulométrica (12 mm a 35 mm) depois de separada pelo crivo é encaminhada para um separador eletromagnético para separar os metais ferrosos e para um separador de correntes Foucault para os metais não ferrosos, ambos direcionados, por sua vez, para a reciclagem, o material não metálico resultante, junta-se à primeira fração para serem condicionadas na pilha do lote mensal a que correspondem. Para o material com dimensão superior a 35 mm, são removidos os materiais inqueimados (papel, plástico, cartão, etc.) e por separação eletromagnética os metais ferrosos, encaminhados para reciclagem, sendo o restante material rejeitado (LNEC DA 58, 2015).

Preparação das CFRSU em laboratório

A preparação das CFRSU, realizou-se no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, tendo o seu condicionamento sido feito por meio de barricas metálicas devidamente seladas.

A preparação das CFRSU tem início com a sua secagem em estufa a uma temperatura de 105 °C até se atingir massa constante. De seguida, para reduzir a granulometria das CFRSU, foram colocados lotes individuais de 16 kg de material juntamente com esferas metálicas na máquina de Los Angeles, Figura 3.6, iniciando-se de seguida a moagem das CFRSU.



Figura 3.6 - Máquina de Los Angeles

O processo de moagem consistiu numa primeira fase em produzir lotes para os tempos de moagem de 1 h, 2 h, 3 h, 4 h e 5 h, Figura 3.7.



Figura 3.7 - Tempos de moagem das CFRSU

Nesta fase, através de análise visual e do manuseamento do material moído excluíram-se os quatro lotes tempos uma vez que ainda era possível identificar facilmente partículas como elementos cerâmicos, vidros, metais, etc., passíveis de apresentarem uma dimensão mais reduzida desde que moídos durante mais tempo.

Para os dois últimos tempos de moagem, 4 h e 5 h, não foram identificadas diferenças entre estes, tanto por análise visual como pelo manuseamento do material. Desta forma, por impossibilidade de realizar uma peneiração por via húmida, foi feito para ambos uma peneiração a seco que, ainda que não permita avaliar de forma correta a granulometria das CFRSU, possibilitou uma avaliação do material passado nos peneiros de 1 mm, 0,5 mm, 0,125 mm e 0,063 mm. Ao analisar os resultados dos dois lotes, verificou-se que a quantidade de material passado por estes peneiros era semelhante, por esse motivo optou-se por replicar o lote de 4h.

Depois do processo de moagem e antes de serem utilizadas para produzir argamassas ou betões, as CFRSU passaram pelo peneiro com abertura de malha de 1 mm para remover os resíduos de maior dimensão. Só depois deste processo é que foi realizada a pesagem para cada uma das amassaduras de argamassa e betão.

Caracterização das CFRSU

Para caracterizar as CFRSU foi realizado, no Instituto Superior Técnico, o ensaio de difração de raios X (DRX), Figura 3.8, e determinado o índice de atividade (IA) para avaliar a pozolanicidade da adição, Tabela 3.8.

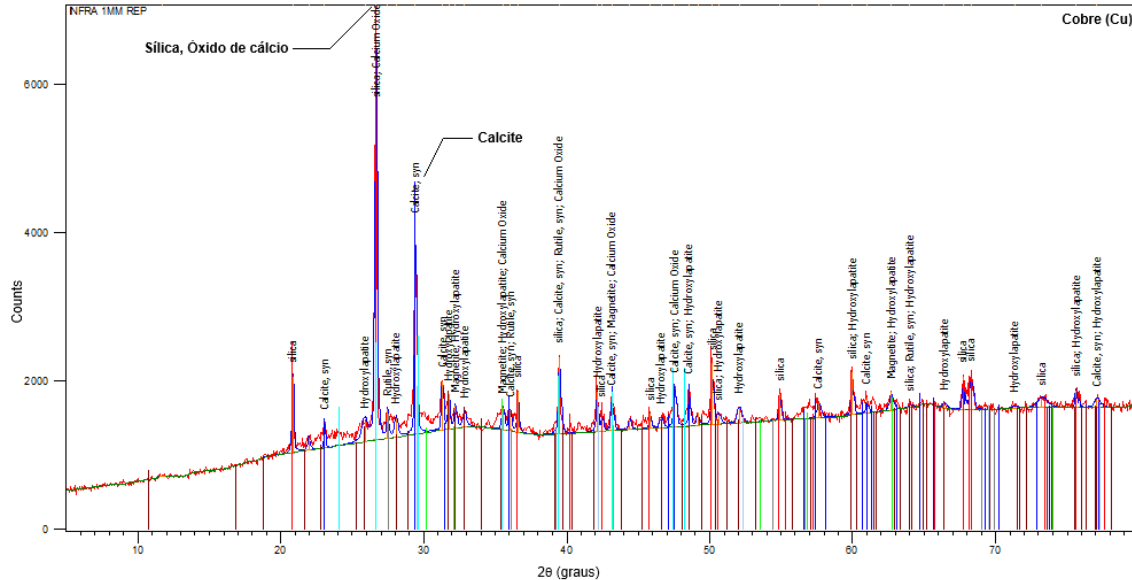


Figura 3.8 - Difração de raios X das CFRSU

A determinação do IA das CFRSU e das CV teve por base o estabelecido na norma NP EN 450-2 (2006).

Desta forma, foram produzidas três argamassas, a primeira apenas com cimento, amassadura de referência, e a segunda e terceira onde este é substituído, respetivamente, por 25% de CV e 25% CFRSU. O IA é representado pela razão percentual entre os provetes com 25% de substituição e os provetes de referência só com cimento para os 28 e 91 dias de idade.

Tabela 3.8 - Índice de atividade

Adição	Índice de atividade (%)	
	28 dias	91 dias
CV	83,41	92,66
CFRSU	36,65	34,75

De acordo com a referida norma, um material é considerado pozolânico quando o seu índice de atividade para os 28 dias e 91 dias é, respetivamente, superior a 75% e 85%. Desta forma e considerando os valores obtido para o IA, podemos dizer que as CFRSU, ao contrário das CV, não são pozolânicas.

A capacidade de absorção de água das CFRSU foi igualmente avaliada, Figura 3.9. Para tal, colocou-se uma quantidade cinzas no interior de um recipiente graduado que foi cheio com água até um limite fixo. A metodologia seguida para esta análise, consistiu em deixar o recipiente em repouso e realizar leituras, em intervalos fixos, da descida do nível da água à medida que

esta é absorvida pelas CFRSU, durante 24 horas. Com os dados recolhidos, o objetivo último passou por traçar a curva de absorção de água ao longo do tempo.

Concluídas as 24 h, verificou-se uma variação nula do nível da água, onde apenas as partículas em contacto com a água na camada superior ficaram húmidas, tendo as restantes permanecido secas. Analisando, empiricamente, os resultados obtidos, verificou-se que as CFRSU não absorvem água.



Figura 3.9 - Ensaio de absorção de água

O comportamento registado, poderá também ter sido influenciado pelo facto de as CFRSU terem apresentado indícios alguma hidrofobicidade.

3.3.3 Adjuvante

Foi utilizado o adjuvante SikaPlast 898 do tipo superplastificante/forte redutor de água para betão de acordo com NP EN 934-1 (2008) e NP EN 934-2:2009+A1 (2012), fornecido pela empresa Sika.

Na Tabela 3.9, são apresentados os dados técnicos do adjuvante utilizado presentes na ficha de produto da empresa fabricante.

Tabela 3.9 - Características técnicas do superplastificante

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

3.3.4 Agregados

Para a execução do presente trabalho foram utilizados quatro agregados distintos, dois tipos de areia siliciosas: areia fina 0/2, fornecida pela empresa Sulinerte e areia grossa 0/4,

fornecida pela empresa Siavernil. e dois de brita calcária: brita 1 e brita 2, ambas fornecidas pela empresa José Marques Galo, SA.

Para a caracterização dos agregados foi avaliada a sua massa volúmica, baridade, absorção de água e a análise granulométrica, de acordo com a NP EN 12620:2002+A1 (2010).

Na Tabela 3.10 e Tabela 3.11 são observáveis as características dos agregados utilizados e na Figura 3.10 as suas curvas granulométricas.

Tabela 3.10 - Características dos agregados

Propriedades		Agregado fino		Agregado grosso	
		Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
Massa volúmica	[kg/m ³]	2580	2550	2590	2640
Baridade	[kg/m ³]	1683	1633	1475	1540
Absorção de água	[%]	0,75	1,13	1,46	0,78
Equivalente de areia	[%]	96	95	-	-

Tabela 3.11 - Análise granulométrica dos agregados

Série de peneiro	Malha [mm]	Porcentagem acumulada do material passado nos peneiros [%]			
		Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
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

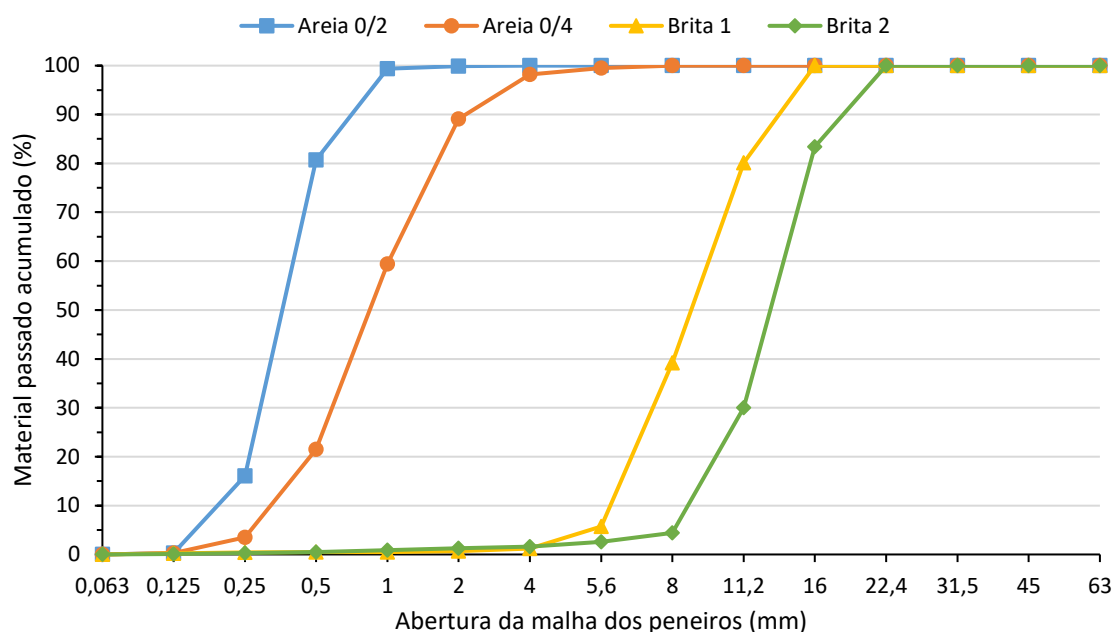


Figura 3.10 - Curvas granulométricas dos agregados

3.4 Ensaios no estado fresco

Para estudar o comportamento do BAC no estado fresco tiveram de ser desenvolvidas novas técnicas de ensaio, pois os ensaios tradicionalmente utilizados para a caracterização do BC não permitem a avaliação do comportamento do BAC.

Os novos ensaios foram concebidos de forma a serem fáceis de realizar e a permitirem a sua aplicação “in situ”, tendo como objetivo avaliar a capacidade de escoamento e enchimento, passagem e deformabilidade e resistência à segregação do betão auto-compactável. Apesar de não ser possível analisar isoladamente cada uma das propriedades, a realização dos diferentes ensaios possibilita a combinação das várias propriedades e fornece garantias relativamente à trabalhabilidade do BAC (Nepomuceno, 2005).

Os ensaios no estado fresco em argamassas e betões foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

3.4.1 Ensaios em argamassas

3.4.1.1 Ensaio e espalhamento no mini-cone

Dada a inexistência de normativas nacionais ou internacionais para realizar o ensaio de espalhamento no mini-cone, foram seguidos os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno (2005).

O equipamento utilizado é um molde tronco cónico, Figura 3.11.

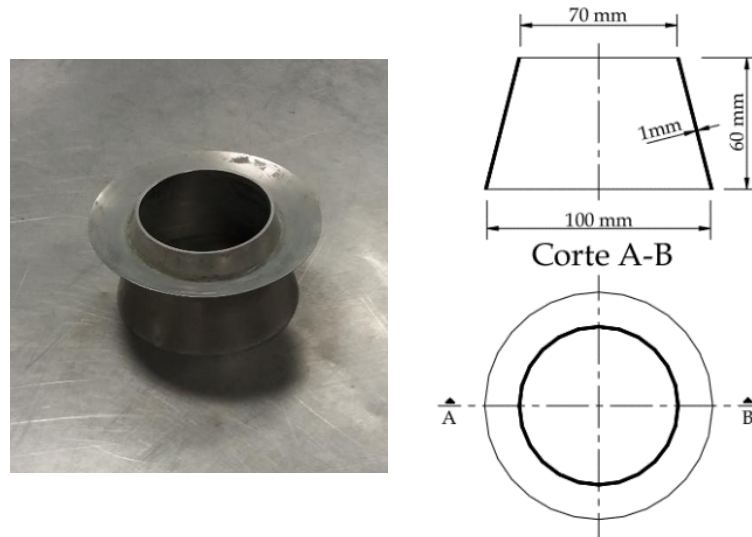


Figura 3.11 - Mini-cone utilizado no ensaio de espalhamento em argamassas

Seguidamente é resumidamente apresentado o procedimento pelo qual se regeu o ensaio:

- 1) Verificar e assegurar o correto nivelamento da mesa de ensaio;
- 2) Limpar a mesa e o cone, humedecendo de seguida as superfícies interiores do molde e da mesa, mas evitando que se formem zonas de concentração de água;
- 3) Encher o molde de uma só vez sem agitar ou compactar e rasar a superfície superior do molde removendo o material que se possa ter depositado sobre a mesa;
- 4) Remover o molde suavemente na vertical e aguardar que 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, em mm.

A partir do valor do diâmetro médio de espalhamento (D_m) optem-se a área de espalhamento relativa (G_m), equação (3.1):

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

Onde:

G_m – Área de espalhamento relativa;

D_m – Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

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

3.4.1.2 Ensaio de escoamento no mini-funil V

Uma vez que, tal como no caso anterior, não existem normativas nacionais ou internacionais para a realização do ensaio de escoamento no mini-funil V, Figura 3.12, foram seguidos os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno (2005).

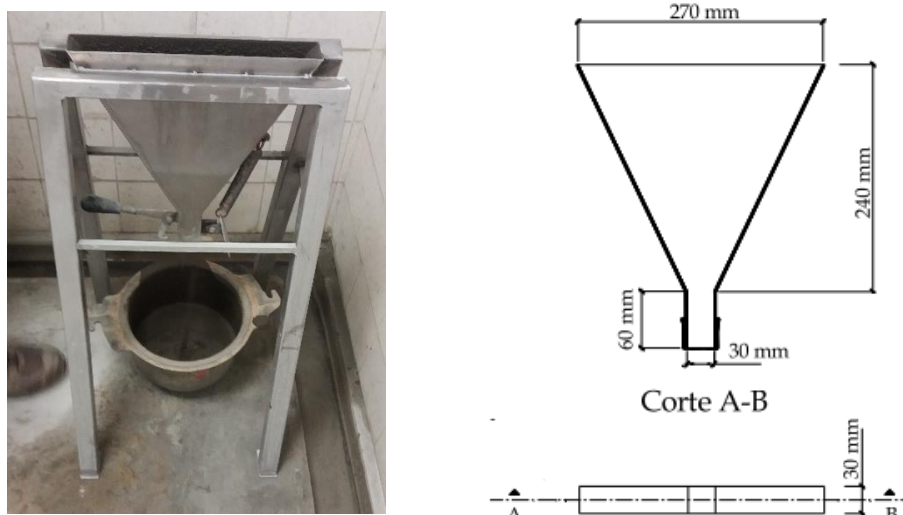


Figura 3.12 - Mini-funil V utilizado no ensaio de escoamento em argamassas

Seguidamente é apresentado de forma sucinta o procedimento seguido para a realização do ensaio:

- 1) Verificar e garantir o correto nivelamento e fixação do equipamento de ensaio para que não este não se mova durante a realização do ensaio;
- 2) Limpar o mini-funil V, humedecendo de seguida as suas superfícies interiores, tendo o cuidado de evitar que se formem zonas de concentração de água;
- 3) Sem utilizar qualquer vibração ou agitação, encher totalmente o funil 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 (t) decorre entre o instante em que a tampa inferior é aberta e o momento em que, observando o funil de cima e na vertical, é visível o primeiro raio de luz.

Para determinar o valor da velocidade relativa de escoamento (R_m) em função do tempo de escoamento (t), foi considerada a equação (3.2):

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

Sendo:

R_m – Velocidade relativa de escoamento, em s^{-1} ;

t – Tempo de escoamento, em segundos.

3.4.2 Ensaio em betões

Para facilitar a adoção dos ensaios, estes podem ser divididos em dois grupos: O primeiro grupo contem os ensaios de espalhamento e do funil V que permitem avaliar o comportamento reológico do betão no estado fresco, o segundo grupo de ensaios possibilita o estudo da auto-compatibilidade do betão e deste fazem parte o ensaio da caixa, caixa U e caixa L (Nepomuceno, 2005).

3.4.2.1 Ensaio de espalhamento

A execução do ensaio de espalhamento seguiu o exposto na norma NP EN 12350-8 (2010), consiste na determinação do tempo de escoamento até se atingir diâmetro de 500 mm e do diâmetro médio de espalhamento, avaliando assim a fluidez e a velocidade de escoamento dos BAC na ausência de obstáculos.

Os equipamentos utilizados são apresentados na Figura 3.13.

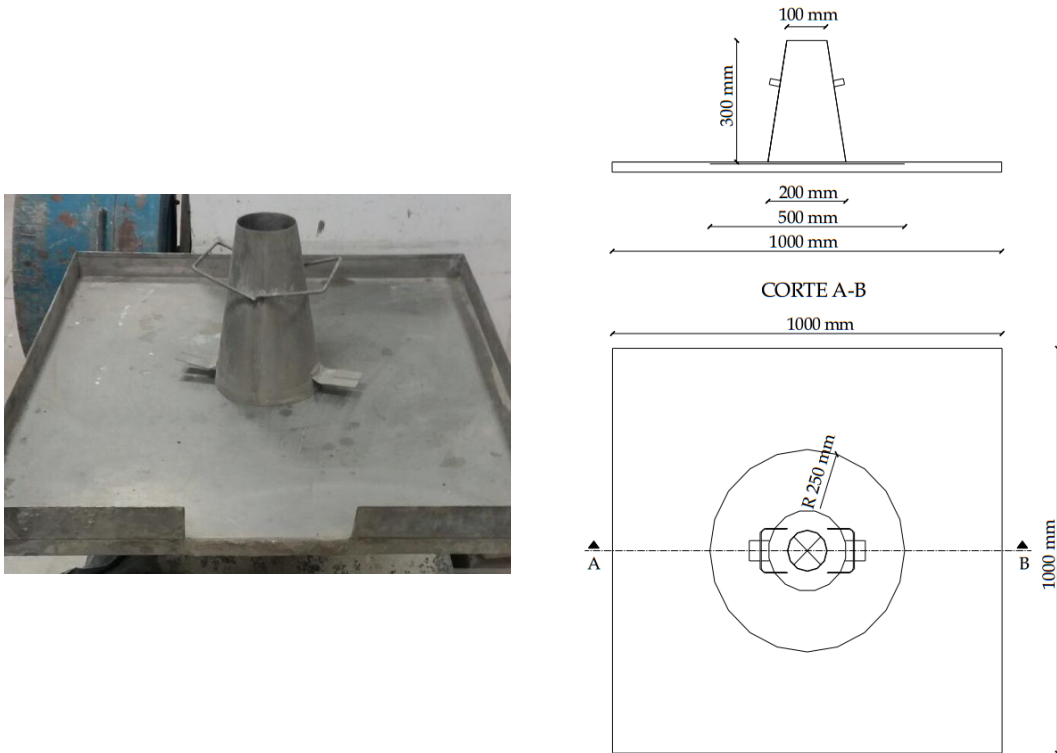


Figura 3.13 - Cone de Abrams e base utilizados no ensaio de espalhamento

Apresenta-se de seguida, de forma resumida, o procedimento de ensaio considerado para este ensaio:

- 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 enche-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 em 1 s 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) Depois de concluído o espalhamento do 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 com d_2 , igualmente 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 médio (EM) que corresponde à média aritmética entre os valores d_1 e d_2 (com uma aproximação de 10 mm).

3.4.2.2 Ensaio de escoamento no funil V

O ensaio de escoamento no funil V foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-9 (2010), possibilita a obtenção do tempo de escoamento (t_v), avaliando indiretamente a viscosidade do BAC em função da sua capacidade de escoamento através de uma zona confinada.

Na Figura 3.14 é apresentado o equipamento utilizado na realização do ensaio.

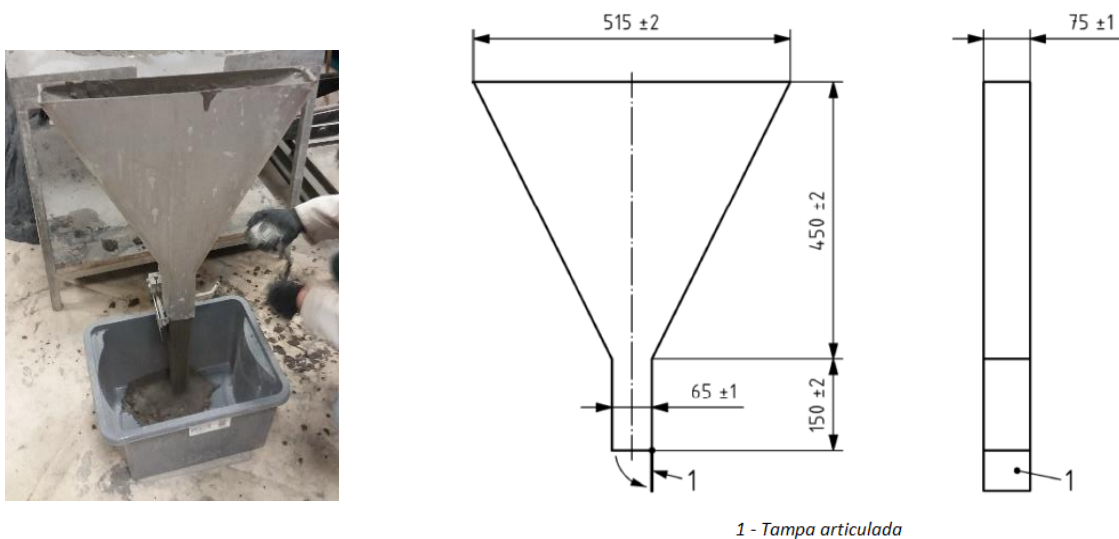


Figura 3.14 - Funil V utilizado no ensaio de escoamento, dimensões em mm

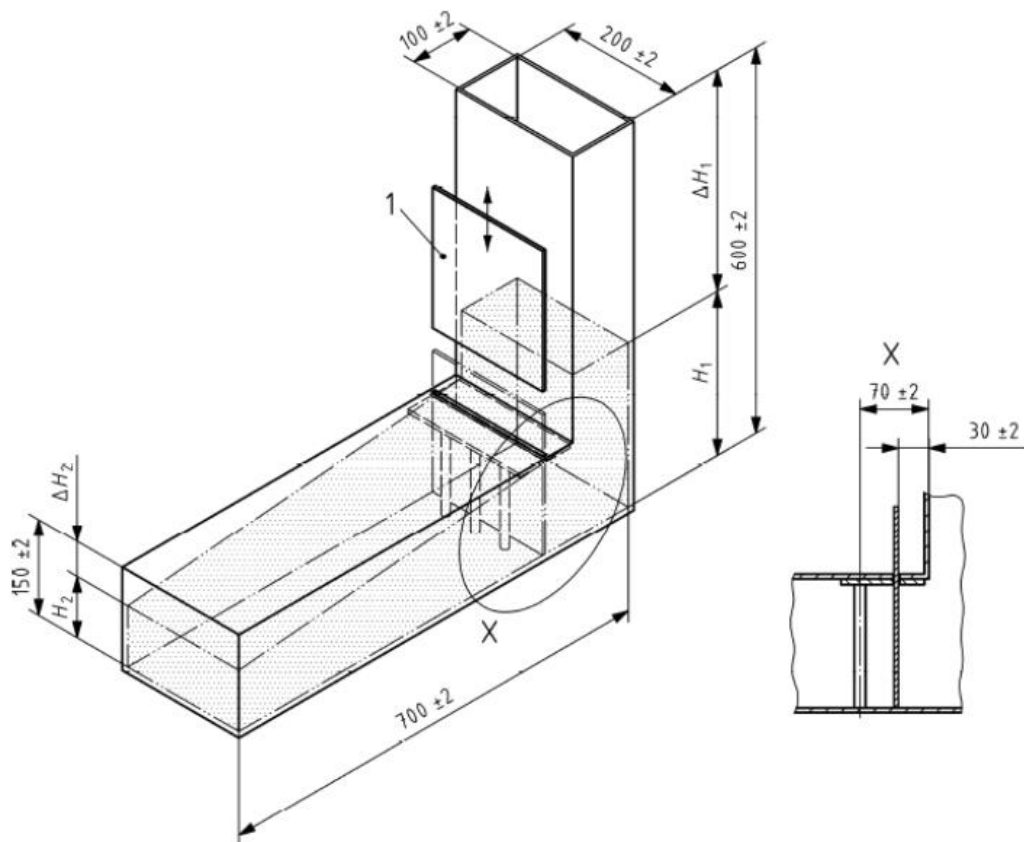
Descreve-se seguidamente, de forma resumida, o procedimento do presente ensaio:

- 1) Garantir 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 de BAC com um volume mínimo de 12 l;

- 4) Encher o funil sem qualquer tipo de agitação ou compactação, rasando 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 quando observando o funil na vertical de cima para baixo seja possível ver o primeiro raio de luz no fundo do funil;
 - 7) O escoamento do BAC deve ser contínuo, caso ocorra algum bloqueio o ensaio deve ser repetido com recurso a outra amostra;
 - 8) Caso se verifique 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 (com uma aproximação de 0,5 segundos).

3.4.2.3 Ensaio de escoamento na caixa L

O ensaio de escoamento na caixa L foi executado de acordo com a norma NP EN 12350-10 (2010), com o intuito de avaliar a fluidez do BAC através da sua capacidade de passagem, recorrendo para tal à razão H_2/H_1 . A medição de H_2 e H_1 é feita de acordo com o ilustrado na Figura 3.15.



1 – Tampa deslizante, varões de aço liso com $12 \pm 0,2$ mm de diâmetro, espaçados de 41 ± 1 mm

Figura 3.15 - Caixa L utilizada no ensaio de escoamento, dimensões em mm

O procedimento de ensaio seguido, engloba resumidamente os seguintes paços:

- 1) Certificar o correto nivelamento e fixação do equipamento de ensaio, evitando a possibilidade de qualquer tipo de movimento;
- 2) Limpar a caixa e a tampa deslizante e de seguida humedecer as superfícies interiores da caixa L, evitando a formação de zonas de acumulação de água;
- 3) Recolher uma amostra de BAC com um volume mínimo de 14 l de BAC;
- 4) Encher a secção vertical da caixa L sem recorrer a qualquer meio de agitação ou compactação e de seguida rasar o topo da caixa;
- 5) Esperar 60 ± 10 segundos e levantar num movimento contínuo a tampa deslizante que divide a secção vertical da horizontal da caixa L;
- 6) Concluído o movimento do BAC, realizar a medição da altura ΔH_1 em três posições, igualmente espaçadas, segundo a largura da caixa e a altura ΔH_2 em três posições, igualmente espaçadas, segundo a secção horizontal.

O resultado do ensaio é dado pelo índice de capacidade de passagem na caixa L (PL), correspondente à razão entre as profundidades médias H_2 e H_1 ($PL = H_2/H_1$).

3.5 Ensaios no estado endurecido

Para estudar o comportamento do BAC no estado endurecido, ao contrario do estado fresco, os ensaios habitualmente utilizados no BC podem ser aplicados de igual forma sem que seja necessário utilizar diferentes técnicas de ensaio.

3.5.1 Ensaios mecânicos

3.5.1.1 Compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi executado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2009), em provetes cúbicos com 150 mm de aresta e em cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Para cada mistura de BAC, os provetes cúbicos foram ensaiados para as idades de 7, 28 e 91 dias e os cilíndricos para os 28 e 91 dias, ambos sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio.

Assim que se retirou os provetes cúbicos da câmara de cura, estes foram pesados e realizou-se o ensaio de ultra-sons, imediatamente a seguir procedeu-se ao ensaio de compressão uniaxial. Os provetes cilíndricos, por sua vez, foram primeiramente utilizados para determinar o módulo de elasticidade secante e só posteriormente comprimidos para verificar o valor da resistência à compressão utilizado para determinar o módulo de elasticidade.

A quando do ensaio dos provetes cúbicos, estes foram colocados na prensa de forma a que a superfície de enchimento ficasse posicionada lateralmente sem contactar com as placas de pressão. No caso dos provetes cilíndricos estes foram retificados mecanicamente assegurando as tolerâncias exigidas.

Os provetes cúbicos foram ensaiados na prensa Form+Test Seidner 101/3000 E, do Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Figura 3.16, com uma capacidade máxima de carga de 3000 kN.



Figura 3.16 - Ensaio de compressão uniaxial em provetes cúbicos

Os provetes cilíndricos, por sua vez, foram ensaiados na prensa Tonic Pact 3000 do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, Figura 3.17, com uma capacidade de carga máxima de 3000 kN.



Figura 3.17 - Ensaio de compressão uniaxial em provetes cilíndricos

Ambos os equipamentos são constituídos por duas placas de compressão, uma conectada a um êmbolo na base do equipamento e a segunda fixa no topo do equipamento e devidamente rotulada para garantir a distribuição uniforme da força aplicada. A velocidade de aplicação de carga foi de 13,5 kN/s para os provetes cúbicos e de 10,5 kN/s para os cilíndricos, ambas dentro do intervalo de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s.

Depois de concluído o ensaio e em função da carga máxima de rotura (F) obtida, é calculado o valor de resistência à compressão (f_c) de cada provete, a partir da divisão da carga máxima de rotura pela área da secção do provete (A_c).

3.5.1.2 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi executado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011), em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Em cada mistura de BAC, foram ensaiados provetes, saturados, para as idades de 28 e 91 dias, sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa recorrendo à prensa utilizada no ensaio de compressão uniaxial.

O ensaio consiste em aplicar uma força de compressão sobre duas peças de aço, que a transmitem ao provete por intermédio de duas faixas estreitas de cartão prensado, tal como estipula a norma utilizada, Figura 3.18.



Figura 3.18 - Ensaio de compressão diametral

A velocidade de aplicação da carga foi de 3,5 kN/s, dentro do intervalo de 0,04 MPa/s a 0,06 MPa/s. Concluído o ensaio e em função da carga máxima (F), é calculado o valor de resistência à tração por compressão (f_{ct}) de cada provete, a partir da equação (3.3):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (3.3)$$

Onde:

f_{ct} – Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F – Carga máxima, em N;

L – Comprimento da linha de contacto do provete, em mm;

d – Dimensão vertical da secção transversal do provete, em mm.

3.5.1.3 Módulo de elasticidade secante

Para determinar o módulo de elasticidade secante foi seguida a especificação LNEC E 397 (1993), em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio.

Cada mistura de BAC foi ensaiada para as idades de 28 e 91 dias, estando os provetes saturados.

Os provetes foram ensaiados no equipamento de ensaio Instron modelo 1343 do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, Figura 3.19, com a capacidade de controlar a velocidade de carga e descarga, de forma gradual ou variável.



Figura 3.19 - Prensa de ensaio

Para a realização do ensaio, em cada provete foram instalados dois defletómetros do tipo TML SDP 10. O registo dos dados relativos às forças aplicadas e aos deslocamentos foi feito através de um data logger Spider 8 da HBM.

A execução do ensaio consistiu, primeiramente, em centrar os provetes nas placas da prensa de forma a que após um ciclo de carga/descarga a variação da extensão registada nos dois extensómetros, não difira em mais de 10%. Após este passo, procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade secante pela aplicação de ciclos de carga/descarga a uma velocidade de 8,8 MPa, para uma amplitude de valores de tensão entre os 0,5 a 1 MPa e 1/3 do valor da tensão de rotura à compressão

O ensaio termina quando a diferença entre a média de extensão de dois ciclos consecutivos é inferior a 10%.

O módulo de elasticidade em compressão (E_c) é então definido pela equação (3.4):

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

Sendo:

σ_a – Tensão máxima aplicada, em MPa;

ε_b – Tensão inicial, em MPa;

$\sigma_{a,n}$ – 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.

Depois de concluído o ensaio, como referido anteriormente, os provetes foram ensaiados à compressão

3.5.1.4 Retração

O ensaio de retração foi realizado de acordo com a especificação LNEC E 398 (1993).

Para cada mistura de BAC, foram ensaiados três provetes prismáticos de base quadrada com 100 mm de aresta e 400 mm de comprimento. Os resultados apresentados representam a média das medições relativas dos três provetes, realizadas ao longo de 91 dias (nos primeiros 14 dias de forma diária e semanalmente até aos 91 dias), a uma temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$, tendo a primeira medição sido feita imediatamente após a desmoldagem dos provetes.

O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e as medições realizadas com recurso a um defletómetro da marca Mahr de 30 cm e com uma precisão de 1 μm , Figura 3.20.



Figura 3.20 - Ensaio de retração

A colocação dos pontos de medição consistiu na colagem de um par de pinos metálicos na superfície do provete, com cola bicomponente de base epóxidica (secagem rápida e elevada resistência), devidamente posicionados com o auxílio da barra padrão do equipamento para garantir a distância correta entre os pinos metálicos.

3.5.2 Ensaio de durabilidade

3.5.2.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi executado de acordo com a especificação LNEC E 394 (1993), em provetes cúbicos com 100 mm de aresta e desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, tendo a medição das

massas sido feita com recurso a uma balança eletrónica com a capacidade máxima de 30 kg e uma divisão de escala de 1 g, Figura 3.21.



Figura 3.21 - Ensaio de absorção de água por imersão

Para cada mistura de BAC foram ensaiados provetes nas idades de 28 e 91 dias tendo sido sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio.

A realização do ensaio consistiu primeiramente na imersão dos provetes em água até ser alcançada a massa constante e posterior registo da massa dos provetes saturados com a superfície seca (m_1) e da massa hidrostática após saturação (m_2). Ao retirar os provetes de dentro de água, estes foram colocados numa estufa ventilada à temperatura de 105 ± 5 °C para secarem até massa constante (m_3). A massa m_3 considera-se alcançada quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, espaçadas no tempo de pelo menos 24 horas, é inferior a 0,1% da média das duas leituras.

O cálculo da absorção de água por imersão (A_i) é feito em percentagem e de acordo com a equação (3.5):

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

m_1 – Massa do provete saturado no ar, em g;

m_2 – Massa hidrostática do provete saturado, em g;

m_3 – Massa do provete seco, em g.

3.5.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de segundo a especificação LNEC E 393 (1993), em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Esta dimensão foi conseguida através do seccionamento de cilindros com 300 mm de altura), no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, tendo

sido utilizada para a medição das massas a balança eletrónica mencionada no ensaio de absorção de água por imersão.

Em cada uma das misturas de BAC, os provetes passaram por um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à data de pré-condicionamento, 14 dias antes da idade de ensaio, 28 e 91 dias, onde foram colocados numa estufa à temperatura de 40 ± 5 °C.

Concluído o pré-condicionamento os provetes foram colocados dentro de um tabuleiro, devidamente suportados e com a superfície de corte para baixo, Figura 3.22. De seguida, o tabuleiro foi, cuidadosamente, cheio com água até que se alcançar um nível de 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete que se manteve constante ao longo de todo o ensaio. O registo das massas foi feito ao fim de 0, 0,5, 1, 3, 6, 24 e 72 horas a contar a partir do momento em que o provete entrou em contacto com a água.



Figura 3.22 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

A partir das medições realizadas foi calculado o valor da absorção de água por capilaridade, por unidade de área, para cada um dos momentos, bastando para tal dividir o aumento da massa ($m_i - m_0$) pela área da face que esteve em contacto com a água.

Considerando os valores da absorção de água, foram calculados os coeficientes de absorção que correspondem à pendente da reta de regressão dos valores das primeiras seis horas de absorção de água, seguindo a equação (3.6):

$$A(t) = S \times t^{0,5} \quad (3.6)$$

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, em min.

3.5.2.3 Difusão de cloretos

Para determinar o coeficiente de difusão de cloretos por ensaio em regime não estacionário, foi considerada a especificação LNEC E 463 (2004). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, tendo

sido ensaiados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura (obtidos a partir do seccionamento de cilindros com 200 mm de altura), para as idades de 28 e 91 dias.

Para cada mistura de BAC, os provetes foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até 7 dias antes da data de ensaio, momento onde são seccionados e posteriormente condicionados à temperatura de 20 ± 2 °C e a humidade relativa de 50% até à data de ensaio.

Antes de se realizar o ensaio, os provetes foram pré-condicionados numa câmara de vácuo e imersos numa solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Ao retirar os provetes da câmara, estes são envolvidos por uma manga de borracha, fixada com duas braçadeiras metálicas, que é cheia com uma solução anódica de hidróxido de sódio (NaOH 0,3N), sem cloretos, em água destilada. De seguida os provetes, juntamente com a manga, são colocados no interior de um reservatório com uma solução catódica de cloreto de sódio a 10% NaCl em água da torneira, Figura 3.23.

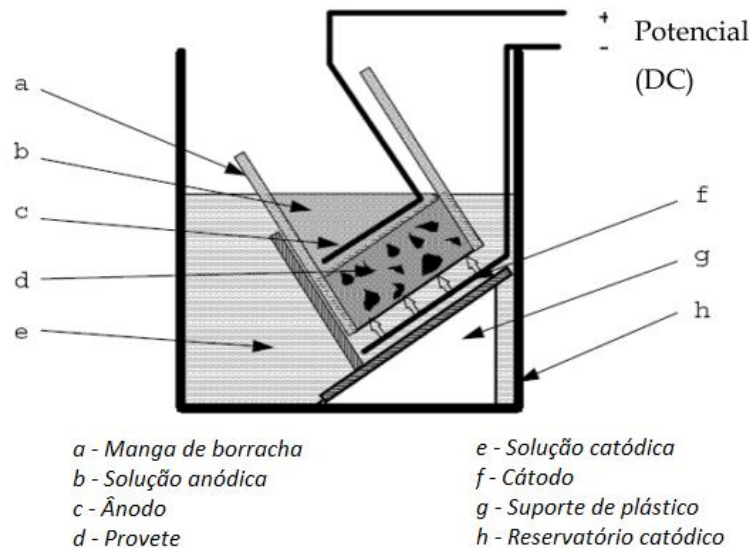


Figura 3.23 - Esquema de montagem do ensaio de migração de cloretos

Para provocar a migração dos iões cloretos através do provete, foi 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.

Decorridas 24 horas, os provetes foram seccionados axialmente em duas partes e as superfícies de fratura pulverizadas com nitrato de prata (AgNO_3 0,1N). Depois de deixar a solução atuar, mediu-se a profundidade de penetração a partir do precipitado branco de cloreto de prata que se formou.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário, foi calculado pela equação simplificada (3.7):

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (3.7)$$

Sendo:

D – Coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U – Valor absoluto da voltagem aplicada, em V;

T – Valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L – Espessura do provete, em mm;

x_d – Valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t – Duração do ensaio, em horas.

3.5.2.4 Resistividade elétrica

Dado a falta de normativas nacionais ou internacionais para o presente ensaio, a determinação da resistividade elétrica, pelo método dos dois elétrodos topo-a-topo, foi realizada de acordo com a proposta de norma europeia do grupo de trabalho Chlortest (2005).

O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura (conseguidos a partir do seccionamento de cilindros com 200 mm de altura) para as idades de 28 e 91 dias.

Em todas as misturas de BAC, os provetes passaram por um processo de cura húmida por imersão em água à temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de 50% até à data de ensaio. 24 horas antes de se iniciar o ensaio, os provetes foram pré-condicionados por imersão em água destilada numa câmara a vácuo. Após o pré-condicionamento os provetes saturados são limpos para remover o excesso de água e colocados entre duas esponjas humedecidas em água e duas placas de cobre, comprimidas por uma massa de 2 kg, Figura 3.24.

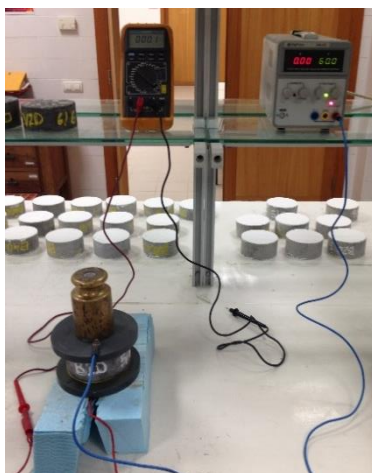


Figura 3.24 - Ensaio de resistividade elétrica

De seguida foi aplicado um potencial elétrico de 60 V nas placas de cobre e registado o valor da corrente elétrica que atravessou o provete. A resistividade elétrica é calculada a partir da equação (3.8):

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{A}{L} \quad (3.8)$$

Onde:

ρ – Resistividade elétrica do betão, em Ωm ;

U – Voltagem aplicada, em V;

I – Intensidade da corrente, em A;

A – Área do topo do provete, em m^2 ;

L – Comprimento do provete, em mm.

Para determinar a resistência elétrica das esponjas foi utilizado o mesmo procedimento, mas sem colocar os provetes entre as esponjas.

3.5.2.5 Carbonatação

O ensaio da resistência à carbonatação foi realizado de acordo com a especificação LNEC E 391 (1993), no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, em provetes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 50 mm (a dimensão dos provetes foi conseguida tal como no ensaio de difusão de cloretos, através do seccionamento de cilindros de 200 mm de altura), para as idades de 14, 21, 49, 70 e 91 dias de exposição na câmara de CO_2 .

Para todas as misturas de BAC, até 14 dias antes da data de início do ensaio os provetes foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C. Nesta fase os provetes foram seccionados e os topos revestidos com uma camada isolante de resina acrílica para proteção contra os agentes agressivos. De seguida, os provetes foram deixados ao ar à temperatura de 20 ± 2 °C a uma humidade relativa de 50% até à data de início do ensaio (28 dias). O ensaio teve início com a colocação dos provetes numa câmara à temperatura de 23 ± 3 °C, com humidade relativa entre 55% e 65% e com uma fonte de alimentação de ar com $5 \pm 0,1\%$ de CO_2 .

À medida que se atingiu as idades em estudo (14, 21, 49, 70 e 91 dias), retiraram-se os provetes correspondentes a cada uma das idades para os seccionar axialmente e posteriormente aplicar sobre as superfícies de fratura uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% para que seja possível medir a profundidade de carbonatação, Figura 3.25.



Figura 3.25 - Ensaio de carbonatação

3.5.3 Ultra-sons

A execução do ensaio de ultra-sons seguiu o estabelecido na norma NP EN 12504-4 (2007).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, com recurso ao equipamento da Proceq. Testing Instruments, modelo Tico Ultrasonic Instrument, com transdutores de 54 kHz, Figura 3.26, em provetes cúbicos com 150 mm de aresta que posteriormente foram utilizados no ensaio de resistência à compressão uniaxial para as idades de 7, 28 e 91 dias.



Figura 3.26 - Ensaio dos ultra-sons

Em todas as misturas de BAC os provetes passaram por um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à data de ensaio.

A medição da velocidade dos ultra-sons foi feita por transmissão direta com a colocação do emissor e recetor em faces opostas do provete. Para assegurar o bom contacto entre os transdutores e as faces do provete foi aplicada vaselina nas superfícies de contacto.

Antes de ensaiar cada mistura foi feita a calibração do equipamento, com base nas indicações do fabricante, recorrendo para tal à barra fornecida juntamente com o equipamento.

A velocidade de propagação dos ultra-sons foi calculada, com uma aproximação de 0,01 km/s, de acordo com a equação (3.9):

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.9)$$

Onde:

V – Velocidade de propagação dos ultra-sons, em km/s;

L – Comprimento do percurso, em mm;

T – Tempo que os ultra-sons demoram a atravessar o comprimento de percurso, em μ s.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo da campanha experimental, descrita no Capítulo 3. A análise de resultados incidiu no comportamento no estado fresco do BAC e nas propriedades mecânicas e de durabilidade das diversas misturas produzidas, com o objetivo de estudar o efeito que o incremento da substituição parcial de cimento por CFRSU, até 50%, teve no desempenho das misturas produzidas.

Os resultados apresentados foram justificados, sempre que possível, por comparação direta com outros trabalhos onde se estudou a utilização de CFRSU. Quando tal não foi possível, foram considerados estudos que avaliam a utilização de outros materiais ultrafinos, apenas para comparar tendências.

4.1 Propriedades do BAC no estado fresco

O estudo em betões no estado fresco foi desenvolvido com o objetivo de assegurar que os BAC produzidos cumprem os requisitos exigidos para se poderem considerar como tal, nomeadamente, a sua auto-compactibilidade. Como indicado no subcapítulo 3.1.1.2 o estudo em betões partiu das indicações obtidas com o estudo em argamassas, sendo que para caracterizar o comportamento dos BAC foram realizados os ensaios de espalhamento, escoamento no funil V e escoamento na caixa L de acordo com a metodologia descrita nos subcapítulos 3.4.2.1, 3.4.2.2 e 3.4.2.3, respetivamente.

Os limites mínimos e máximos considerados para atribuir uma classe de consistência aos BAC, foram os referidos na norma NP EN 206-9 (2010). Para além da classificação indicada, a quando da execução dos ensaios, foi também feita uma análise visual do comportamento do betão para avaliar a homogeneidade, assim como, garantir que o betão fabricado não apresenta sinais de segregação e exsudação.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos para as diferentes misturas.

Tabela 4.1 - Resultados no estado fresco

Mistura	Espalhamento		Funil V	Caixa L
	t_{500} [s]	EM [mm]	t_v [s]	PL [H_2/H_1]
REF	2,74	680	5,63	0,87
B 20	2,68	600	3,58	0,78
B 30	2,91	645	2,66	0,92
B 40	3,42	560	2,52	0,99
B 50	3,67	550	2,24	0,75

Considerando os parâmetros estabelecidos na norma indicada e os resultados obtidos, constatou-se que uma maior percentagem de substituição de cimento resulta no aumento do tempo de espalhamento, t_{500} , estando todas as misturas enquadradas na classe VS2

($t_{500} \geq 2,0$ s). Comportamento com tendência inversa é verificado nos valores do EM, onde a mistura B 30 diverge das restantes com CFRSU, no entanto, apesar da variação registada, todas as misturas com exceção da REF, pertencente à classe SF2 ($660 \text{ mm} \leq \text{EM} \leq 750 \text{ mm}$), apresentam uma classe de espalhamento SF1 ($550 \text{ mm} \leq \text{EM} \leq 650 \text{ mm}$).

O tempo de escoamento (t_v) diminui com o incremento da percentagem de substituição, estando todas as misturas enquadradas na classe VF1 ($t_v < 9,0$ s).

Para classificar o betão produzido de acordo com a NP EN 206-9 (2010) o índice de capacidade de passagem (PL) deve ter um valor mínimo de 0,80. Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que a mistura B 20 e B 50 não atingem um valor que possibilite a sua classificação de acordo com a referida norma, ainda assim, de uma forma geral são conseguidos valores aceitáveis, de PL, para as misturas produzidas sem que em nenhuma delas se verifique a segregação ou exsudação, como tal foi considerado que os BAC produzidos têm uma adequada capacidade de escoamento.

4.2 Propriedades do BAC no estado Endurecido

Este subcapítulo, centra-se na análise do comportamento mecânico e de durabilidade das misturas produzidas, tendo o objetivo de estudar o seu desempenho retirando ilações sobre o mesmo.

4.2.1 Propriedades mecânicas

Para avaliar o comportamento mecânico do BAC foram realizados os seguintes ensaios: compressão uniaxial (cubos e cilindros), tração por compressão diametral, módulo de elasticidade secante e retração.

4.2.1.1 Compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.1.1 e de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2009) para as misturas apresentadas em 3.1.1. Os resultados apresentados dizem respeito às idades de 7, 28 e 91 dias (provetes cúbicos) e para os 28 e 91 dias (provetes cilíndricos).

Provetes cúbicos

Ao serem retirados da câmara de cura os provetes cúbicos foram utilizados para realizar o ensaio de ultra-sons e de seguida ensaiados para verificação da resistência à compressão uniaxial.

Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados obtidos para todas as misturas executadas, nomeadamente, o valor médio da resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos para a idade i ($f_{cm,c,id}$), o seu desvio padrão (S), coeficiente de variação (C_{var}) e a razão A/C de cada mistura. No anexo A.2.1 podem ser consultados os valores individuais de resistência à compressão uniaxial em cubos e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.2 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos

Mistura	$f_{cm,c,7d}$	S	C_{var}	ΔREF	$f_{cm,c,28d}$	S	C_{var}	ΔREF	$f_{cm,c,91d}$	S	C_{var}	ΔREF	A/C
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	
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	0,364
B 20	33,68	1,99	5,92	-33,00	35,66	5,48	15,36	-38,09	41,32	0,84	2,03	-48,42	0,398
B 30	23,87	1,30	5,45	-52,52	24,19	2,52	10,40	-58,00	32,56	2,89	8,86	-59,36	0,455
B 40	18,09	1,03	5,72	-64,02	21,77	2,09	9,61	-62,20	24,84	0,59	2,37	-68,99	0,531
B 50	12,89	0,31	2,38	-74,35	16,76	0,84	5,04	-70,91	16,02	0,45	2,82	-80,00	0,637

Analisando a Tabela 4.2, verifica-se globalmente que, os valores de desvio padrão e coeficiente de variação obtidos são aceitáveis para a amostra de valores analisados. Dos vários resultados destaca-se a mistura B 20, aos 28 dias, que apresenta simultaneamente o maior valor de desvio padrão e de coeficiente de variação, registrados para esta propriedade. Por sua vez, a mistura B 50 é a que apresente a menor dispersão de resultados ao longo das três idades.

Na Figura 4.1, são apresentadas as curvas de evolução da resistência à compressão uniaxial, das diferentes misturas de BAC produzidas, em função da idade de ensaio.

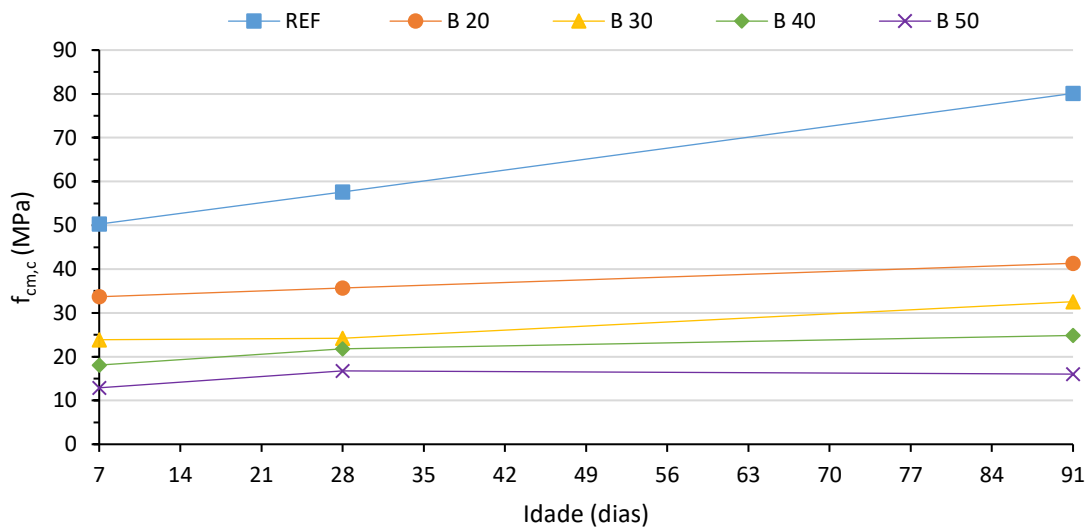


Figura 4.1 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos, para todas as misturas de BAC

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a mistura REF alcança valores elevados de resistência mecânica aos 7 dias de idade, correspondendo a 63% do valor final aos 91 dias, evoluindo continuamente ao longo do tempo. As restantes misturas têm igualmente o maior incremento da resistência até aos 7 dias de idade, alcançando valores que variam entre 73% e 82% da resistência aos 91 dias, variando pouco a partir desta idade. Da mesma forma, conclui-se facilmente que a utilização de CFRSU como adição, reduz a resistência do BAC produzido quando comparado com a mistura de referência, sendo a diferença ampliada com o aumento da percentagem de substituição e da idade do ensaio.

A evolução verificada para as misturas com CFRSU, assemelha-se à observada por Brito & Silva (2016). Os autores produziram amassaduras de BAC com incorporação de FC que, tal como no presente trabalho, apresentam o maior aumento da resistência nos primeiros dias (7 dias), não apresentando daí em diante uma evolução significativa. Paralelamente a esta

evolução, verifica-se ainda que, quanto maior a percentagem de substituição menor o valor da resistência à compressão da amassadura produzida.

Zajac, Rossberg, Le Saout, & Lothenbach (2014) indicam que esta redução da resistência à compressão se deve ao facto de o calcário, constituinte do fíler, em particular a calcite, poder provocar a diluição do cimento durante o seu processo de hidratação (ao substituir parte do cimento). Assim, uma vez que as CFRSU são constituídas por de calcite, Tabela 2.1 e Figura 3.8, este comportamento poderá ter-se verificado nas misturas produzidas, reduzindo a resistência do betão.

O mesmo comportamento foi verificado por Amat et al. (2017) ao produzirem quatro amassaduras de betão com vários níveis de substituição de cimento por CFRSU (0%, 10%, 20% e 30%). Os autores referem que a utilização desta adição reduz a resistência à compressão dos betões, sendo esse efeito agravado com o aumento da percentagem de substituição, afirmam ainda que, a redução desta propriedade não advém apenas da substituição de cimento, mas também, do incremento da razão A/C que provoca o aumento da porosidade da matriz de betão. Questão que deve ser equacionada, dado que, para as amassaduras produzidas se verifica efetivamente um incremento da razão A/C com o aumento da percentagem de substituição de cimento.

Ao analisar os resultados de Amat et al. (2017), verifica-se ainda que tal como no presente estudo que o desenvolvimento da resistência à compressão ocorre maioritariamente nas primeiras idades (7 dias).

A mesma tendência de redução da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição foi observada por Cheng (2012). Este estudou o efeito da substituição de cimento por CFRSU na produção de argamassas, tendo para tal, produzido amassaduras com diferentes percentagens de substituição (0%, 10%, 20%, 30% e 40%). O autor sugere que a redução do valor de resistência à compressão deve-se também ao facto da utilização desta adição enfraquecer a ligação na interface da zona de transição agregado/pasta.

No que respeita ao retardamento do processo de cura do betão, Souza, Machado, Lima, & Cardoso (2010), produziram quatro amassaduras de betão com substituição de cimento por pó de forno de arco elétrico (0%, 10%, 15% e 20%) e verificaram em todas as misturas produzidas um retardamento da processo de hidratação de cimento. Efeito que os autores atribuem ao composto hidróxido de zinco ($Zn(OH)_2$), obtido a partir do óxido de zinco (ZnO). Quando o ambiente envolvente é alcalino, este composto forma uma película protetora na superfície dos grãos de cimento que ainda não foram hidratados, impedindo a sua hidratação.

A mesma conclusão foi apresentada por Balderas, Navarro, Flores-Velez, & Dominguez (2001) ao estudarem o comportamento do cimento Portland com adição de pó de forno de arco elétrico e por Pokorný, Dobiáš, & Čítek (2016) ao estudarem o efeito que a adição de zinco produz nas propriedades mecânicas do betão.

Pokorný et al. (2016), apresentam ainda resultados relevantes no que respeita à sua resistência à compressão, que diminui com o aumento da quantidade de zinco.

Desta foram, a eventual presença de zinco, como elemento ou óxido, na constituição das CFRSU, Tabela 2.1, pode igualmente contribuir não só para o retardamento do processo de cura verificado no presente trabalho, particularmente notório nas misturas com maior percentagem de substituição, B 40 e B 50 (aproximadamente 48 horas), mas também para a redução do valor de resistência à compressão.

Pera et al. (1997) ao estudarem o comportamento de betões com adição de CFRSU, verificaram que a presença de alumínio reduz igualmente a resistência à compressão do betão, consequência das reações químicas de corrosão que ocorrem no alumínio quando este está perante um ambiente alcalino. Estas reações produzem hidróxidos e emitem hidrogénio, que por sua vez forma bolhas, aumentando assim a porosidade do betão e reduzindo a resistência mecânica.

Considerando a evolução da resistência à compressão das misturas produzidas, estabeleceu-se como referência o seu coeficiente de endurecimento (C_{end}) aos 28 dias de idade de forma a analisar a sua evolução para as várias idades, Tabela 4.3.

$$C_{end} = \frac{f_{cm,c,id}}{f_{cm,c,28d}} \quad (4.1)$$

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 idade.

Juntamente com os resultados dos BAC produzidos, são também apresentados os valores de C_{end} determinados por aplicação da equação (4.1) e dos valores obtidos por utilização das equações, (4.2) e (4.3), do Eurocódigo 2 (EC 2), NP EN 1992-1-1 (2010):

$$f_{cm,id} = \beta_{cc,i} \times f_{cm,28d} \quad (4.2)$$

$$\beta_{cc,i} = e^{\left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{i}} \right) \right]} \quad (4.3)$$

Sendo:

$f_{cm,id}$ – Resistência média à compressão na idade i ;

$f_{cm,28d}$ – Resistência média à compressão aos 28 dias de idade;

$\beta_{cc,i}$ – Coeficiente que depende da idade do betão;

S – Coeficiente que depende do tipo de cimento (CEM 42,5 R = 0,20).

Tabela 4.3 - Coeficiente de endurecimento das misturas produzidas

Mistura	Coeficiente de endurecimento		
	$C_{end,7d}$	$C_{end,28d}$	$C_{end,91d}$
REF	0,87	1,00	1,39
B 20	0,94	1,00	1,16
B 30	0,99	1,00	1,35
B 40	0,83	1,00	1,14
B 50	0,77	1,00	0,96
EC 2	0,82	1,00	1,09

Os coeficientes de endurecimento obtidos validam as observações referidas anteriormente, uma vez que, como se pode verificar, a resistência à compressão aos 7 dias para os BAC produzidos, com exceção da mistura B 50, é superior a 80% do valor obtido aos 28 dias.

Comparando os coeficientes de endurecimento obtidos, com a proposta do EC 2 NP EN 1992-1-1 (2010), verifica-se que a mistura B40 é a que apresenta valores mais se próximos.

Provetes cilíndricos

Os provetes cilíndricos ao serem retirados da câmara de cura foram utilizados para determinar o módulo de elasticidade secante e só de seguida ensaiados à compressão para verificar a sua resistência à compressão uniaxial

Na Tabela 4.4, são apresentados os resultados obtidos para as misturas em análise, nomeadamente, o valor médio da resistência à compressão para cada uma das idades de ensaio ($f_{cm,cil,id}$), o seu desvio padrão (S), o coeficiente de variação (C_{var}) e a relação entre a resistência à compressão entre os provetes cilíndricos e os cúbicos ($f_{cm,cil}/f_{cm,c}$). No anexo A.2.2 são apresentados os valores individuais de resistência à compressão uniaxial em cilindros e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.4 - Resistência à compressão uniaxial de provetes cilíndricos

Mistura	$f_{cmcil,28d}$	S	C_{var}	ΔREF	$f_{cmcil,91d}$	S	C_{var}	ΔREF	f_{cmcil}/f_{cmc}	
	[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
B 20	20,57	0,29	1,43	-62,85	22,14	3,75	16,93	-66,24	0,58	0,54
B 30	11,23	0,65	5,80	-79,71	15,30	1,39	9,06	-76,68	0,46	0,47
B 40	9,10	0,12	1,36	-83,57	10,61	0,68	6,45	-83,83	0,42	0,43
B 50	6,28	0,36	5,68	-88,67	6,85	2,15	31,33	-89,55	0,37	0,43

Observando os resultados apresentados é perceptível que, de uma forma geral, os valores dos provetes cilíndricos apresentam uma maior dispersão de resultados que os cúbicos. A mistura REF, em particular, apresenta coeficientes de variação elevados para os 28 e 91 dias de 22,56% e 18,92%, respetivamente. Aos 91 dias as misturas B 20 e B 50 apresentam igualmente elevados C_{var} , com valores de 16,93% e 31,33%, respetivamente. As restantes misturas apresentam uma dispersão de resultados aceitável para a amostra considerada.

Na Figura 4.2, é apresentada a evolução da resistência à compressão uniaxial, para os 28 e 91 dias, em função das misturas produzidas.

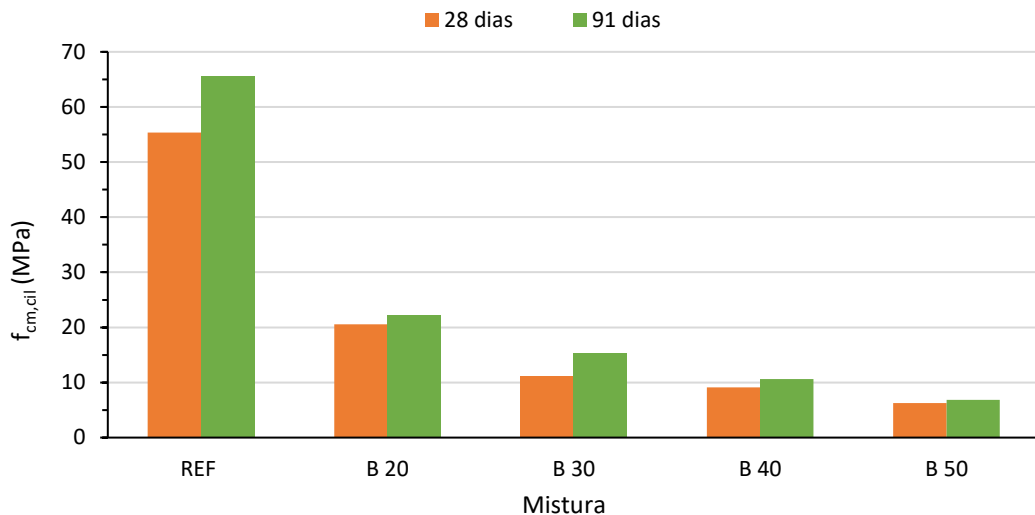


Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão uniaxial de provetes cilíndricos, para todas as misturas de BAC

Quando analisados individualmente, os provetes cilíndricos, têm igualmente uma tendência para a redução da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição de CFRSU, sendo a redução mais evidente quando se compara a mistura REF com qualquer uma das restantes. O aumento da idade de ensaio conduz naturalmente ao aumento do valor da resistência à compressão em todas as misturas, ainda que pouco significativo nas misturas com adição de CFRSU. Desta forma, podemos transpor as considerações feitas ao comportamento do BAC nos provetes cúbicos para os cilindros.

Na Figura 4.3, é possível verificar a relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas de BAC produzidas.

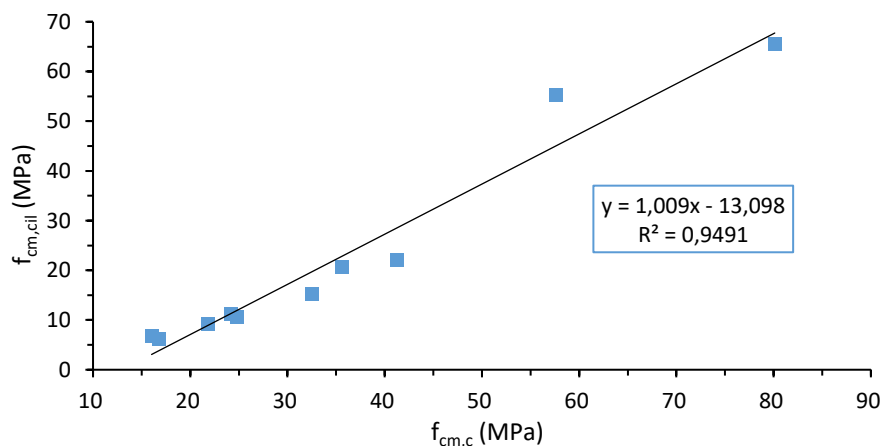


Figura 4.3 - Relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas de BAC

Ao analisar os dados apresentados, verifica-se pouca dispersão dos dados com um coeficiente de correlação linear associado à regressão linear elevado de $R^2 = 0,9491$.

Apesar da boa interdependência verificada, quando se compara o fator de conversão conseguido a partir dos valores apresentados no Quadro 7 da norma NP EN 206-1 (2007),

aproximadamente 80%, com os fatores de conversão obtidos no presente trabalho, Tabela 4.4, é visível que os últimos, ficam aquém do que seria desejado, sendo notório, ainda assim, que quanto menor a percentagem de substituição de cimento, maior o valor do respetivo fator de conversão.

As diferenças registadas, podem dever-se ao facto de os provetes cúbicos por apresentarem a mesma dimensão nos três planos de face, beneficiarem do efeito de confinamento que resulta das forças de atrito que se geram entre estes e os pratos da prensa. Os provetes cilíndricos, por sua vez, como têm uma relação entre o seu diâmetro e a altura superior a um ($h/d = 2$, para provetes utilizados) sofrem uma redução deste efeito e consequentemente a resistência à compressão uniaxial é reduzida (Hamad, 2015).

Em sintonia com o paragrafo anterior, o coeficiente de Poisson pode igualmente contribuir para a menor resistência dos provetes cilíndricos, face aos cúbicos, basta para tal que o comportamento do BAC seja distinto entre a direção axial (segundo o eixo do cilindro) e transversal (perpendicular ao eixo do cilindro), diferença essa que poderá ter sido agravada pelo retardamento do processo de hidratação do cimento, em consequência da eventual presença de zinco na adição ou pelo aumento de porosidade por ação do alumínio.

4.2.1.2 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral seguiu o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.1.2 e tem por base a norma NP EN 12390-6 (2011) para as misturas apresentadas em 3.1.1.

Os resultados obtidos de tração por compressão diametral para as diferentes misturas, são apresentados na Tabela 4.5 e dizem respeito às idades de 28 e 91 dias. É também possível verificar o valor médio da resistência à tração por compressão diametral para cada uma das idades de ensaio ($f_{ctm,sp,id}$), o seu desvio padrão (S) o coeficiente de variação (C_{var}). No anexo A.2.3, podem ser verificados os valores individuais de resistência à tração por compressão diametral e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.5 - Resistência à tração por compressão diametral

Mistura	$f_{ctmsp,28d}$	S	C_{var}	ΔREF	$f_{ctmsp,91d}$	S	C_{var}	ΔREF	f_{ctmsp}/f_{cmcil}	
	[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	0,09	0,07
B 20	3,09	0,03	0,87	-38,55	3,40	0,01	0,27	-30,48	0,15	0,15
B 30	2,32	0,42	18,10	-53,88	2,36	0,07	2,97	-51,62	0,21	0,15
B 40	2,19	0,11	5,17	-56,53	2,24	0,01	0,58	-54,06	0,24	0,21
B 50	1,96	0,06	3,01	-61,09	1,87	0,04	2,03	-61,70	0,31	0,27

Ao examinar os dados apresentados, verifica-se que a dispersão de resultados é inferior à verificada para o ensaio de compressão uniaxial. Apenas a mistura B 30 apresenta um coeficiente de variação excessivo de 18,10%, as restantes estão enquadradas num intervalo de valores que pode ser considerado como ajustado.

Na Figura 4.4, é apresentada a evolução da resistência à tração por compressão diametral, para os 28 e 91 dias, em função das misturas produzidas.

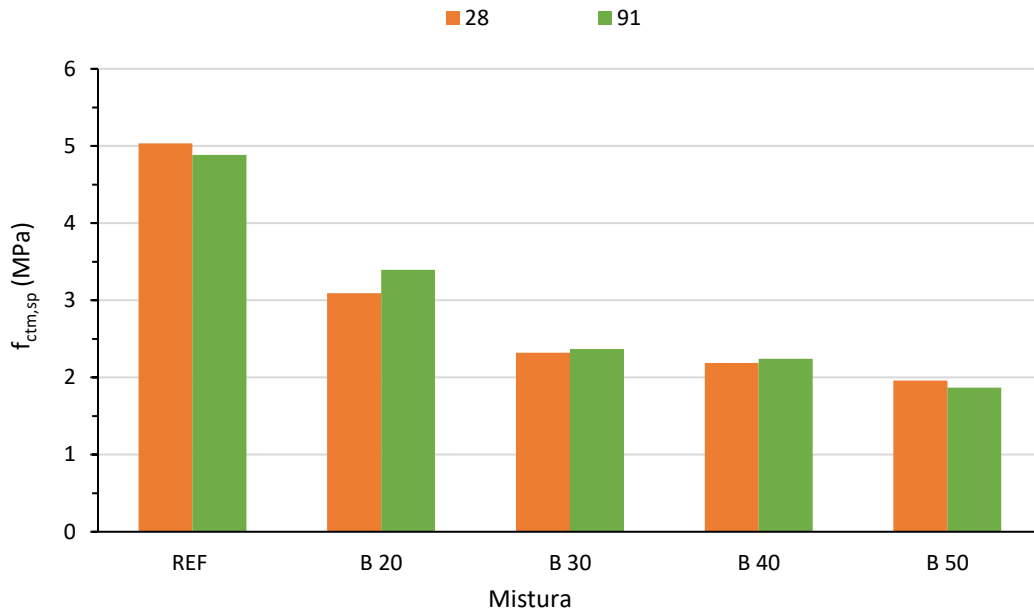


Figura 4.4 - Variação da resistência à tração por compressão diametral para todas as misturas de BAC

Analisando os dados apresentados verifica-se que em todas as misturas a totalidade da resistência é praticamente atingida aos 28 dias de idade, oscilando tanto de forma positiva como negativa até aos 91 dias, em valor absoluto, entre os 2% e os 9% para a todas as misturas. Constata-se igualmente que, tal como na compressão uniaxial, o comportamento do betão é prejudicado pelo aumento da percentagem de substituição, existindo uma diferença substancial entre a mistura REF e as restantes, que é tanto mais notória quanto maior a percentagem de CFRSU utilizada.

Li et al. (2012) ao ensaiarem argamassas com substituição parcial de cimento por CFRSU (0%, 10%, 20%, 30% e 50%) encontram resultados idênticos no que respeita à degradação da resistência à tração com o incremento da percentagem de substituição.

Também não se deve descorar o facto da ligação na interface da zona de transição agregado/pasta poder enfraquecer com o aumento da utilização de CFRSU e da razão A/C. Na Figura 4.5 são apresentadas as superfícies de rotura dos provetes ensaiados aos 91 dias.

O enfraquecimento desta zona, em particular, poderá também dever-se à diferença entre a quantidade de água de amassadura da mistura REF e das restantes.

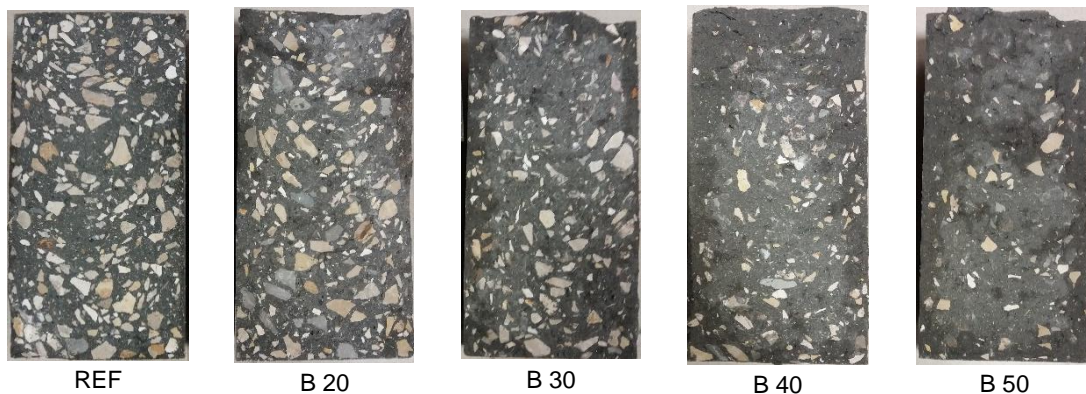


Figura 4.5 - Superfície de rotura das misturas produzidas aos 91 dias de idade

Analisando as superfícies resultantes, é possível verificar, em todas as misturas uma distribuição uniforme do agregado grosso por todo o provete sem aglomeração de partículas ou qualquer fenómeno de segregação ou exsudação. Ao observar detalhadamente a superfície de rotura verifica-se ainda que à medida que se aumenta a percentagem de substituição, esta tem tendência a passar de uma rotura pelo agregado para uma rotura pela zona de interface entre o agregado e a pasta, detalhe que pode contribuir para a redução da resistência mecânica dos provetes onde se verifica esta alteração.

O EC 2, NP EN 1992-1-1 (2010), apresenta no seu Quadro 3.1 equações de cálculo, (4.4) e (4.5), que possibilitam estimar o valor médio de resistência à tração simples a partir da resistência à compressão uniaxial em cilindros:

$$f_{ctm} = 0,30 (f_{ck,cil})^{2/3}, (\leq C50/60) \quad (4.4)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left(1 + \frac{f_{cm,cil}}{10} \right), (> C50/60) \quad (4.5)$$

De acordo com o sugerido pela referida norma, pode ser considerado que a resistência à tração simples corresponde a 90% da resistência à tração por compressão diametral.

Na Figura 4.6, é apresentada a variação média da resistência à tração por compressão diametral em função da resistência à compressão uniaxial em provetes cilíndricos para todas as misturas de BAC produzidas e para os valores do EC 2.

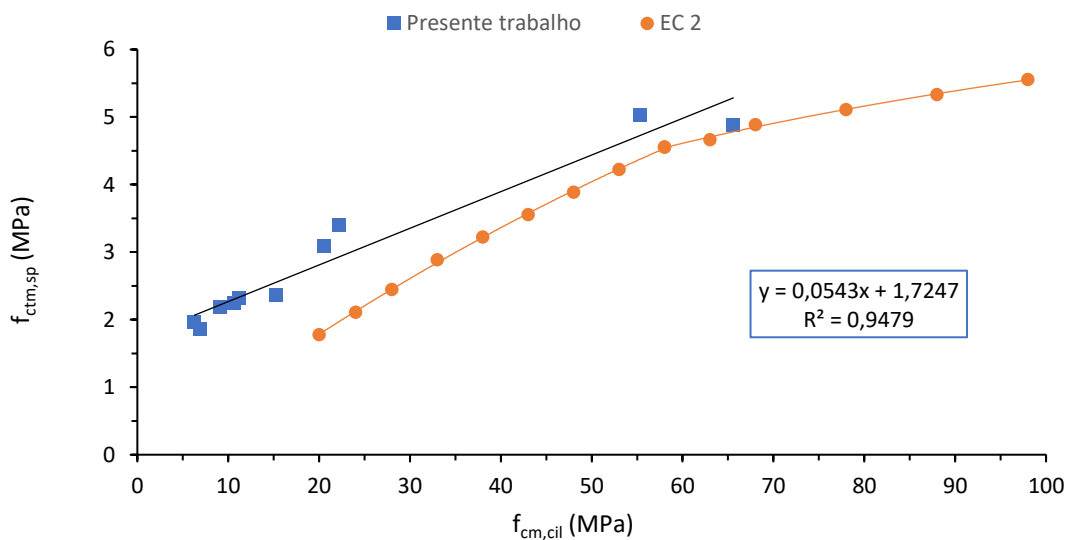


Figura 4.6 - Relação entre a $f_{ctm,sp}$ e a $f_{cm,cil}$ para todas as misturas de BAC e para as expressões propostas pelo EC 2

Ao analisar os dados obtidos, constata-se que existe uma elevada correlação linear de $R^2 = 0,9479$ entre os dois parâmetros estudados. Verifica-se ainda, ao comparar os resultados obtidos experimentalmente com os preconizados no EC 2, NP EN 1992-1-1 (2010), que estes são superiores ao que seria expectável por aplicação direta das fórmulas indicadas. As diferenças registadas podem dever-se em parte ao facto de a referida norma ter sido desenvolvida para BC e não para BAC.

4.2.1.3 Módulo de elasticidade secante

O módulo de elasticidade secante foi determinado para as idades de 28 e 91 dias, considerando o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.1.3 que tem por base a especificação LNEC E 397 (1993) para as misturas apresentadas em 3.1.1.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.6, nomeadamente, o valor médio do módulo de elasticidade secante para cada uma das idades ($E_{cm,id}$), o desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C_{var}). No anexo A.2.4 são apresentados os valores individuais de módulo de elasticidade (E_c) e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.6 - Módulo de elasticidade secante

Mistura	E_{cm28d} [GPa]	S [GPa]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	E_{cm91d} [GPa]	S [GPa]	C_{var} [%]	ΔREF [%]
REF	45,42	4,70	10,34	0,00	41,56	0,98	2,36	0,00
B 20	23,71	2,54	10,72	-47,79	19,43	1,18	6,06	-53,26
B 30	23,78	0,93	3,90	-47,64	19,51	0,52	2,65	-53,07
B 40	24,19	0,77	3,19	-46,74	19,90	0,17	0,86	-52,12
B 50	12,95	1,82	14,02	-71,49	9,07	1,74	19,17	-78,19

Analisando a Tabela 4.6, verifica-se, dos 28 para os 91 dias, uma diminuição dos valores médios de desvio padrão e coeficiente de variação, em média de 64% e 56%, respetivamente, salvo a mistura B 50 que regista, para o referido período, uma redução do desvio padrão de 4% e um aumento do coeficiente de variação de 27%.

A variação do módulo de elasticidade secante, para idades de ensaio, em função das misturas de BAC produzidas é apresentada na Figura 4.7.

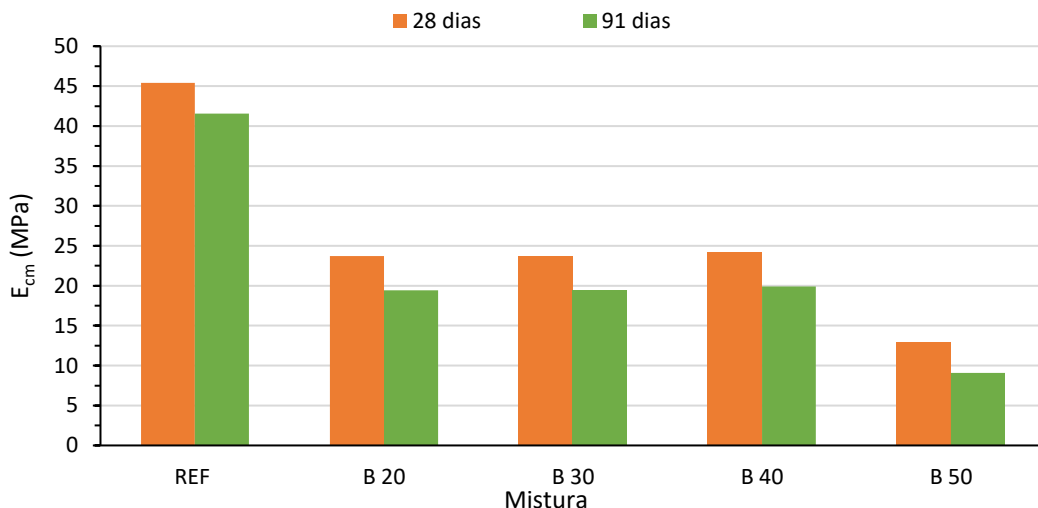


Figura 4.7 - Variação do módulo de elasticidade para todas as misturas de BAC

Ao analisar os resultados obtidos verifica-se, tal como na resistência à compressão uniaxial, um decaimento das características do BAC entre as misturas com substituição de cimento e a de referência. No entanto, entre amassaduras que contêm CFRSU só são observáveis variações significativas no comportamento a partir de um nível de substituição de

40% (B 40), até este ponto, a variação é praticamente inexistente, tomando valores não superiores a 3%.

Relativamente à diminuição do valor com a idade, não se encontrou uma explicação plausível para este comportamento. No entanto, dado que a evolução é uniforme entre todas as misturas, esta variação poderá ter resultado da dificuldade que se teve em calibrar a curva de tensão/extensão para o patamar de ensaio.

Ravasan (2014) ao estudar a produção de betões com substituição de agregado fino por CFRSU, para valores que vão dos 5% aos 80%, verifica igualmente uma redução, ainda que menos significativa, no valor do módulo de elasticidade entre estas misturas e a de referência (sem qualquer tipo de adição).

Analisando os resultados de Pokorný et al. (2016), verifica-se que a introdução de zinco reduz, tal como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do betão. Desta forma, é possível que a diferença verificada entre a mistura de referência e as restantes se deva à eventual presença deste nas CFRSU.

A possibilidade de existirem metais nas CFRSU deve ser considerada quando se analisa o módulo de elasticidade dos BAC produzidos. Bertolini, Carsana, Cassago, Curzio, & Collepari (2004), estudaram a produção de betões com substituição do cimento por CFRSU e verificaram que o betão apresentava uma elevada expansão (ainda nos moldes), comportamento que os autores atribuem à libertação de hidrogénio que ocorre por corrosão dos metais presentes na adição quando sujeitos a um ambiente alcalino.

O presente trabalho apresentou uma expansão semelhante em todas as misturas produzidas, Figura 4.8, desta forma, é possível que as mesmas reações tenham ocorrido nos betões estudados, afetando o módulo de elasticidade.



Figura 4.8 - Expansão inicial do betão

O Quadro 3.1 do EC 2, NP EN 1992-1-1 (2010), apresenta para o cálculo do valor médio do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão uniaxial em cilindros a equação (4.6):

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm,cil}}{10} \right)^{0,3}, (\leq C50/60) \quad (4.6)$$

Na Figura 4.9, é apresentada a variação média do módulo de elasticidade secante em função da resistência à compressão uniaxial em provetes cilíndricos para todas as misturas de BAC produzidas e para a expressão proposta pelo EC 2.

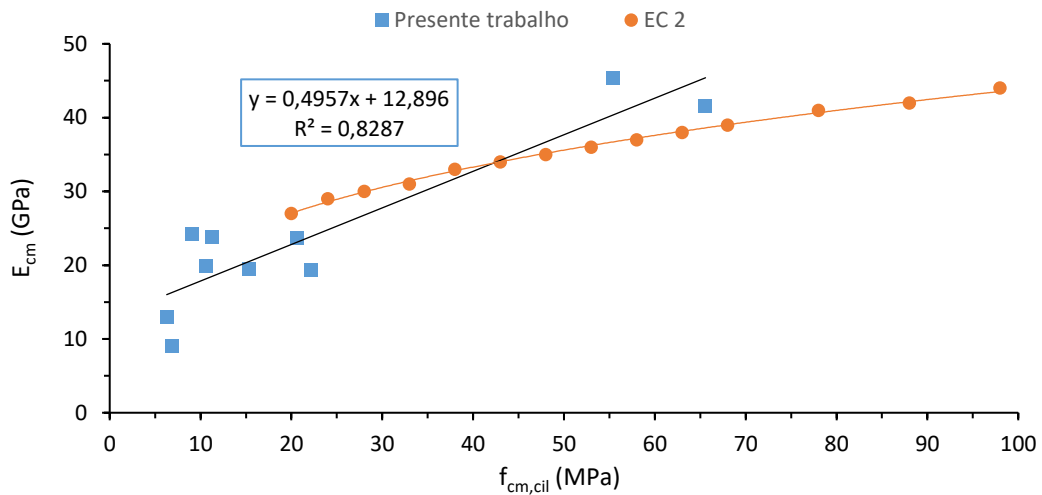


Figura 4.9 - Relação entre o E_{cm} e o $f_{cm,cil}$ para todas as misturas de BAC e para a expressão proposta pelo EC 2

Com a análise dos resultados obtidos, verifica-se uma correlação linear satisfatória de $R^2 = 0,8287$ para a evolução do módulo de elasticidade secante, sendo que, quando comparada com a expressão proposta pelo EC 2, NP EN 1992-1-1 (2010), para valores de $f_{cm,cil}$ inferiores a aproximadamente 42 MPa os resultados obtidos para o E_{cm} são ligeiramente inferiores em quanto que, para valores superiores a 42 MPa esta tendência inverte-se.

4.2.1.4 Retração

A extensão total de retração foi determinada de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.1.4, que tem por base a especificação LNEC E 398 (1993) para as misturas apresentadas em 3.1.1.

Na Tabela 4.7 podem ser consultadas as variações médias da extensão da retração ao longo do tempo para as idades de 3, 7, 14, 28, 42, 56, 77 e 91 dias. No anexo A.2.5 pode ser consultada a informação das leituras diárias e a respetiva temperatura e humidade relativa.

Tabela 4.7 - Extensão de retração ao longo do tempo

Mistura	$\epsilon_{cs\ 3}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 7}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 14}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 28}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 42}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 56}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 77}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{cs\ 91}$ [$\mu\text{m/m}$]
REF [55,38 MPa]	-28	-109	-204	-361	-420	-450	-459	-495
B 20 [20,57 MPa]	92	5	-164	-373	-421	-467	-541	-588
B 30 [11,23 MPa]	90	-21	-146	-365	-499	-583	-646	-664
B 40 [9,10 MPa]	-83	-213	-335	-595	-668	-744	-845	-842
B 50 [6,28 MPa]	-63	-155	-352	-707	-798	-862	-954	-935

As curvas de evolução da extensão de retração para as diferentes misturas de BAC produzidas, em função da idade de ensaio, são apresentadas na Figura 4.10.

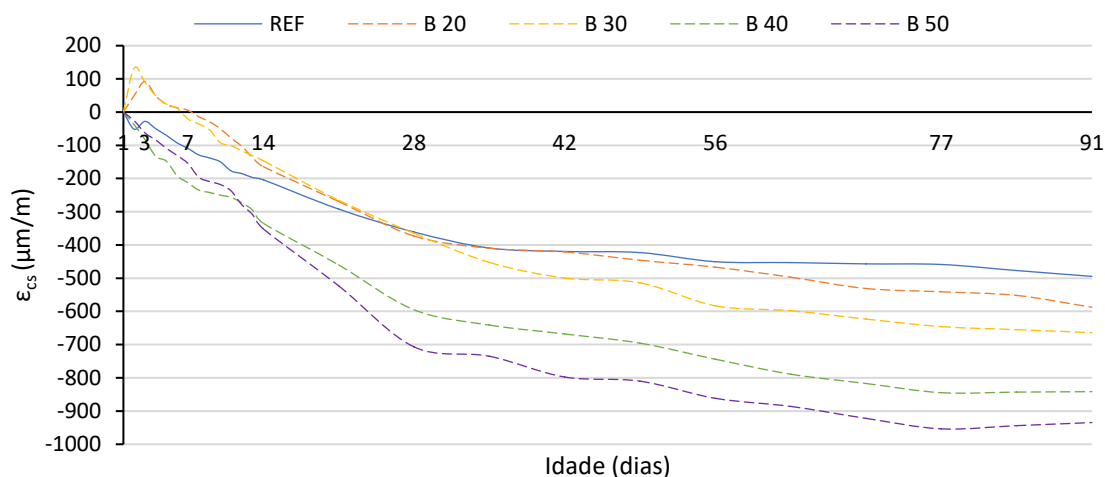


Figura 4.10 - Evolução da extensão de retração ao longo do tempo

Considerando os valores expostos na Tabela 4.7 e a evolução das curvas de extensão de retração apresentadas, percebe-se que o valor absoluto desta propriedade tende a aumentar com a idade do ensaio. O incremento da percentagem de substituição provoca também um aumento da extensão de retração das misturas com CFRSU comparativamente ao betão de referência (REF), atingindo-se aos 91 dias, diferenças que variam entre 16% e 47%, para as misturas B 20 e B 50, respetivamente.

A evolução desta propriedade é, no entanto, semelhante para todas as misturas, mais acelerada até aos 28 dias, atingindo mais de 50% do valor final (91 dias), tendo a partir desta altura uma evolução mais gradual.

Um comportamento semelhante foi observado por Cheng (2012), tendo verificado um desenvolvimento mais acelerado da extensão por retração nos primeiros 28 dias, evoluindo progressivamente até aos 91 dias. Os resultados apresentados demonstram igualmente um declínio do comportamento das misturas com o aumento da percentagem de substituição de cimento

No mesmo sentido, Whittaker, Taylor, Li, Li, & Black (2009), ao estudar o efeito desta adição na produção de argamassas, verificaram uma maior retração nas misturas com percentagens de substituição mais elevadas, aumento este que, segundo os autores, se deve em parte ao aumento da razão A/C que resulta do aumento da percentagem de substituição.

Analisando os resultados apresentados por Pera et al. (1997) verifica-se que a retração das misturas com CFRSU pode ser agravada caso não se evitem as reações de corrosão do alumínio. O autor apresenta esta conclusão, com base no trabalho que desenvolveu, onde verificou que se a adição passasse por um processo de tratamento por imersão em hidróxido de sódio durante 15 dias, até que todo o hidrogénio se liberte, com posterior lavagem e secagem, a sua utilização das CFRSU não teria consequências negativas para a retração do betão produzido, dado que as reações do alumínio não ocorreriam na fase de hidratação do cimento.

A Tabela 4.8 apresenta a estimativa dos valores da extensão total de retração, para BC, de acordo com as expressões propostas pelo EC 2, NP EN 1992-1-1 (2010), para as idades consideradas anteriormente.

Tabela 4.8 - Extensão de retração ao longo do tempo, segundo o EC 2

Mistura	fcm,cil,28d [MPa]	$\epsilon_{cs\ 3}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 7}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 14}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 28}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 42}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 56}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 77}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{cs\ 91}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
EC 2 [20 MPa]	20	-92	-219	-352	-482	-546	-584	-619	-635
EC 2 [30 MPa]	30	-90	-207	-329	-448	-508	-543	-576	-590
EC 2 [50 MPa]	50	-88	-189	-293	-396	-448	-479	-508	-521
EC 2 [60 MPa]	60	-89	-183	-280	-377	-426	-455	-483	-495

Os valores de obtidos foram determinados pelo somatório da retração por secagem e da retração autógena, equação (4.7), que por sua vez dependem da geometria do provete, do tipo de cimento, da resistência mecânica e da humidade relativa.

A extensão da retração depende da migração da água através do betão endurecido e evolui lentamente ao longo do tempo, a extensão autógena ocorre nos primeiros dias, particularmente, durante o processo de endurecimento do betão.

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (4.7)$$

Sendo:

ϵ_{cs} – Extensão total de retração;

ϵ_{cd} – Extensão de retração por secagem;

ϵ_{ca} – Extensão de retração autógena.

Com a análise dos valores apresentados na Tabela 4.8, verifica-se o aumento da extensão total do betão com a diminuição da resistência à compressão. Para comparar as extensões propostas pelo EC 2 com as obtidas no presente estudo, é apresentado na Figura 4.11 a sobreposição das mesmas.

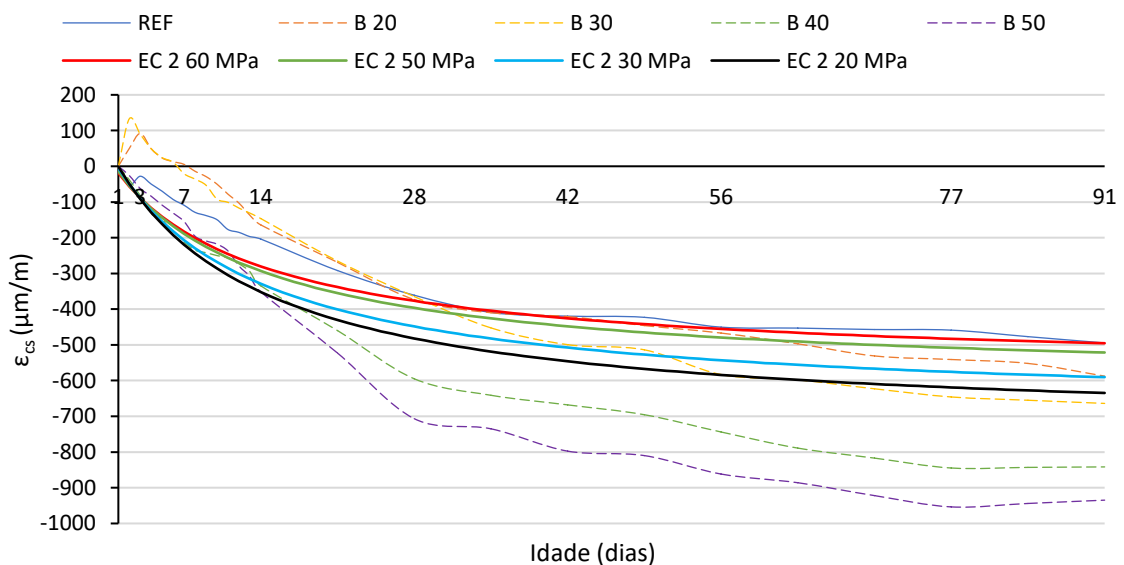


Figura 4.11 - Evolução da extensão de retração ao longo do tempo para as misturas produzidas e para a proposta do EC 2, em função da resistência mecânica

A sobreposição das curvas permite verificar que para as primeiras idades, no modelo de EC 2 a extensão evolui de forma mais significativa, tendo tendência a estabilizar ao longo do tempo. Comparando individualmente as curvas das misturas produzidas com a mais próxima do referido modelo, particularmente a extensão aos 91 dias, verifica-se que: as misturas REF e B 20 apresentam um valor absoluto inferior ao previsto pelo EC 2, correspondendo a aproximadamente 97% e 92%, respetivamente, do valor final indicado pela referida norma.

Para as misturas B 30, B 40 e B 50 não é possível comparar diretamente os resultados obtidos com uma curva do EC 2 com a mesma resistência mecânica, pode-se ainda assim, antecipar que para a tendência apresentada, a mistura B 30 deveria apresentar valores ajustados ao comportamento proposto pelo EC 2 e as restantes misturas, por sua vez, apresentariam um valor absoluto superior.

4.2.2 Propriedades de durabilidade

O estudo da durabilidade do BAC foi conseguido através da execução dos seguintes ensaios: absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, difusão de cloretos, resistividade elétrica e carbonatação.

4.2.2.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a metodologia descrita no subcapítulo 3.5.2.1 e de acordo com a especificação LNEC E 394 (1993) para as misturas introduzidas em 3.1.1. Os valores apresentados dizem respeito às idades de 28 e 91 dias.

Os resultados obtidos para valor médio de absorção de água por imersão ($A_{m,id}$), o desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C_{var}), a diferentes idades, são apresentados na Tabela 4.9. No anexo A.3.1 podem ser consultados os valores individuais de absorção de água por imersão e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.9 - Absorção de água por imersão

Mistura	A_{m28d} [%]	S [%]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	A_{m91d} [%]	S [%]	C_{var} [%]	ΔREF [%]
REF	13,50	0,67	4,95	0,00	10,02	0,19	1,92	0,00
B 20	13,33	0,11	0,83	-1,30	13,86	0,54	3,91	38,36
B 30	14,78	0,91	6,16	9,45	15,24	1,05	6,90	52,18
B 40	15,81	0,94	5,98	17,07	15,75	1,20	7,63	57,25
B 50	19,11	2,61	13,68	41,53	19,18	0,66	3,44	91,55

Analisando os resultados obtidos, o que se verifica é que, globalmente, os desvios padrão e coeficientes de variação são aceitáveis e apresentam uma reduzida dispersão dos valores. Para os 28 dias de idade o desvio padrão médio das misturas é de 1,05% e o coeficiente de variação médio 6,32%. Ambos os valores são agravados pelos resultados da mistura B 50 que, nesta data, apresenta valores de desvio padrão e coeficiente de variação, superiores aos restantes em média em 75% e 67%, respetivamente. Aos 91 dias, estas diferenças são

suavizadas, passando os valores médios das misturas de desvio padrão e coeficiente de variação para, 0,73% e 4,76%, respetivamente.

Na Figura 4.12, é apresentada a evolução da absorção de água por imersão, para as duas idades, em função das misturas de BAC produzidas.

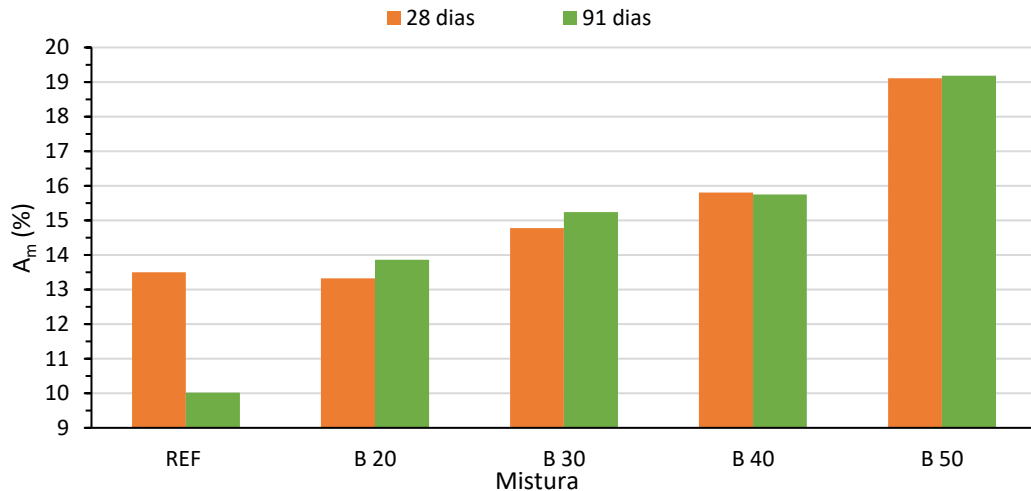


Figura 4.12 - Evolução da absorção de água por imersão ao longo do tempo

Com a análise dos resultados obtidos, verifica-se que a absorção de água por imersão aumenta com o incremento da percentagem de substituição de cimento. O estudo da evolução desta propriedade pode, no entanto, ser feito de forma separada para as duas idades estudadas, aos 28 dias de idade só se detetam variações significativas, entre a mistura REF e as que utilizam CFRSU, da mistura B 30, em diante. A mistura B 20, ainda que apresente melhorias face à mistura de referência, a variação do valor é de aproximadamente 1%, podendo como tal ser desprezada.

Aos 91 dias de idade, o comportamento da mistura REF é substancialmente diferente do das misturas com CFRSU, exibindo melhorias significativas no que respeita à capacidade de absorção de água por imersão (25%), em quanto que as restantes apresentam variações praticamente insignificantes, inferiores a 4%.

Silva (2013) verificou um comportamento semelhante ao das misturas com CFRSU ao produzir diversas misturas com adição de FC para as percentagens de substituição de 30%, 60% e 70%. A variação de absorção de água com a idade foi igualmente reduzida, tendo uma variação média de aproximadamente 4%. Comparando os resultados de Silva (2013) com os obtidos no presente estudo, fica patente que, o aumento da percentagem de substituição e consequentemente da razão A/C influenciam de forma negativa o desempenho do betão, comportamento poderá dever-se ao facto de a porosidade do betão aumentar e por conseguinte o volume de poros acessíveis com o incremento da razão A/C .

4.2.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado de acordo com o procedimento descrita no subcapítulo 3.5.2.2 seguindo a especificação LNEC E 393 (1993) para as misturas apresentadas em 3.1.1, considerando as idades de 28 e 91 dias.

Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 4.10, nomeadamente, os valores médios de absorção de água por capilaridade (Abs_m), o desvio padrão (S), coeficiente de variação (C_{var}), coeficiente de absorção capilar ($Coef_{abs}$) e o seu coeficiente de correlação linear. Os valores individuais de absorção de água por capilaridade e os dados auxiliares do ensaio podem ser consultados no anexo A.3.2.

Tabela 4.10 - Absorção de água por capilaridade

Mistura	Idade [dias]	Absorção t _{3 horas}			Absorção t _{6 horas}			Absorção t _{24 horas}			Absorção t _{72 horas}			Coeficiente de absorção	
		Abs_m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C_{var} [%]	Abs_m [MPa]	S [MPa]	C_{var} [%]	Abs_m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C_{var} [%]	Abs_m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C_{var} [%]	$Coef_{abs}$ [mm/min ^{0,5}]	R^2
REF	28	1,43	0,28	19,47	1,83	0,33	18,12	2,57	0,46	17,83	2,96	0,42	14,34	0,095	0,98
	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
B 20	28	1,48	0,11	7,33	1,87	0,10	5,25	2,75	0,24	8,55	3,45	0,26	7,51	0,095	0,96
	91	0,80	0,23	28,75	0,94	0,28	29,60	1,34	0,28	20,84	1,85	0,29	15,71	0,047	0,91
B 30	28	1,83	0,17	9,47	2,40	0,24	9,83	3,79	0,44	11,66	4,89	0,55	11,25	0,125	0,99
	91	0,97	0,04	4,59	1,15	0,07	5,68	1,68	0,09	5,15	2,34	0,23	9,78	0,058	0,92
B 40	28	1,67	0,33	19,55	2,23	0,39	17,31	3,73	0,60	15,96	5,26	0,85	16,24	0,116	0,99
	91	0,93	0,11	12,12	1,08	0,11	10,53	1,51	0,17	11,46	2,00	0,17	8,65	0,054	0,89
B 50	28	1,84	0,03	1,78	2,45	0,09	3,53	3,96	0,20	5,15	5,21	0,23	4,35	0,126	0,99
	91	1,07	0,12	10,84	1,21	0,14	11,80	1,70	0,17	10,00	2,34	0,20	8,50	0,059	0,85

Observando os resultados obtidos, verifica-se que os valores de desvio padrão e coeficiente de variação são relativamente elevados, o que implica uma maior variabilidade dos resultados obtidos. Da totalidade das misturas, aproximadamente 63% destas, apresentam coeficientes de variação superiores a 10%, variando para todas as misturas entre 1,78% e 29,60%.

Na Figura 4.13 e Figura 4.14, são apresentadas as curvas de absorção capilar das diferentes misturas de BAC produzidas, para as idades de 28 e 91 dias, respetivamente.

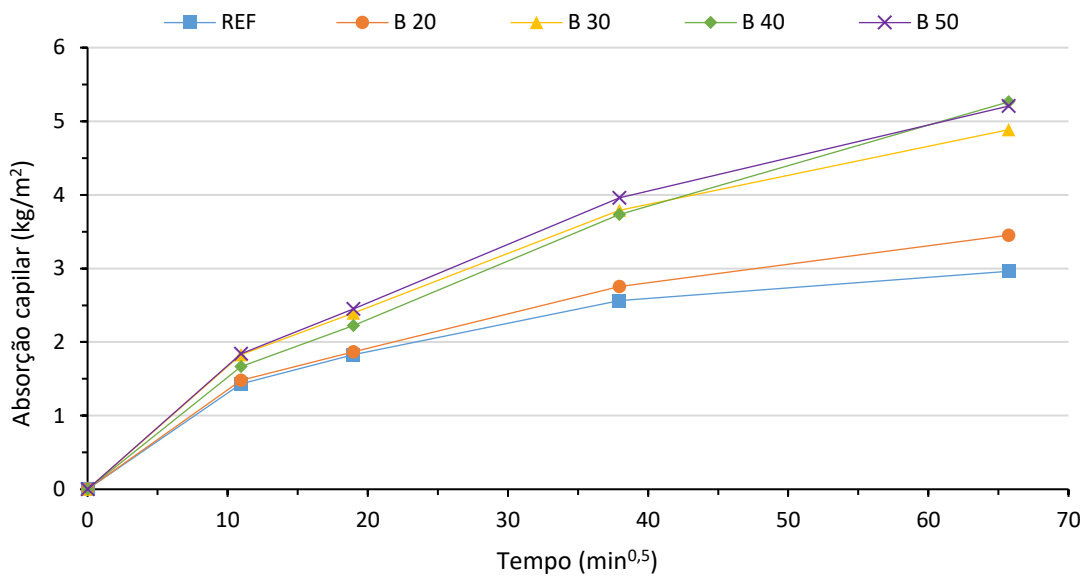


Figura 4.13 - Curvas de absorção capilar aos 28 dias para todas as misturas

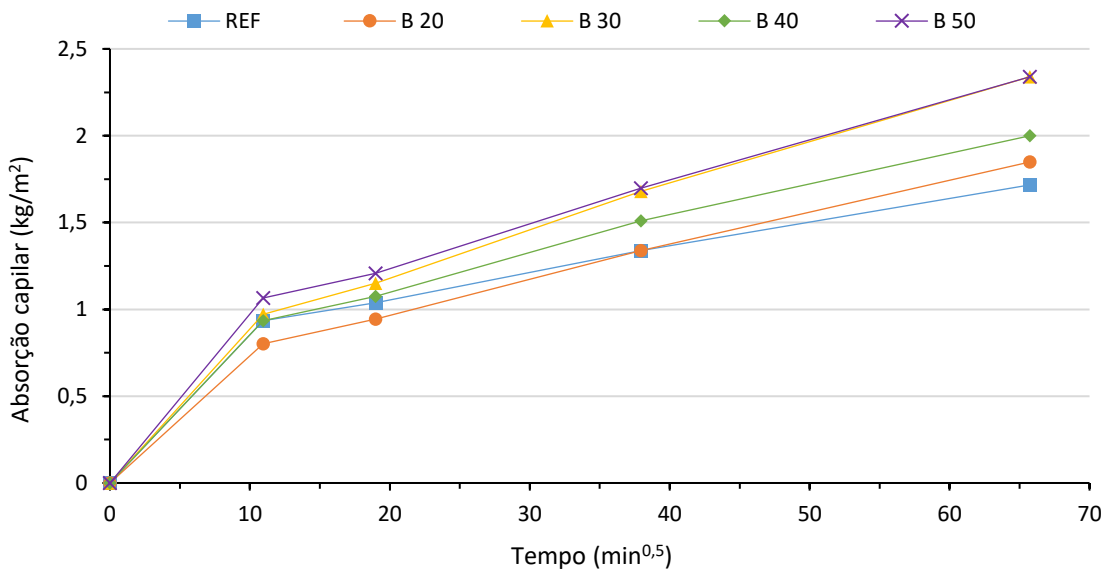


Figura 4.14 - Curvas de absorção capilar aos 91 dias para todas as misturas

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma redução da absorção de água por capilaridade com o aumento da idade do betão. Observa-se ainda que a maior variação de absorção de água por capilaridade ocorre, em ambas as idades, nas primeiras 6 horas, onde se atinge aproximadamente 50% do valor de absorção final às 72 horas.

No que respeita à evolução desta propriedade, verifica-se um comportamento semelhante entre todas as misturas, mas com valores de absorção distintos, aos 28 dias, entre as misturas REF e B 20 e as restantes, com uma diferença média de aproximadamente 37% entre o primeiro (REF e B 20) e segundo (restantes) conjunto de misturas, aos 91 dias esta

diferença é reduzida para 19%, podendo este comportamento deve-se facto da porosidade do betão ter tendência a diminuir com a idade.

Lin (2005) verifica um comportamento similar ao estudar o comportamento de pastas de cimento com substituição de cimento (0%, 10%, 20% e 40%) por CV resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos e escórias obtidas a partir da vitrificação das referidas cinzas (incineração das CV a uma temperatura superior a 1300 °C com posterior extinção em água ou arrefecimento ao ar). Observando os resultados apresentados, verifica-se que tanto na primeira adição como na segunda, a mistura de referência (0% de substituição) e as misturas com 20% de substituição apresentam uma porosidade semelhante para os 28 e 91 dias. As misturas com 40% de substituição, por sua vez, aos 28 dias têm uma porosidade superior à mistura de referência, aproximadamente 20%, diferença que aos 91 dias de idade é praticamente anulada passando as referidas misturas a apresentar uma porosidade semelhante.

4.2.2.3 Difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos, para os 28 e 91 dias, foi determinado com a aplicação do procedimento apresentado no subcapítulo 3.5.2.3, enquadrado pela especificação LNEC E 463 (2004) para as misturas apresentadas em 3.1.1.

Na Tabela 4.11 pode-se verificar o valor médio do coeficiente de difusão para cada uma das idades de ensaio ($D_{m,id}$), desvio padrão (S) e o coeficiente de variação (C_{var}). No anexo A.3.3 são apresentados os valores individuais do coeficiente de difusão e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.11 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as misturas

Mistura	D_{m28d} [$10^{-12}m^2/s$]	S [$10^{-12}m^2/s$]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	D_{m91d} [$10^{-12}m^2/s$]	S [$10^{-12}m^2/s$]	C_{var} [%]	ΔREF [%]
REF	5,36	0,95	17,81	0,00	2,84	0,46	16,18	0,00
B 20	11,63	0,59	5,09	117,07	9,95	0,84	8,43	250,82
B 30	12,76	0,63	4,97	138,19	11,95	0,66	5,50	321,50
B 40	14,67	0,86	5,88	173,79	12,96	1,01	7,82	357,01
B 50	21,58	0,63	2,91	302,74	16,45	1,89	11,48	480,13

Analisando os resultados da difusão de cloretos, verifica-se que, em geral, os valores de desvio padrão e coeficiente de variação são aceitáveis. É, no entanto, importante ressaltar que a mistura REF apresenta maior variabilidade de resultados, em virtude de apresentar coeficientes de variação de 17,81% e 16,18% para os 28 e 91 dias, respetivamente. As restantes misturas apresentam um valor médio para o coeficiente de variação, aos 28 dias, de 4,71% variando entre 2,91% e 5,88% e aos 91 dias de 8,31%, para valores que variam entre 5,50% e 11,48%.

Na Figura 4.15, é apresentada a evolução do coeficiente de difusão de cloretos para os 28 e 91 dias, em função das misturas de BAC produzidas.

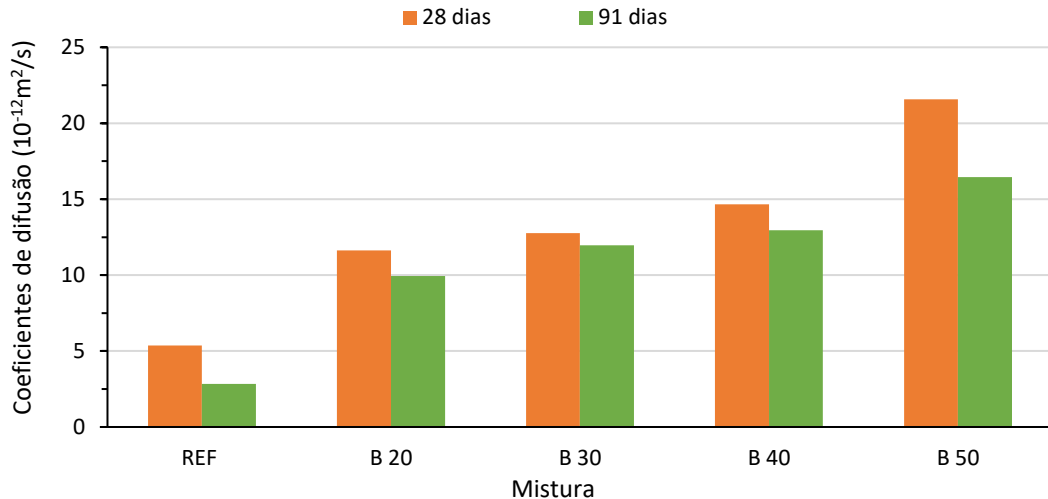


Figura 4.15 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as misturas

Com a análise dos resultados obtidos, fica patente a redução do coeficiente de difusão de cloretos com a idade do betão e o seu aumento com a utilização de CFRSU e incremento da razão A/C. Quando comparada com as restantes amassaduras a mistura REF apresenta valores significativamente inferiores, sendo a mistura B 50 a que apresenta piores valores, em média 79% superiores à mistura REF. Por sua vez a variação do coeficiente de difusão de cloretos entre as restantes misturas (B 20, B 30 e B 40) é mais reduzida, aumentando aproximadamente 10% por patamar de substituição.

Van Der Wegen et al. (2013) produziram três amassaduras de betão com o objetivo de estudar o seu comportamento face à utilização de CFRSU. A primeira amassadura produzida funcionou como mistura de referência (sem qualquer adição), para a segunda mistura, o agregado grosso foi substituído em 20% por CFRSU e na terceira substituiu-se 20% do agregado fino e 20% de agregado grosso. No que respeita à propriedade em análise, os autores verificaram que, tal como no presente trabalho, quanto maior a quantidade de CFRSU utilizada, mais elevado é o coeficiente de difusão, sendo o valor da mistura de referência, em média, 26% inferior às restantes.

Ao comparar a evolução da difusão de cloretos com a absorção de água por imersão, Figura 4.16, verifica-se uma elevada correlação linear entre as duas grandezas de $R^2 = 0,8293$ e $R^2 = 0,9748$ para os 28 e 91 dias, respetivamente.

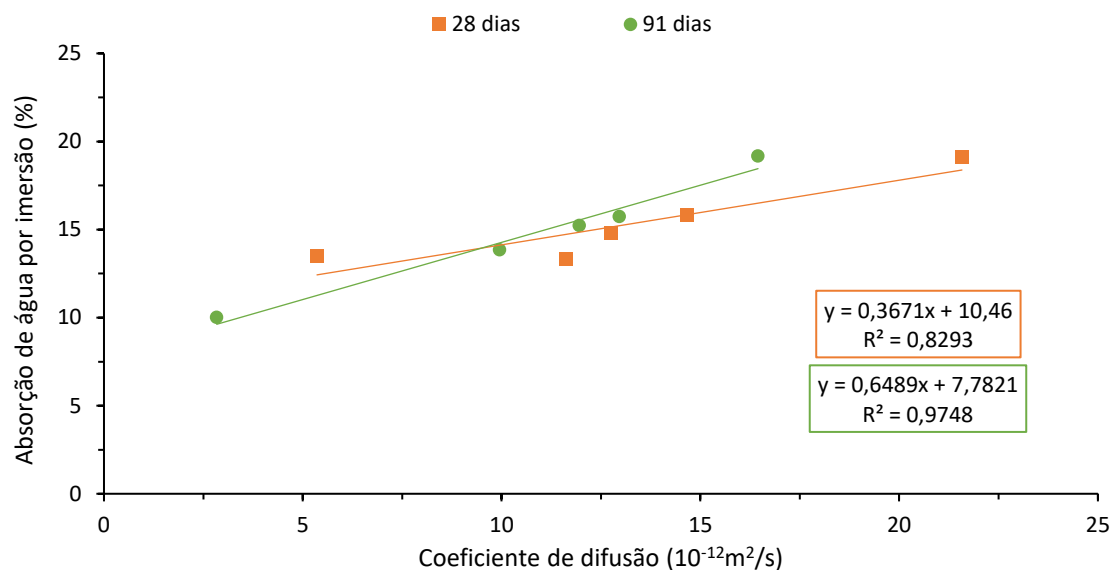


Figura 4.16 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por imersão para todas as misturas

4.2.2.4 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica das misturas apresentadas em 3.1.1, foi determinada por aplicação do procedimento apresentado no subcapítulo 3.5.2.4, enquadrado pela proposta de norma europeia do grupo de trabalho Chlortest (2005), para os 28 e 91 dias.

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores médios de resistividade elétrica para cada idade ($\rho_{m, id}$), desvio padrão (S) e o coeficiente de variação (C_{var}). No anexo A.3.4 são indicados os valores individuais de resistividade elétrica e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.12 - Resistividade elétrica para todas as misturas

Mistura	ρ_{m28d} [$\Omega.m$]	S [$\Omega.m$]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	ρ_{m91d} [$\Omega.m$]	S [$\Omega.m$]	C_{var} [%]	ΔREF [%]
REF	79,78	8,40	10,53	0,00	229,58	15,78	6,88	0,00
B 20	32,02	6,71	20,97	-59,86	55,49	7,42	13,37	-75,83
B 30	25,21	6,63	26,30	-68,40	41,10	1,16	2,82	-82,10
B 40	30,92	6,30	20,37	-61,24	46,08	8,38	18,18	-79,93
B 50	19,11	2,60	13,59	-76,05	41,37	3,54	8,56	-81,98

Observando a variabilidade dos resultados apresentados, verifica-se que esta diminui dos 28 dias para os 91 dias, apresentando para a maioria das misturas valores aceitáveis, tanto de desvio padrão como coeficiente de variação, ajustados aos valores indicados por Chlortest (2005). O referido documento estabelece que os desvios padrão devem ser inferiores a 7,09% e 12,96% para os 28 e 91 dias, respetivamente, o coeficiente de variação por sua vez deve ser menor que 20% (entre 11% e 20%) para que esteja assegurada a repetibilidade do ensaio e inferior a 30% (entre 24% e 28%) para garantir a reprodutibilidade.

Na Figura 4.17, é apresentada a evolução da resistividade elétrica ao longo do tempo, em função das misturas de BAC produzidas.

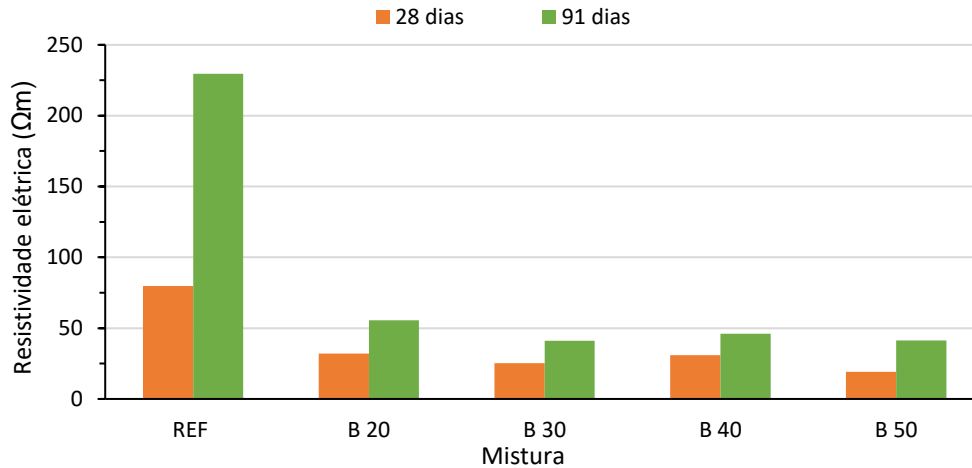


Figura 4.17 - Resistividade elétrica para todas as misturas

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a resistividade elétrica de todas as misturas aumenta com a idade do betão e tem tendência a diminuir com o incremento da substituição de cimento.

A mistura REF quando compara com as restantes obteve valores significativamente superiores de resistividade elétrica, de 66% e 80% para os 28 e 91 dias, respetivamente. Excluindo a mistura de referência que tem um incremento de 65% do seu valor de resistividade elétrica, das restantes, a que apresenta uma melhoria mais significativa dos 28 para os 91 dias é a B 50, com uma melhoria de 54%, as outras misturas tem variações médias de aproximadamente 38%. Com esta análise o que se verifica é que o tipo de adição utilizada tem mais influência que a percentagem de substituição.

A mesma conclusão pode ser retirada a partir da análise do trabalho desenvolvido por Silva (2013), onde apresenta resultados para as misturas com introdução de FC, que variam da mesma forma que as misturas com CFRSU, incremento reduzido com o aumento da idade (37%). O mesmo autor produziu ainda amassaduras de BAC com introdução de CV, para as percentagens de substituição de 30%, 60% e 70%, tendo verificado um aumento médio do valor de resistividade elétrica de 72% dos 28 para os 91 dias, tendência equivalente à apresentada pela mistura REF.

Analisando o comportamento dos BAC produzidos por Silva (2013) e dos BAC em estudo, percebe-se que a adição de CV, por oposição ao FC e às CFRSU, favorece o aumento da resistividade elétrica. Esta diferença poderá dever-se ao facto de as CV, ao contrário das outras adições analisadas, terem atividade pozolânica, melhorando significativamente as características do betão produzido com o a idade.

Para avaliar indiretamente o mecanismo de difusão de cloretos é comum estabelecer-se uma correlação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão, dado que, é expectável que estas propriedades variem de forma inversamente proporcional. Uma vez que, para a resistividade elétrica pretende-se o maior valor possível, pois representa a resistência de um determinado elemento à passagem de corrente em quanto que para o coeficiente de difusão, o

objetivo é obter um valor o mais reduzido possível, o que corresponde a um elemento com baixa capacidade de se deixar atravessar por os iões.

Na Figura 4.18 pode-se verificar uma boa correlação entre as referidas propriedades de $R^2 = 0,8841$, com pouca variabilidade de resultados.

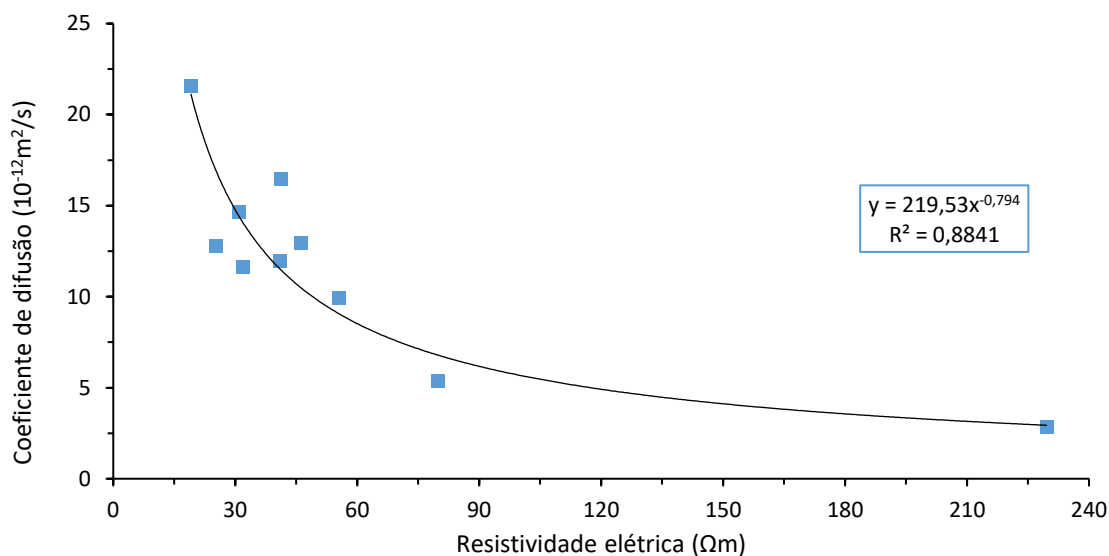


Figura 4.18 - Relação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos

4.2.2.5 Carbonatação

Para determinar a resistência à carbonatação foi seguido o procedimento retratado no subcapítulo 3.5.2.5, enquadrado pela especificação LNEC E 391 (1993) para as misturas apresentadas em 3.1.1 aos 14, 21, 49, 70 e 91 dias.

Apresenta-se na Tabela 4.13 o valor médio da profundidade de carbonatação a cada uma das idades ($d_{km,id}$), desvio padrão (S), coeficiente de variação (C_{var}) e o coeficiente de carbonatação (K_c). Os valores individuais da profundidade de carbonatação e os dados auxiliares do ensaio podem ser consultados no anexo A.3.5. Nestas tabelas, a denominação “<1” foi aplicada quando para determinada idade, não se detetou carbonatação passível de ser medida. No caso específico a mistura REF por esta não apresentar carbonatação em nenhuma das idades, o coeficiente K_c assume o valor mínimo de 1 mm/ano^{0,5}.

Tabela 4.13 - Profundidade de carbonatação e coeficientes para todas as misturas

Mistura	$d_{km,14d}$ [mm]	S [mm]	C_{var} [%]	$d_{km,21d}$ [mm]	S [mm]	C_{var} [%]	$d_{km,49d}$ [mm]	S [mm]	C_{var} [%]	$d_{km,70d}$ [mm]	S [mm]	C_{var} [%]	$d_{km,91d}$ [mm]	S [mm]	C_{var} [%]	K_c [mm/ano ^{0,5}]	R^2 [%]
REF	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	1,00	-
B 20	<1	-	-	3	0,62	23,39	3	0,61	20,41	3	0,85	24,87	4	0,77	19,73	8,52	0,81
B 30	4	0,62	16,56	5	0,52	10,06	8	1,27	16,45	8	0,94	11,69	9	1,76	19,37	18,36	0,98
B 40	9	0,37	4,21	10	0,54	5,21	11	0,31	2,88	12	0,89	7,74	12	1,54	12,58	22,62	0,84
B 50	13	0,16	1,23	15	0,41	2,77	34	0,35	1,03	41	0,26	0,63	48	0,24	0,49	99,14	0,96

Ao analisar a Tabela 4.13, verifica-se um aumento do coeficiente K_c com o aumento da percentagem de substituição cimento. No que respeita à variabilidade de resultados, os desvios

padrão têm um valor médio de 0,69 mm, variando entre 0 mm e 1,76 mm e os coeficientes de variação entre 0% e 24,87%, tendo um valor médio de 10,59%.

Na Figura 4.19, é apresentada a evolução da profundidade de carbonatação, das diferentes misturas de BAC, em função da idade de ensaio.

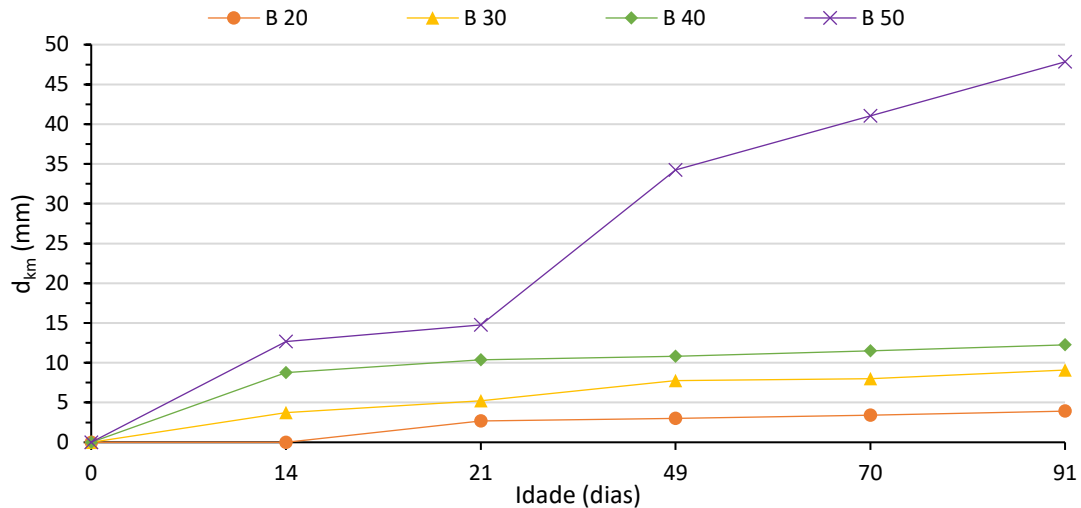


Figura 4.19 - Profundidade de carbonatação para todas as misturas

Considerando os resultados obtidos, verifica-se que a profundidade de carbonatação aumenta com a percentagem de substituição. No entanto, a mistura B 50 a partir dos 21 dias de idade (onde se verifica uma profundidade de carbonatação correspondente a aproximadamente 30% do valor final (91 dias)) tem claramente um comportamento distinto das restantes, aumentando significativamente a profundidade de carbonatação até ao ponto em que o BAC fica praticamente carbonatado na sua totalidade. As restantes amassaduras têm um comportamento semelhante entre elas, aos 21 dias atingem em média 70% do valor final de carbonatação, tendo uma evolução gradual até aos 91 dias.

Ao analisar os resultados apresentados por Silva (2013) verifica-se uma tendência semelhante, ainda que para valores de carbonatação inferiores, com o incremento da percentagem de substituição de cimento a implicar o aumento da carbonatação do betão.

Este comportamento poderá dever-se ao facto de a variação da percentagem de substituição conduzir a um acréscimo da razão A/C que por sua vez provoca o aumento da porosidade do betão, facilitando a propagação do CO₂.

4.3 Ultra-sons

O ensaio de ultra-sons foi realizado para os 7, 28 e 91 dias de idade, de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007), seguindo o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.3 para as misturas apresentadas em 3.1.1.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.14, nomeadamente, o valor médio da velocidade dos ultra-sons de cada uma das idades ($V_{usm,c,id}$), o desvio padrão (S) e coeficiente

de variação (C_{var}). No anexo A.4 são apresentados os valores individuais da velocidade dos ultra-sons e os dados auxiliares do ensaio.

Tabela 4.14 - Velocidade de propagação de ultra-sons para todas as misturas

Mistura	$V_{usmc,7d}$ [m/s]	S [m/s]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	$V_{usmc,28d}$ [m/s]	S [m/s]	C_{var} [%]	ΔREF [%]	$V_{usmc,91d}$ [m/s]	S [m/s]	C_{var} [%]	ΔREF [%]
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
B 20	4315,73	89,45	2,07	-8,37	4082,80	251,23	6,15	-13,00	4297,90	44,94	1,05	-12,61
B 30	4003,18	92,48	2,31	-15,01	4010,23	136,43	3,40	-14,54	4108,81	82,00	2,00	-16,46
B 40	3737,29	86,03	2,30	-20,65	3961,29	10,90	0,28	-15,59	3927,48	67,69	1,72	-20,14
B 50	3669,03	16,95	0,46	-22,10	3965,83	79,47	2,00	-15,49	3660,26	36,18	0,99	-25,58

Observando os resultados apresentados, verifica-se uma reduzida variabilidade de valores, tendo os desvios padrão um valor médio de 75,53 m/s que varia entre 10,90 m/s e 251,23 m/s, o coeficiente de variação por sua vez varia entre 0,46% e 6,15%, com um valor médio de 1,84%.

Na Figura 4.20, é apresentada a evolução da velocidade de propagação de ultra-sons para os 7, 28 e 91 dias, em função das misturas de BAC produzidas.

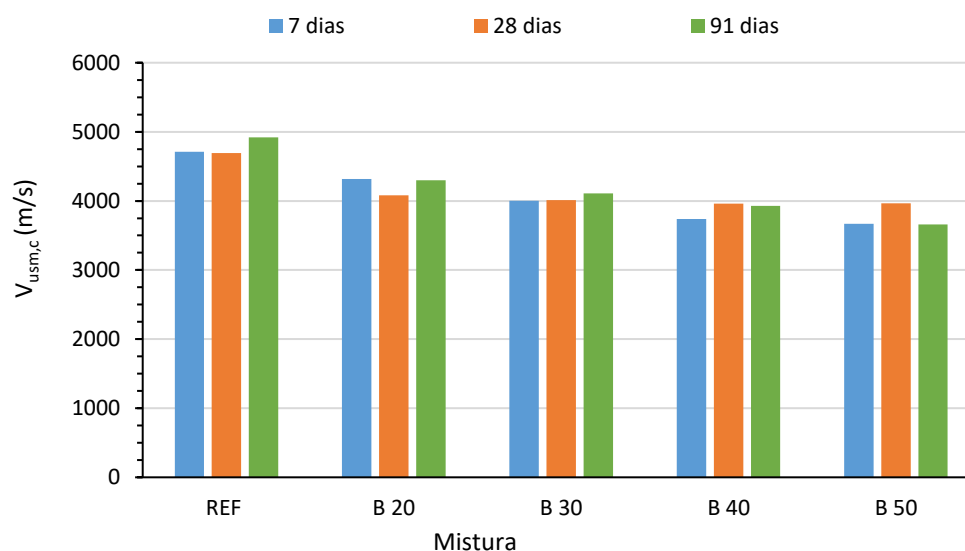


Figura 4.20 - Velocidade de propagação de ultra-sons para todas as misturas

Observando os resultados apresentados, verifica-se a tendência para a redução da velocidade de propagação de ultra-sons com o aumento da percentagem de substituição de cimento e da razão A/C. Por sua vez, a velocidade de propagação de ultra-sons em função da idade não apresenta variações significativas entre as três idades, verificando-se valores que variam entre 0,24% e 8,35%, com uma variação médio de 3,35%.

Dixit et al. (2016) estudaram o comportamento de betão com a substituição parcial de agregado fino por CFRSU (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%) e verificaram um comportamento semelhante ao descrito anteriormente, na medida em que, para as mesmas percentagens de substituição, a velocidade de propagação de ultra-sons diminuía com o aumento da percentagem de substituição, aproximadamente 4% entre cada mistura.

Relativamente aos valores de velocidade de propagação de ultra-sons para as várias misturas, os valores obtidos vão de encontro aos intervalos definidos e apresentados nos vários trabalhos consultados. De acordo com o documento da IAEA (2002) os valores de referência a considerar, para betões que apresentem uma massa volúmica de aproximadamente 2400 kg/m³, são, Tabela 4.15:

Tabela 4.15 - Classificação do betão segundo a velocidade de propagação dos ultra-sons, (adaptado de IAEA (2002))

V_{usm} [m/s]	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 - 3500	Duvidoso
2000 – 3000	Pobre
< 2000	Muito pobre

A norma IS 13311-1 (1992), indica valores semelhantes divergindo apenas para valores inferiores a 3500 m/s. A referida norma estabelece que, para valores de 3000 m/s a 3500 m/s o betão deve ser classificado como tendo média qualidade e como duvidoso para valores inferiores a 3000 m/s, para este intervalo de valores, sugere ainda que sejam realizados testes complementares para verificar a qualidade do betão produzido.

Ao comparar a evolução da velocidade de propagação dos ultra-sons com a resistência à compressão em provetes cúbicos, Figura 4.21, verifica-se uma reduzida dispersão de resultados com elevada correlação entre as duas grandezas de $R^2 = 0,9153$.

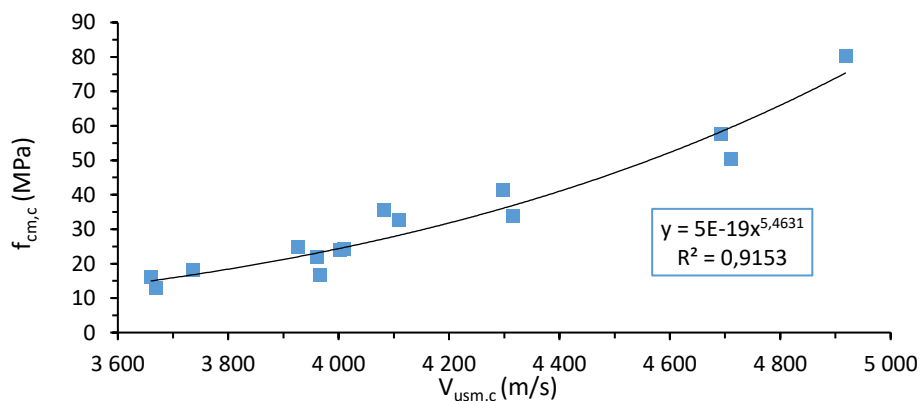


Figura 4.21 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultra-sons e a resistência à compressão

5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido procurou estudar as propriedades do BAC com introdução de CFRSU, no estado fresco e endurecido, com especial incidência no comportamento mecânico e de durabilidade, complementado pela avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons, de acordo com os objetivos estabelecidos no capítulo 1.

Desta forma, foram produzidas cinco amassaduras binárias de BAC de acordo com a norma NP EN 206-9 (2010), a primeira funcionando como referência com a substituição do cimento por 30% de CV e as restantes com introdução de CFRSU para a gama de valores de 20%, 30%, 40% e 50%, possibilitando assim uma visão mais alargada quanto à influencia desta adição no betão.

5.1 Estado fresco

O estudo do estado fresco, teve por base o método proposto por Nepomuceno (2005) no seu trabalho de Doutoramento, com a finalidade de garantir que os BAC produzidos apresentavam uma trabalhabilidade adequada sem que ocorra segregação ou exsudação e cumprindo com as requisitos estabelecidos no subcapítulo 3.1.1. O comportamento das várias misturas no estado fresco foi avaliado pelos ensaios de espalhamento, escoamento no funil V e de escoamento na caixa L e enquadrado com os requisitos definidos pela norma NP EN 206-9 (2010).

No que respeita aos ensaios de espalhamento e de funil V, todas as misturas apresentaram fluidez, velocidade de escoamento e viscosidade perfeitamente ajustadas ao estabelecido na referida norma. Quanto aos requisitos de fluidez por capacidade de passagem (escoamento na caixa L), as misturas B 20 e B 50 não obtiveram valores que respeitem os normalizados, ainda assim, os resultados conseguidos são aceitáveis e juntamente com a análise visual do betão, realizada a quando da execução do ensaio, permitem assegurar que os BAC produzidos apresentam adequada fluidez e capacidade de escoamento.

5.2 Comportamento mecânico

As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão uniaxial (cubos e cilindros), tração por compressão diametral, módulo de elasticidade secante e retração.

Relativamente à resistência à compressão do betão, esta diminui com a introdução de CFRSU, tendo-se verificado que este comportamento é devido à variação da percentagem de substituição e da razão A/C. A resistência das misturas aumentou com a idade, tendo-se desenvolvido maioritariamente até aos 7 dias e evoluindo de forma pouco significativa a partir desta idade. O decréscimo verificado nesta propriedade poderá dever-se ao facto da calcite assim como o zinco e o alumínio poderem afetar, cada um de sua maneira, o processo de cura do betão reduzindo a resistência do BAC.

Globalmente os provetes cilíndricos apresentam uma boa interdependência com os provetes cúbicos, apresentando um coeficiente de correlação de $R^2 = 0,9491$ e reduzida dispersão de resultados.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, esta evoluiu de forma idêntica à resistência à compressão uniaxial, tendo-se verificado igualmente uma redução da resistência com o aumento da percentagem de substituição de cimento e da razão A/C. A avaliação da superfície de rotura, permitiu verificar uma distribuição uniforme do agregado grosso sem aglomeração de partículas ou qualquer fenómeno de segregação ou exsudação. O incremento de CFRSU fez, no entanto com que ocorresse uma transição da secção de rotura, passando de uma rotura pelo agregado para uma rotura pela zona de interface entre o agregado e a pasta, fator que pode contribuir para o decréscimo da resistência do BAC. Ao avaliar estas duas propriedades ficou patente que apresentam uma e reduzida dispersão de resultados com boa correlação de $R^2 = 0,9479$, sendo os valores obtidos superiores aos estabelecidos pelo EC 2 para BC.

A introdução de CFRSU nas misturas de BAC reduz o valor de módulo de elasticidade secante face à mistura REF, comportamento que poderá dever-se ao retardamento do processo de cura do betão por parte do zinco ou à expansão que resulta da libertação de hidrogénio por parte dos metais constituintes das CFRSU ao serem corroídos. O módulo de elasticidade secante apresenta por sua vez, uma correlação satisfatória com a resistência à compressão uniaxial com $R^2 = 0,8287$, ao comparar a curva obtida no presente estudo com a proposta pelo EC 2 verifica-se que para valores de $f_{cm,cil}$ inferiores a aproximadamente 42 MPa os resultados obtidos no presente estudo são superiores, a partir deste ponto passam a ser inferiores aos do EC 2.

A extensão de retração evoluiu de forma equivalente às restantes propriedades mecânicas, variando entre os 495 $\mu\text{m/m}$ e os 935 $\mu\text{m/m}$. Quando se compara os resultados do presente estudo com a proposta do EC 2, observa-se que para percentagens de substituição inferiores a 20%, os BAC produzidos apresentam um melhor comportamento que o proposto pela referida norma, sendo visível a partir deste valor um decaimento desta propriedade, possivelmente associado à contribuição da maior quantidade de CFRSU e ao incremento da razão A/C.

Em geral, verifica-se um deterioramento das propriedades mecânicas do BAC da mistura B 20 até à B 50 com a utilização de CFRSU e com o aumento da razão A/C.

5.3 Durabilidade

Para avaliar a durabilidade dos BAC produzidos, foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, difusão de cloretos, resistividade elétrica e carbonatação.

A absorção de água por imersão é fortemente condicionada pelo volume de poros acessíveis do BAC, ao realizar o ensaio de absorção de água por imersão verificou-se um aumento da absorção com a introdução de CFRSU e com o incremento da razão A/C,

comportamento que poderá dever-se a uma maior porosidade das misturas onde a adição em estudo foi introduzida.

Relativamente à absorção de água por capilaridade, fica patente que esta diminui com a idade do betão e é afetada de forma negativa pela introdução de CFRSU. Ainda assim, a mistura B 20 apresenta um comportamento muito semelhante à mistura REF, com diferenças pouco significativas de aproximadamente 14% e 7% para os 28 e 91 dias, respetivamente.

O coeficiente de difusão de cloretos diminui com a idade do betão e desenvolve-se de forma semelhante à absorção de água por imersão, aumentado com a substituição de cimento por CFRSU e com a razão A/C. Ao relacionar as duas características ensaiadas, verifica-se uma elevada correlação linear de $R^2 = 0,8293$ e $R^2 = 0,9748$ para os 28 e 91 dias, respetivamente, comportamento que se poderá dever à influencia que o volume de poros acessíveis tem sobre a difusão de cloretos no BAC.

Ao ensaiar os BAC produzidos para avaliar a sua resistividade elétrica, constatou-se que esta propriedade depende maioritariamente do tipo de adição utilizado, tendo a percentagem de substituição ou da variação da razão A/C menor influência. Quando relacionada com o coeficiente de difusão de cloretos, verifica-se uma boa correlação entre as duas propriedades, $R^2 = 0,8841$, o que possibilita a avaliação de forma indireta do mecanismo de difusão de cloretos.

No que respeita à carbonatação, esta propriedade evolui da mesma forma que as restantes, aumentando com a percentagem de substituição de cimento e com a razão A/C. Todavia, é importante ressaltar que para percentagens de substituição superiores a 40% a qualidade do betão poderá ficar comprometida, situação que poderá dever-se a uma degradação da microestrutura do betão a partir desta gama de valores.

Tal como nas propriedades mecânicas, verifica-se a deterioração da durabilidade do BAC da mistura B 20 até à B 50 com a utilização de CFRSU e com o aumento da razão A/C.

5.4 Ultra-sons

A qualidade de um betão pode ser avaliada de forma indireta pela medição da velocidade de propagação de ultra-sons. Desta forma, os BAC produzidos foram ensaiados para a avaliar comparativamente a sua qualidade. Os resultados apresentados demonstraram que, a velocidade não variou de forma significativa com a idade do betão, tendo sido condicionada maioritariamente pelo aumento da percentagem de substituição de cimento e da razão A/C. Ao comparar as misturas produzidas verificou-se um decréscimo da qualidade do BAC da mistura B 20 até à B 50.

Os resultados da velocidade de propagação de ultra-sons podem igualmente ser relacionados com os da resistência à compressão uniaxial, forte indicador da qualidade do betão. Ao correlacionar as duas propriedades verificou-se uma reduzida dispersão de resultados com elevada correlação, $R^2 = 0,9153$, possibilitando desta forma a determinação teórica, com algum grau de confiança, da resistência à compressão uniaxial do BAC em função da velocidade de propagação de ultra-sons.

5.5 Conclusões gerais

Considerando os resultados obtidos com a presente campanha experimental, podem ser apresentadas as seguintes conclusões gerais:

- Quanto às propriedades mecânicas a mistura B 20 apresenta-se como a melhor das misturas com introdução de CFRSU, as restantes misturas demonstram perdas consideravelmente superiores de qualidade, particularmente as misturas B 40 e B 50 que não apresentam uma resistência à compressão uniaxial que possibilita a sua aplicação numa situação real.
- Relativamente à durabilidade os BAC produzidos com CFRSU apresentam um comportamento mais promissor. A mistura B 20 evidencia-se, novamente, de forma clara como a mais vantajosa das misturas com incorporação de CFRSU, apresentando para a maioria das propriedades estudadas valores muito semelhantes aos da mistura REF. Já a mistura B 50, apresenta novamente o pior comportamento de todas as misturas.

Tendo em conta as considerações apresentadas, o comportamento de BAC com introdução de CFRSU deve ser estudado de forma mais aprofundada para que possa existir confiança na utilização da adição.

Apesar das CFRSU reduzirem de forma substancial o comportamento mecânico, avaliando exclusivamente a durabilidade do betão e desde que a percentagem de substituição não ultrapasse os 20%, a adição poderá revelar-se promissora, uma vez que não prejudica significativamente o comportamento do BAC e representa um novo método de valorização dos RSU.

5.6 Propostas de desenvolvimento futuro

A campanha experimental realizada possibilitou o desenvolvimento do conhecimento relativo aos efeitos que a introdução de CFRSU provoca no BAC, tanto no seu estado fresco como endurecido. Desta forma, pretende-se que o trabalho desenvolvido contribua para o crescimento de uma indústria de reciclagem de RSU que ajude a reduzir o consumo de recursos naturais, inerentes à utilização de cimento.

Ainda assim, dado que não foi possível avaliar todas as problemáticas associadas ao desenvolvimento desta tecnologia é recomendado que se estude as medidas seguidamente apresentadas para desenvolvimentos futuros.

No presente trabalho, as misturas com CFRSU apresentaram os mesmos valores de V_w/V_p e $S_p/p\%$, 1,00 em ambos, com o objetivo de avaliar efetivamente o efeito da substituição de cimento pela adição em estudo. Desta forma, seria interessante variar estes valores em função das necessidades de cada mistura, otimizando-as e avaliando o comportamento dos BAC produzidos.

O estudo de BAC de diferentes percentagens de substituição poderá igualmente ser desenvolvido com objetivo de estabelecer um intervalo de valores ótimos para a utilização desta adição.

Equacionar a utilização de diferentes técnicas de moagem ou aplicação de um processo de tratamento das cinzas, pode revelar-se vantajoso, possibilitando a melhoria do comportamento do BAC produzido.

Como sugestão de processo de moagem, poderá ser considerado o trabalho desenvolvido por Bertolini et al. (2004) que consiste numa moagem húmida. Deste processo, resulta uma pasta que é posteriormente utilizada como adição para a substituição de cimento. Com a aplicação desta técnica, o autor apresenta melhorias significantes para o valor da resistência à compressão, três vezes superior ao obtido em betões onde a adição passou por uma moagem equivalente à utilizada no presente estudo, melhoria que o autor atribui ao facto deste processo possibilitar a libertação do hidrogénio decorrente das reações de corrosão dos metais presentes nas CFRSU, antes de estas serem adicionadas ao betão, evitando os efeitos negativos das reações.

Quanto ao tratamento a aplicar, a proposta de Pera et al. (1997) demonstra resultados favoráveis para a durabilidade e para a redução da retração do betão. Tem a mesma finalidade que o processo de moagem sugerido e consiste na imersão das CFRSU numa solução de hidróxido de sódio (NaOH) até que o hidrogénio proveniente das reações de corrosão seja libertado.

A determinação da composição química das CFRSU e realização do ensaio de lixiviação à adição e ao betão onde são incorporadas, devem ser realizados de forma complementar ao presente trabalho, uma vez que irão permitir a validação de algumas das considerações realizadas.

A realização de uma avaliação de vida útil do betão em função das propriedades de desempenho (cloretos e carbonatação), deverá também ser realizada.

Por último, o desenvolvimento de um estudo de impacto ambiental por análise do ciclo de vida deve igualmente ser pensado para validar os benefícios ambientais inerentes à utilização de CFRSU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amat, R. C., Ismail, K. N., Noor, N. M., & Ibrahim, N. M. (2017). The Effects of Bottom Ash from MSWI Used as Mineral Additions in Concrete. *MATEC Web of Conferences 97, 01053 (2017) ETIC 2016, 1053*, 6.
- Amorim, P. M. E. (2008). *Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- 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.
- Bani, R., Joshaghani, A., & Hooton, R. D. (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 134, 116–122.
- Barros, P. G. dos S. (2008). *Avaliação Das Propriedades De Durabilidade Do Concreto Auto-Adensável Obtido Com Resíduo De Corte De Mármore E Granito*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pela da Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia CTEC, Maceió, Brasil.
- Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A. Q., & Collepardi, M. (2004). MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1899–1906.
- Bhada-Tata, P., & Hoornweg, D. (2012). What a waste: A Global Review of Solid Waste Management. *Urban Development Series Knowledge Papers*, 15.
- Bradu, A., Cazacu, N., Florea, N., & Mihai, P. (2016a). Compressive Strength of Self Compacting Concrete. *“Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, Faculty of Civil Engineering and Building Services*, 62(66).
- Bradu, A., Cazacu, N., Florea, N., & Mihai, P. (2016b). Modulus of elasticity of self compacting concrete with diferents levels of limestone powder. *“Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, Faculty of Civil Engineering and Building Services*, 62(66).
- Brito, J. de, & Silva, P. R. (2009). Betão auto-compactável (BAC) - estado actual do conhecimento. *Engenharia Civil- Revista UM*, (35), 13–32.
- Brito, J. de, & Silva, P. R. (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, 101–112.
- Brito, J. de, & Silva, P. R. (2016). Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(4), 430–453.
- Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kosson, D. S., Sawell, S. E., ... Vehlow, J. (1997). Municipal Solid Waste Incinerator Residues. *Studies in Environmental Science*,

67, 973.

- Cheng, A. (2012). Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. *Materials and Design*, 36, 859–864.
- Chlortest – EU Funded Research Project under 5FP GROWTH Programme. Guideline for Practical Use of Methods for Testing the Resistance of Concrete to Chloride Ingress (2005).
- Coutinho, A., & Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e propriedades do Betão*, Volume III, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 368 p.
- Coutinho, M. J. (1998). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal.
- DA 58 (2015). AEIRU, Agregados artificiais de escórias de incineração de resíduos urbanos para pavimentos rodoviários. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Decreto-Lei 73/2011, de 17 de Junho, relativo ao regime geral da gestão de resíduos e transpõe a Directiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, relativa aos resíduos.
- Directiva 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008 relativa aos resíduos.
- 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, 3(7), 74–78.
- Dou, X., Ren, F., Nguyen, M. Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W. P., & Chang, V. W. C. (2017). Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 24–38.
- Druta, C. (2003). *Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete*. Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering Science.
- E 391 (1993). Determinação da resistência à carbonatação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 393 (1993). Determinação da absorção de água por capilaridade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 394 (1993). Determinação da absorção de água por imersão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 397 (1993). Determinação do módulo de elasticidade em compressão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 398 (1993). Determinação da retração e da expansão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 463 (2004). Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- El-khoury, R. D. (2010). *Creep and shrinkage behavior of self-consolidating concrete*. A

- Dissertation submitted to the Graduate School – New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey In partial fulfillment of the requirements For the degree of Doctor of Philosophy Graduate Program in Civil and Environmental Engineering.
- EPG (European Project Group), BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, E. E. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, The European Guidelines for Self Compacting Concrete § (2005).
- Ferreira, L. M. M. (2007). *Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Gao, X., Yuan, B., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2017). Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag. *Journal of Cleaner Production*, 164, 410–419.
- Hamad, A. J. (2015). Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29(4), 373–380.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. *Training Course Series*, 17, 213.
- IS 13311-1 (1992). Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test. Bureau of Indian Standards.
- Jalal, M., Ramezani-pour, A. A., & Pool, M. K. (2013). Split tensile strength of binary blended self compacting concrete containing low volume fly ash and TiO₂ nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 55, 324–337.
- Jani, Y., & Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1767–1775.
- Jardim, H. T. J. (2015). *Caracterização de escórias de incineração de resíduos urbanos e recuperação do vidro*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- JSCE (Japan Society of Civil Engineers). (1998). Recommendation for construction of self-compacting concrete, Proceedings of the International Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi, Japan, 417–437.
- Khayat, K. H., & Tangtermsirikul, S. (2000). Fresh concrete properties, in State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Cachan, Cedex, France. *RILEM Publications*, 23, 17–22.
- Kordts, S., & Breit, W. (2000). Assessment of the fresh concrete properties of self compacting concrete. *Concrete*, 113–124.
- 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.

- 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.
- Mohamed, H. A. (2011). Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 2, 79–86.
- Nawa, T., Izumi, T., & Edamatsu, Y. (1998). State-of-the-art on materials and design of self-compacting concrete. Japan, Concrete Engineering Series Journal, 30, 160–190.
- Nepomuceno, M. (2005). *Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis*. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- NP EN 12350-10 (2010). Ensaios do betão fresco Parte 10: Betão autocompactável Ensaio de escoamento na caixa L. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12350-8 (2010). Ensaios do betão fresco Parte 8: Betão autocompactável Ensaio de espalhamento. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12350-9 (2010). Ensaios do betão fresco Parte 9: Betão autocompactável Ensaio de escoamento no funil V. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-3 (2009). Ensaios do betão endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-6 (2011). Ensaios do betão endurecido Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12504-4 (2007). Ensaios do betão nas estruturas Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12620:2002+A1 (2010). Agregados para betão. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 13242:2002+A1 (2010). Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 197-1 (2012). Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1992-1-1 (2010). Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 206-1 (2007). Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 206-9 (2010). Betão Parte 9: Regras adicionais para betão auto-compactável (BAC). Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 450-1 (2012). Cinzas volantes para betão Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 450-2 (2006). Cinzas volantes para betão Parte 2: Avaliação da conformidade. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 934-1 (2008). Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção Parte 1: Requisitos gerais. Instituto Português da Qualidade.

- NP EN 934-2:2009+A1 (2012). Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção Parte 2: Adjuvantes para betão Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. Instituto Português da Qualidade.
- Nunes, S., Figueiras, H., & Coutinho, J. (2004). Aplicações de BAC na indústria da construção, Congresso Nacional da Construção 2004, FEUP (pp. 381–386).
- Okamura, H., & Ouchi, M. (1999). Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (keynote Lectures), in «Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete» Sweden (pp. 3–14).
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15.
- Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-Compacting Concrete, *Structural Concrete Journal*, Thomas Telford Ltd, 1(1), 3–17.
- Oliveira, E. (2009). *Betão Auto-Compactável Metodologia de Composição*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, Portugal.
- Parra, C., Valcuende, M., & Gómez, F. (2011). Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 201–207.
- Pavlík, Z., Keppert, M., Pavlíková, M., Volfová, P., & Černý, R. (2011). Application of MSWI bottom ash as alternative aggregate in cement mortar. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 148, 335–342.
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J., & Chababbet, M. (1997). USE OF INCINERATOR BOTTOM ASH IN CONCRETE. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 1–5.
- Pinto, H. A. S. (2011). *Propriedades do Betão Auto-compactável com Incorporação de Agregados Finos Reciclados*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior, Portugal.
- Pokorný, P., Dobiáš, D., & Čítek, D. (2016). The influence of corrosion of zinc powder on mechanical properties of concrete. *Ceramics - Silikaty*, 60(3), 195–199.
- Portaria nº187 - A/2014. (2014). *PERSU 2020. Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos*.
- Puna, J., & Baptista, B. (2008). A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos-perspectiva ambiental e economico-energética. *Química Nova*, 31(3), 645–654.
- Quina, M. M. J. de. (2005). *Processos de inertização e valorização de cinzas volantes - Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química pela Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Ravasan, F. M. (2014). Characterization and mechanical properties of concrete mixtures made with sedimentary lime and industrial incinerator ash. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 26(1), 1–18.
- Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O., Mostbauer, P., ... Lechner, P. (2003). Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 23(1), 61–88.

- Silva, P. R. (2007). *Métodos de estudo da composição de betão auto-compactável (BAC) - Verificação da sua aplicabilidade técnico-económica*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Silva, P. R. (2013). *Avaliação da durabilidade de betões autocompactáveis (BAC)*. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Skarendahl, A. (2000). Definitions and Development Objectives (Background Documents), in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC». *RILEM Publications*, 3–13.
- 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.
- Valcuende, M., Marco, E., Parra, C., & Serna, P. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583–592.
- Van Der Wegen, G., Hofstra, U., & Speerstra, J. (2013). Upgraded MSWI bottom ash as aggregate in concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 4(4), 737–743.
- Whittaker, M., Taylor, R., Li, Q., Li, S., & Black, L. (2009). The Behaviour of Finely Ground Bottom Ash in Portland Cement, 42(September), 950–966.
- 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.
- Zhang, T., Gao, P., Gao, P., Wei, J., & Yu, Q. (2013). Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials — An overview. *“Resources, Conservation & Recycling,”* 74, 134–143.

ANEXOS

A.1 BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS NO ESTADO FRESCO

Tabela A. 1 - Composição do betão REF

Mistura	Composição de betão-autocompactável			
REF	Parâmetros da composição	V_p/V_s		0,80
		V_w/V_p		0,80
		$S_p/P\%$		0,75
		V_m/V_g		2,275
		V_v	[m ³]	0,03
		Cimento		142,5 R
		$f_{ad(CV+CFRSU)}$		0,30
		CV		0,30
		CFRSU		0,00
	Mistura de agregados	Areia 0/2		0,50
		Areia 0/4		0,50
		Brita 1		0,50
		Brita 2		0,50
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento	[kg]	482,39
		CV	[kg]	151,43
		CFRSU	[kg]	0,00
		S_p	[l]	4,44
		S_p	[kg]	4,75
		Água	[l]	175,57
		Areia 0/2	[kg]	353,89
		Areia 0/4	[kg]	349,78
		Brita 1	[kg]	383,56
		Brita 2	[kg]	390,96
		A/C		0,364
		A/MC		0,277
		A/MF		0,277
		Massa total	[kg]	2292,33
		V_{sp}/V_p	[m ³ /m ³]	0,02
		V_g	[m ³ /m ³]	0,30
		V_m	[m ³ /m ³]	0,67
		V_p	[m ³ /m ³]	0,219
		V_w	[m ³ /m ³]	0,18
		V_{sp}	[m ³ /m ³]	0,00
V_s		[m ³ /m ³]	0,27	

Tabela A. 2 - Composição do betão B 20

Mistura	Composição de betão-autocompactável		
B 20	Parâmetros da composição	V_p/V_s	0,80
		V_w/V_p	1,00
		$S_p/P\%$	1,00
		V_m/V_g	2,275
		V_v [m ³]	0,03
		Cimento	142,5 R
		$f_{ad}(CV+CFRSU)$	0,20
		CV	0,00
		CFRSU	0,20
	Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50
		Areia 0/4	0,50
		Brita 1	0,50
		Brita 2	0,50
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg]	495,53
		CV [kg]	0,00
		CRSU [kg]	98,63
		S_p [l]	5,55
		S_p [kg]	5,94
		Água [l]	197,27
		Areia 0/2 [kg]	318,09
		Areia 0/4 [kg]	314,39
		Brita 1 [kg]	418,72
		Brita 2 [kg]	426,80
		A/C	0,398
		A/MC	0,398
		A/MF	0,332
	Massa total [kg]	2275,37	
	V_{sp}/V_p [m ³ /m ³]	0,03	
	V_g [m ³ /m ³]	0,32	
	V_m [m ³ /m ³]	0,65	
	V_p [m ³ /m ³]	0,197	
	V_w [m ³ /m ³]	0,20	
	V_{sp} [m ³ /m ³]	0,01	
	V_s [m ³ /m ³]	0,25	

Tabela A. 3 - Composição do betão B 30

Mistura	Composição de betão-autocompactável		
B 30	Parâmetros da composição	V_p/V_s	0,80
		V_w/V_p	1,00
		$S_p/P\%$	1,00
		V_m/V_g	2,275
		V_v [m ³]	0,03
		Cimento	142,5 R
		$f_{ad(CV+CFRSU)}$	0,30
		CV	0,00
		CFRSU	0,30
	Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50
		Areia 0/4	0,50
		Brita 1	0,50
		Brita 2	0,50
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg]	451,88
		CV [kg]	0,00
		CRSU [kg]	154,19
		S_p [l]	5,66
		S_p [kg]	6,06
		Água [l]	205,59
		Areia 0/2 [kg]	331,51
		Areia 0/4 [kg]	327,65
		Brita 1 [kg]	383,56
		Brita 2 [kg]	390,96
		A/C	0,455
		A/MC	0,455
		A/MF	0,339
	Massa total [kg]	2251,39	
		V_{sp}/V_p [m ³ /m ³]	0,03
		V_g [m ³ /m ³]	0,30
		V_m [m ³ /m ³]	0,67
		V_p [m ³ /m ³]	0,206
		V_w [m ³ /m ³]	0,21
		V_{sp} [m ³ /m ³]	0,01
V_s [m ³ /m ³]		0,26	

Tabela A. 4 - Composição do betão B 40

Mistura	Composição de betão-autocompactável		
B 40	Parâmetros da composição	V_p/V_s	0,80
		V_w/V_p	1,00
		$S_p/P\%$	1,00
		V_m/V_g	2,275
		V_v [m ³]	0,03
		Cimento	142,5 R
		$f_{ad}(CV+CFRSU)$	0,40
		CV	0,00
		CFRSU	0,40
	Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50
		Areia 0/4	0,50
		Brita 1	0,50
		Brita 2	0,50
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg]	387,39
		CV [kg]	0,00
		CRSU [kg]	205,62
		S_p [l]	5,54
		S_p [kg]	5,93
		Água [l]	205,62
		Areia 0/2 [kg]	331,57
		Areia 0/4 [kg]	327,71
		Brita 1 [kg]	383,56
		Brita 2 [kg]	390,96
		A/C	0,531
		A/MC	0,531
		A/MF	0,347
	Massa total [kg]	2238,37	
	V_{sp}/V_p [m ³ /m ³]	0,03	
	V_g [m ³ /m ³]	0,30	
	V_m [m ³ /m ³]	0,67	
	V_p [m ³ /m ³]	0,206	
	V_w [m ³ /m ³]	0,21	
	V_{sp} [m ³ /m ³]	0,01	
	V_s [m ³ /m ³]	0,26	

Tabela A. 5 - Composição do betão B 50

Mistura	Composição de betão-autocompactável		
B 50	Parâmetros da composição	V_p/V_s	0,80
		V_w/V_p	1,00
		$S_p/P\%$	1,00
		V_m/V_g	2,275
		V_v [m ³]	0,03
		Cimento	142,5 R
		$f_{ad(CV+CFRSU)}$	0,50
		CV	0,00
		CFRSU	0,50
	Mistura de agregados	Areia 0/2	0,50
		Areia 0/4	0,50
		Brita 1	0,50
		Brita 2	0,50
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg]	322,89
		CV [kg]	0,00
		CRSU [kg]	257,08
		S_p [l]	5,42
		S_p [kg]	5,80
		Água [l]	205,66
		Areia 0/2 [kg]	331,63
		Areia 0/4 [kg]	327,77
		Brita 1 [kg]	383,56
		Brita 2 [kg]	390,96
		A/C	0,637
		A/MC	0,637
		A/MF	0,355
	Massa total [kg]	2225,34	
		V_{sp}/V_p [m ³ /m ³]	0,03
		V_g [m ³ /m ³]	0,30
		V_m [m ³ /m ³]	0,67
		V_p [m ³ /m ³]	0,206
		V_w [m ³ /m ³]	0,21
		V_{sp} [m ³ /m ³]	0,01
V_s [m ³ /m ³]		0,26	

**A.2 BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS NO ESTADO
ENDURECIDO, PROPRIEDADES MECÂNICAS**

A.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL – CUBOS

Tabela A. 6 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial em provetes cúbicos

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de compressão				
Mistura	Provete	Idade [dias]	b [mm]	L [mm]	Secção [cm ²]	Carga [kN]	$f_{c,c}$ [MPa]	f_{cmc} [MPa]	S [MPa]	C_{var} [%]
REF	1	7	150,00	150,00	225,00	1215,40	54,02	50,27	5,30	10,55
	2		150,00	150,00	225,00	1046,70	46,52			
	1	28	150,00	150,00	225,00	1327,10	58,98	57,60	4,23	7,34
	2		150,00	150,00	225,00	1189,20	52,85			
	3		150,00	150,00	225,00	1371,80	60,97			
	1	91	150,00	150,00	225,00	1743,00	77,47	80,11	2,95	3,68
	2		150,00	150,00	225,00	1874,00	83,29			
	3		150,00	150,00	225,00	1790,60	79,58			
	B 20	1	7	150,00	150,00	225,00	774,80	34,44	33,68	1,99
2		150,00		150,00	225,00	791,72	35,19			
3		150,00		150,00	225,00	706,99	31,42			
1		28	150,00	150,00	225,00	802,80	35,68	35,66	5,48	15,36
2			150,00	150,00	225,00	925,40	41,13			
3			150,00	150,00	225,00	678,90	30,17			
1		91	150,00	150,00	225,00	926,50	41,18	41,32	0,84	2,03
2			150,00	150,00	225,00	950,10	42,23			
3			150,00	150,00	225,00	912,70	40,56			
B 30	1	7	150,00	150,00	225,00	532,13	23,65	23,87	1,30	5,45
	2		150,00	150,00	225,00	568,45	25,26			
	3		150,00	150,00	225,00	510,48	22,69			
	1	28	150,00	150,00	225,00	530,40	23,57	24,19	2,52	10,40
	2		150,00	150,00	225,00	606,60	26,96			
	3		150,00	150,00	225,00	496,00	22,04			
	1	91	150,00	150,00	225,00	658,70	29,28	32,56	2,89	8,86
	2		150,00	150,00	225,00	780,60	34,69			
	3		150,00	150,00	225,00	758,40	33,71			
B 40	1	7	150,00	150,00	225,00	430,60	19,14	18,09	1,03	5,72
	2		150,00	150,00	225,00	384,11	17,07			
	3		150,00	150,00	225,00	406,05	18,05			
	1	28	150,00	150,00	225,00	445,70	19,81	21,77	2,09	9,61
	2		150,00	150,00	225,00	539,40	23,97			
	3		150,00	150,00	225,00	484,60	21,54			
	1	91	150,00	150,00	225,00	550,30	24,46	24,84	0,59	2,37
	2		150,00	150,00	225,00	574,20	25,52			
	3		150,00	150,00	225,00	552,40	24,55			
B 50	1	7	150,00	150,00	225,00	292,23	12,99	12,89	0,31	2,38
	2		150,00	150,00	225,00	295,64	13,14			
	3		150,00	150,00	225,00	282,33	12,55			
	1	28	150,00	150,00	225,00	399,00	17,73	16,76	0,84	5,04
	2		150,00	150,00	225,00	365,40	16,24			
	3		150,00	150,00	225,00	366,80	16,30			
	1	91	150,00	150,00	225,00	350,80	15,59	16,02	0,45	2,82
	2		150,00	150,00	225,00	371,10	16,49			
	3		150,00	150,00	225,00	359,70	15,99			

A.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL – CILINDROS

Tabela A. 7 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial em provetes cilíndricos

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de compressão				
Mistura	Provete	Idade [dias]	L [mm]	ϕ [mm]	Secção [cm ²]	Carga [kN]	$f_{c,cil}$ [MPa]	f_{cmcil} [MPa]	S [MPa]	C_{var} [%]
REF	1	28	300,00	150,00	176,71	822,5	46,54	55,38	12,49	22,56
	2		300,00	150,00	176,71	1134,7	64,21			
	1	91	300,00	150,00	176,71	1003,8	56,80	65,58	12,41	18,92
	3		300,00	150,00	176,71	1313,9	74,35			
B 20	1	28	300,00	150,00	176,71	367,2	20,78	20,57	0,29	1,43
	2		300,00	150,00	176,71	359,9	20,36			
	1	91	300,00	150,00	176,71	344,4	19,49	22,14	3,75	16,93
	2		300,00	150,00	176,71	438,1	24,79			
B 30	1	28	300,00	150,00	176,71	190,4	10,77	11,23	0,65	5,80
	2		300,00	150,00	176,71	206,7	11,69			
	1	91	300,00	150,00	176,71	253,0	14,32	15,30	1,39	9,06
	2		300,00	150,00	176,71	287,6	16,28			
B 40	1	28	300,00	150,00	176,71	159,2	9,01	9,10	0,12	1,36
	2		300,00	150,00	176,71	162,3	9,18			
	1	91	300,00	150,00	176,71	196,1	11,10	10,61	0,68	6,45
	3		300,00	150,00	176,71	179,0	10,13			
B 50	1	28	300,00	150,00	176,71	115,4	6,53	6,28	0,36	5,68
	2		300,00	150,00	176,71	106,5	6,02			
	1	91	300,00	150,00	176,71	147,8	8,36	6,85	2,15	31,33
	3		300,00	150,00	176,71	94,2	5,33			

A.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela A. 8 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Identificação			Dimensões do provete		Ensaio de tração por compressão diametral				
Mistura	Provete	Idade [dias]	L [mm]	ϕ [mm]	Carga [kN]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	$f_{ct,msp}$ [MPa]	S [MPa]	C_{var} [%]
REF	1	28	300,00	150,00	354,6	5,02	5,03	0,02	0,48
	2		300,00	150,00	357,0	5,05			
	1	91	300,00	150,00	349,9	4,95	4,88	0,11	2,18
	2		300,00	150,00	339,3	4,80			
B 20	1	28	300,00	150,00	217,3	3,07	3,09	0,03	0,87
	2		300,00	150,00	220,0	3,11			
	1	91	300,00	150,00	239,6	3,39	3,40	0,01	0,27
	2		300,00	150,00	240,5	3,40			
B 30	1	28	300,00	150,00	143,1	2,02	2,32	0,42	18,10
	2		300,00	150,00	185,1	2,62			
	1	28	300,00	150,00	163,0	2,31	2,36	0,07	2,97
	2		300,00	150,00	170,0	2,41			
B 40	1	28	300,00	150,00	149,0	2,11	2,19	0,11	5,17
	2		300,00	150,00	160,3	2,27			
	1	91	300,00	150,00	158,0	2,24	2,24	0,01	0,58
	2		300,00	150,00	159,3	2,25			
B 50	1	28	300,00	150,00	141,4	2,00	1,96	0,06	3,01
	2		300,00	150,00	135,5	1,92			
	1	28	300,00	150,00	130,3	1,84	1,87	0,04	2,03
	2		300,00	150,00	134,1	1,90			

A.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE

Tabela A. 9 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade secante

Identificação			Dimensões do provete		Determinação do módulo de elasticidade			
Mistura	Provete	Idade [dias]	L [mm]	ϕ [mm]	E_c [GPa]	E_{cm} [GPa]	S [GPa]	C_{var} [%]
REF	1	28	300,00	150,00	42,10	45,42	4,70	10,34
	2		300,00	150,00	48,74			
	1	91	300,00	150,00	40,87	41,56	0,98	2,36
	2		300,00	150,00	42,26			
B 20	1	28	300,00	150,00	21,92	23,71	2,54	10,72
	2		300,00	150,00	25,51			
	1	91	300,00	150,00	18,59	19,43	1,18	6,06
	2		300,00	150,00	20,26			
B 30	1	28	300,00	150,00	23,12	23,78	0,93	3,90
	2		300,00	150,00	24,43			
	1	91	300,00	150,00	19,14	19,51	0,52	2,65
	2		300,00	150,00	19,87			
B 40	1	28	300,00	150,00	23,64	24,19	0,77	3,19
	2		300,00	150,00	24,73			
	1	91	300,00	150,00	20,03	19,90	0,17	0,86
	2		300,00	150,00	19,78			
B 50	1	28	300,00	150,00	14,24	12,95	1,82	14,02
	2		300,00	150,00	11,67			
	1	91	300,00	150,00	10,30	9,07	1,74	19,17
	2		300,00	150,00	7,84			

A.2.5 RETRAÇÃO

Tabela A. 10 - Resultados do ensaio de retração do betão REF

Identificação		Extensão da retração		
Mistura	Idade [dias]	$\epsilon_{cs,med}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ta [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]
REF	1	0	21,3	66,2
	2	-52	21,3	66,2
	3	-28	21,3	66,2
	4	-50	21,3	66,2
	5	-70	21,3	66,2
	6	-93	21,3	66,2
	7	-109	21,3	66,2
	8	-129	21,3	66,2
	9	-138	21,3	66,2
	10	-150	21,3	64,1
	11	-177	21,1	65,3
	12	-185	21,2	65,3
	13	-197	21,6	70,3
	14	-204	24,4	64,4
	21	-292	23,7	64,0
	28	-361	23,4	58,4
	35	-409	22,8	65,5
	42	-420	23,5	65,4
	49	-423	23,0	67,2
	56	-450	22,9	63,0
63	-453	22,7	64,4	
70	-457	23,0	60,1	
77	-459	23,5	67,0	
84	-477	23,8	69,0	
91	-495	23,3	67,9	

Tabela A. 11 - Resultados do ensaio de retração do betão B 20

Identificação		Extensão da retração		
Mistura	Idade [dias]	$\epsilon_{cs,med}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ta [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]
B 20	1	0	21,3	66,2
	2	50	21,3	66,2
	3	92	21,3	64,1
	4	49	21,1	65,3
	5	23	21,2	65,3
	6	13	21,6	70,3
	7	5	22,0	70,3
	8	-14	22,3	69,4
	9	-29	22,6	71,2
	10	-50	22,3	65,3
	11	-78	22,7	69,5
	12	-103	23,1	67,1
	13	-137	23,5	65,9
	14	-164	23,7	64,0
	21	-269	23,2	50,8
	28	-373	22,6	57,9
	35	-410	23,5	65,4
	42	-421	23,0	67,2
	49	-446	22,9	63,0
	56	-467	22,7	64,4
63	-497	23,0	60,1	
70	-531	23,5	67,0	
77	-541	23,8	69,0	
84	-552	23,3	68,5	
91	-588	22,4	66,4	

Tabela A. 12 - Resultados do ensaio de retração do betão B 30

Identificação		Extensão da retração		
Mistura	Idade [dias]	$\epsilon_{cs,med}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ta [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]
B 30	1	0	21,3	66,2
	2	133	21,3	66,2
	3	90	21,3	66,2
	4	49	21,3	66,2
	5	24	21,3	66,2
	6	11	21,3	66,2
	7	-21	21,3	66,2
	8	-36	21,3	66,2
	9	-53	21,3	64,1
	10	-92	21,1	65,3
	11	-101	21,2	65,3
	12	-117	21,6	70,3
	13	-131	22,0	70,3
	14	-146	24,8	69,4
	21	-265	23,8	63,6
	28	-365	23,2	62,9
	35	-453	22,6	57,9
	42	-499	23,6	67,1
	49	-514	22,9	62,2
	56	-583	22,6	61,2
63	-598	22,1	56,1	
70	-623	22,8	63,0	
77	-646	23,9	71,6	
84	-655	23,7	69,2	
91	-664	23,2	58,3	

Tabela A. 13 - Resultados do ensaio de retração do betão B 40

Identificação		Extensão da retração		
Mistura	Idade [dias]	$\epsilon_{cs,med}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ta [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]
B 40	1	0	21,3	66,2
	2	-38	21,3	66,2
	3	-83	21,3	66,2
	4	-133	21,3	66,2
	5	-148	21,3	66,2
	6	-192	21,3	66,2
	7	-213	21,3	66,2
	8	-235	21,3	64,1
	9	-242	21,1	65,3
	10	-250	21,2	65,3
	11	-257	21,6	70,3
	12	-273	22,0	70,3
	13	-295	22,3	69,4
	14	-335	24,9	70,7
	21	-460	23,8	63,8
	28	-595	23,1	64,5
	35	-641	22,9	68,5
	42	-668	23,7	66,7
	49	-696	23,3	61,1
	56	-744	22,5	61,9
63	-789	21,8	55,3	
70	-817	22,8	60,8	
77	-845	23,6	65,6	
84	-843	23,6	68,8	
91	-842	23,3	52,8	

Tabela A. 14 - Resultados do ensaio de retração do betão B 50

Identificação		Extensão da retração		
Mistura	Idade [dias]	$\epsilon_{cs,med}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ta [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]
B 50	1	0	21,3	66,2
	2	-26	21,3	66,2
	3	-63	21,3	66,2
	4	-84	21,3	66,2
	5	-109	21,3	66,2
	6	-131	21,3	66,2
	7	-155	21,3	66,2
	8	-196	21,3	64,1
	9	-209	21,1	65,3
	10	-218	21,2	65,3
	11	-237	21,6	70,3
	12	-279	22,0	70,3
	13	-308	22,3	69,4
	14	-352	24,9	70,7
	21	-523	23,8	63,8
	28	-707	23,1	64,5
	35	-735	22,9	68,5
	42	-798	23,7	66,7
	49	-810	23,3	61,1
	56	-862	22,5	61,9
63	-886	21,8	55,3	
70	-922	22,8	60,8	
77	-954	23,6	65,6	
84	-944	23,6	68,8	
91	-935	23,3	52,8	

**A.3 BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS NO ESTADO
ENDURECIDO, DURABILIDADE**

A.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Tabela A. 15 - Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão

Identificação			Dimensões do provete		Massa do provete			Absorção de água por imersão			
Mistura	Provete	Idade [dias]	b [mm]	L [mm]	Saturado M ₁ [g]	Hidrostático M ₂ [g]	Seco M ₃ [g]	A _i [%]	A _m [%]	S [%]	C _{var} [%]
REF	1	28	100	100	2297	1250	2162	12,89			
	2		100	100	2287	1239	2138	14,22	13,50	0,67	4,95
	3		100	100	2305	1260	2165	13,40			
	1	91	100	100	2312	1262	2209	9,81			
	2		100	100	2301	1251	2194	10,19	10,02	0,19	1,92
	3		100	100	2312	1257	2206	10,05			
B 20	1	28	100	100	2291	1232	2149	13,41			
	2		100	100	2127	1074	1988	13,20	13,33	0,11	0,83
	3		100	100	2293	1231	2151	13,37			
	1	91	100	100	2158	1101	2018	13,25			
	2		100	100	2095	1042	1947	14,06	13,86	0,54	3,91
	3		100	100	2117	1059	1966	14,27			
B 30	1	28	100	100	2203	1146	2056	13,91			
	2		100	100	2141	1087	1986	14,71	14,78	0,91	6,16
	3		100	100	2141	1079	1974	15,73			
	1	91	100	100	2178	1123	2028	14,22			
	2		100	100	2155	1095	1994	15,19	15,24	1,05	6,90
	3		100	100	2078	1024	1906	16,32			
B 40	1	28	100	100	2159	1079	1990	15,65			
	2		100	100	2145	1095	1988	14,95	15,81	0,94	5,98
	3		100	100	2101	1025	1920	16,82			
	1	91	100	100	2149	1084	1969	16,90			
	2		100	100	2202	1154	2050	14,50	15,75	1,20	7,63
	3		100	100	2208	1135	2038	15,84			
B 50	1	28	100	100	1978	911	1802	16,49			
	2		100	100	2044	976	1812	21,72	19,11	2,61	13,68
	3		100	100	1993	931	1790	19,11			
	1	91	100	100	2158	1091	1947	19,78			
	2		100	100	2202	1135	1996	19,31	19,18	0,66	3,44
	3		100	100	2126	1065	1930	18,47			

A.3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tabela A. 16 - Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade

Identificação			Dimensões do provete		Absorção t ₃ horas					Absorção t ₆ horas					Absorção t ₂₄ horas					Absorção t ₇₂ horas					Coeficiente de absorção	
Mistura	Provete	Idade [dias]	φ [mm]	Secção [mm ²]	M _i [g]	Abs [kg/m ²]	Abs _m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C _{var} [%]	M _i [g]	Abs [kg/m ²]	Abs _m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C _{var} [%]	M _i [g]	Abs [kg/m ²]	Abs _m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C _{var} [%]	M _i [g]	Abs [kg/m ²]	Abs _m [kg/m ²]	S [kg/m ²]	C _{var} [%]	Coef _{abs} [mm/min ^{0,5}]	R ²
REF	1	28	150,00	17671,46	31	1,75				39	2,21				54	3,06				60	3,40				0,095	0,98
	2		150,00	17671,46	23	1,27	1,43	0,28	19,47	28	1,58	1,83	0,33	18,12	38	2,15	2,57	0,46	17,83	45	2,55	2,96	0,42	14,34		
	3		150,00	17671,46	23	1,27				30	1,70				44	2,49				52	2,94					
	1	91	150,00	17671,46	14	0,79				16	0,91				20	1,13				25	1,41				0,052	0,86
	2		150,00	17671,46	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		
	3		150,00	17671,46	15	0,85				16	0,91				22	1,24				28	1,58					
B 20	1	28	150,00	17671,46	27	1,53				34	1,92				52	2,94				65	3,68				0,095	0,96
	2		150,00	17671,46	28	1,56	1,48	0,11	7,33	34	1,92	1,87	0,10	5,25	50	2,83	2,75	0,24	8,55	62	3,51	3,45	0,26	7,51		
	3		150,00	17671,46	24	1,36				31	1,75				44	2,49				56	3,17					
	1	91	150,00	17671,46	10	0,54				11	0,62				18	1,02				27	1,53				0,047	0,91
	2		150,00	17671,46	16	0,91	0,80	0,23	28,75	19	1,08	0,94	0,28	29,60	26	1,47	1,34	0,28	20,84	34	1,92	1,85	0,29	15,71		
	3		150,00	17671,46	17	0,96				20	1,13				27	1,53				37	2,09					
B 30	1	28	150,00	17671,46	30	1,67				39	2,21				62	3,51				78	4,41				0,125	0,99
	2		150,00	17671,46	32	1,81	1,83	0,17	9,47	41	2,32	2,40	0,24	9,83	63	3,57	3,79	0,44	11,66	84	4,75	4,89	0,55	11,25		
	3		150,00	17671,46	36	2,01				47	2,66				76	4,30				97	5,49					
	1	91	150,00	17671,46	17	0,93				19	1,08				28	1,58				37	2,09				0,058	0,92
	2		150,00	17671,46	18	1,02	0,97	0,04	4,59	21	1,19	1,15	0,07	5,68	31	1,75	1,68	0,09	5,15	45	2,55	2,34	0,23	9,78		
	3		150,00	17671,46	17	0,96				21	1,19				30	1,70				42	2,38					
B 40	1	28	150,00	17671,46	25	1,41				34	1,92				56	3,17				77	4,36				0,116	0,99
	2		150,00	17671,46	28	1,56	1,67	0,33	19,55	37	2,09	2,23	0,39	17,31	65	3,68	3,73	0,60	15,96	95	5,38	5,26	0,85	16,24		
	3		150,00	17671,46	36	2,04				47	2,66				77	4,36				107	6,05					
	1	91	150,00	17671,46	19	1,05				21	1,19				30	1,70				38	2,15				0,054	0,89
	2		150,00	17671,46	15	0,82	0,93	0,11	12,12	17	0,96	1,08	0,11	10,53	24	1,36	1,51	0,17	11,46	32	1,81	2,00	0,17	8,65		
	3		150,00	17671,46	17	0,93				19	1,08				26	1,47				36	2,04					
B 50	1	28	150,00	17671,46	32	1,81				42	2,38				69	3,90				92	5,21				0,126	0,99
	2		150,00	17671,46	33	1,84	1,84	0,03	1,78	43	2,43	2,45	0,09	3,53	67	3,79	3,96	0,20	5,15	88	4,98	5,21	0,23	4,35		
	3		150,00	17671,46	33	1,87				45	2,55				74	4,19				96	5,43					
	1	91	150,00	17671,46	21	1,19				24	1,36				33	1,87				45	2,55				0,059	0,85
	2		150,00	17671,46	19	1,05	1,07	0,12	10,84	21	1,19	1,21	0,14	11,80	30	1,70	1,70	0,17	10,00	41	2,32	2,34	0,20	8,50		
	3		150,00	17671,46	17	0,96				19	1,08				27	1,53				38	2,15					

A.3.3 DIFUSÃO DE CLORETOS

Tabela A. 17 - Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, mistura REF e B 20

Identificação		Condições de ensaio				Profundidade de penetração								Coeficiente de difusão						
Mistura	Provete	Idade [dias]	L _{provete} [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 _{médio (Face)} [mm]	X _{médio (provete)} [mm]	D _{médio (provete)} [10 ⁻¹² m ² /s]	D _{médio (amassadura)} [10 ⁻¹² m ² /s]	S	C _{var} [%]	
							[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]							[mm]
REF	1 Face A	28	53	30	24	24,5	9	14	16	15	13	12	10	12,71	12,86	6,07	4,28	5,36	0,95	17,81
	Face B						10	11	19	10	13	12	16	13,00						
	2 Face A						11	8	8	6	10	8	12	9,00						
	Face B						10	15	11	12	9	7	8	10,29						
	3 Face A						10	17	17	10	11	14	17	13,71						
	Face B						20	12	14	13	8	8	11	12,29						
REF	1 Face A	91	49	30	24	23,5	5	3	2	12	13	3	8	6,57	5,79	2,32	3,18	2,84	0,46	16,18
	Face B						4	2	3	4	10	9	3	5,00						
	2 Face A						4	6	9	15	7	8	9	8,29						
	Face B						8	9	7	7	7	8	5	7,29						
	3 Face A						6	7	3	3	5	5	6	5,00						
	Face B						6	10	9	11	10	11	10	9,57						
B 20	1 Face A	28	48	20	24	22,75	20	20	22	19	18	22	13	19,14	18,21	12,06	11,87	11,63	0,59	5,09
	Face B						19	15	20	14	20	17	16	17,29						
	2 Face A						16	19	20	17	15	15	18	17,14						
	Face B						17	20	20	15	14	21	20	18,14						
	3 Face A						22	17	18	15	21	22	18	19,00						
	Face B						15	16	19	17	19	16	16	16,86						
	1 Face A	91	48	25	24	22	22	23	27	20	20	20	21	21,86	20,35	10,84	9,83	9,95	0,84	8,43
	Face B						19	21	20	18	17	18		18,83						
	2 Face A						16	17	21	17	23	19		18,83						
	Face B						21	18	19	18	18	20		19,00						
	3 Face A						18	18	19	19	20	20		19,00						
	Face B						19	18	18	19	16	17		17,83						

Tabela A. 18 - Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, mistura B 30 e B 40

Identificação		Condições de ensaio				Profundidade de penetração								Coeficiente de difusão						
Mistura	Provete	Idade [dias]	L _{provet} [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 _{médio (Face)} [mm]	X _{médio (provet)} [mm]	D _{médio (provet)} [10 ⁻¹² m ² /s]	D _{médio (amassadura)} [10 ⁻¹² m ² /s]	S	C _{var} [%]	
							[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]							[mm]
B 30	1 Face A Face B	28	48	25	24	24,5	26	23	27	27	27	23	24	25,29	24,71	13,46	12,22	12,76	0,63	4,97
							24	24	23	25	28	24	21	24,14						
	2 Face A Face B		54	25	24	24,5	22	21	19	22	22	21	21	21,14	20,40					
							20	19	21	20	18	20	19,67							
	3 Face A Face B		51	25	24	24,5	20	22	20	19	23	31	24	22,71	22,07					
							23	22	22	29	17	20	17	21,43						
B 40	1 Face A Face B	91	48	25	24	23,5	21	19	27	20	20	17	16	20,00	21,00	11,27	12,58	11,95	0,66	5,50
							25	21	20	20	23	21	24	22,00						
	2 Face A Face B		49	25	24	23,5	24	21	23	21	22	20	18	21,29	22,86					
							27	21	24	31	24	25	19	24,43						
	3 Face A Face B		48	25	24	23,5	20	21	25	22	18	20	18	20,57	22,29					
							23	24	22	20	31	23	25	24,00						
B 40	1 Face A Face B	28	47	20	24	22,75	22	22	25	19	21	24	21	22,00	22,21	14,69	13,80	14,67	0,86	5,88
							24	24	22	21	23	21	22	22,43						
	2 Face A Face B		46	20	24	22,75	24	22	22	21	21	20	21	21,57	21,36					
							20	21	21	22	19	25	20	21,14						
	3 Face A Face B		49	20	24	22,75	22	20	26	20	23	28	24	23,29	22,57					
							21	19	25	19	23	25	21	21,86						
B 40	1 Face A Face B	91	47	25	24	22,75	31	30	31	32	25	31	26	29,43	26,29	14,01	12,87	12,96	1,01	7,82
							23	20	26	26	21	25	21	23,14						
	2 Face A Face B		50	25	24	22,75	24	22	23	23	22	22	24	22,86	23,00					
							23	21	24	23	20	27	24	23,14						
	3 Face A Face B		47	25	24	22,75	22	26	22	20	23	22	22	22,43	22,71					
							24	23	24	24	21	19	26	23,00						

Tabela A. 19 - Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, mistura B 50

Identificação		Condições de ensaio				Profundidade de penetração								Coeficiente de difusão					
Mistura	Provete	Idade [dias]	L _{provete} [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 _{médio (Face)}	X _{médio (provete)}	D _{médio (provete)}	D _{médio (amassadura)}	S	C _{var}
							[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[10 ⁻¹² m ² /s]
B 50	1 Face A	28	47	20	24	22,75	28	28	30	31	30	32	32	30,14	30,86	20,90			
	Face B						37	34	29	28	32	31	30	31,57					
	2 Face A						32	33	31	29	32	25	34	30,86					
	Face B						31	38	33	28	32	31	30	31,86					
	3 Face A						33	30	36	31	37	32	30	32,71					
	Face B						32	32	30	34	35	31	33	32,43					
1 Face A	91	49	25	24	22,75	28	26	28	30	30	25	26	27,57	28,14	15,67				
Face B						30	31	26	25	29	33	27	28,71						
2 Face A						26	25	27	27	28	27	30	27,14						
Face B						24	25	28	28	27	27	31	27,14						
3 Face A						30	29	30	31	34	37	36	32,43						
Face B						35	34	31	34	32	30	32	32,57						

A.3.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Tabela A. 20 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica

Identificação			Dimensões do provete			Tensão [V]	Corrente [mA]	Resistência			Resistividade elétrica			
Mistura	Provete	Idade [dias]	L [mm]	φ [mm]	Secção [mm ²]			R _T [Ω]	R _{SPG} [Ω]	R _C [Ω]	ρ _i [Ωm]	ρ _m [Ωm]	S [Ωm]	C _{var} [%]
REF	1	28	53	100	7853,98	60	75,2	797,87		597,87	88,60			
	2		51	100	7853,98	60	90,0	666,67	200	466,67	71,87	79,78	8,40	10,53
	3		49	100	7853,98	60	86,7	692,04		492,04	78,87			
	1	91	49	100	7853,98	60	35,7	1680,67		1480,67	237,33			
	2		48	100	7853,98	60	36,0	1666,67	200	1466,67	239,98	229,58	15,78	6,88
	3		49	100	7853,98	60	39,5	1518,99		1318,99	211,41			
B 20	1	28	48	100	7853,98	60	135,7	442,15		242,15	39,62			
	2		49	100	7853,98	60	156,1	384,37	200	184,37	29,55	32,02	6,71	20,97
	3		44	100	7853,98	60	171,1	350,67		150,67	26,89			
	1	91	48	100	7853,98	60	105,3	569,80		369,80	60,51			
	2		47	100	7853,98	60	108,5	553,00	200	353,00	58,99	55,49	7,42	13,37
	3		45	100	7853,98	60	127,9	469,12		269,12	46,97			
B 30	1	28	48	100	7853,98	60	192,3	312,01		112,01	18,33			
	2		54	100	7853,98	60	143,9	416,96	200	216,96	31,56	25,21	6,63	26,30
	3		51	100	7853,98	60	163,4	367,20		167,20	25,75			
	1	91	48	100	7853,98	60	132,0	454,55		254,55	41,65			
	2		49	100	7853,98	60	133,9	448,10	200	248,10	39,77	41,10	1,16	2,82
	3		48	100	7853,98	60	131,6	455,93		255,93	41,88			
B 40	1	28	47	100	7853,98	60	140,0	428,57		228,57	38,20			
	2		46	100	7853,98	60	167,1	359,07	200	159,07	27,16	30,92	6,30	20,37
	3		49	100	7853,98	60	161,7	371,06		171,06	27,42			
	1	91	47	100	7853,98	60	113,3	529,57		329,57	55,07			
	2		50	100	7853,98	60	123,9	484,26	200	284,26	44,65	46,08	8,38	18,18
	3		47	100	7853,98	60	139,4	430,42		230,42	38,50			
B 50	1	28	47	100	7853,98	60	186,3	322,06		122,06	20,40			
	2		48	100	7853,98	60	201,0	298,51	200	98,51	16,12	19,11	2,60	13,59
	3		47	100	7853,98	60	184,9	324,50		124,50	20,80			
	1	91	49	100	7853,98	60	138,7	432,59		232,59	37,28			
	2		49	100	7853,98	60	127,7	469,85	200	269,85	43,25	41,37	3,54	8,56
	3		50	100	7853,98	60	125,7	477,33		277,33	43,56			

A.3.5 CARBONATAÇÃO

Tabela A. 21 - Resultados dos ensaios para determinar a profundidade de carbonatação

Identificação		Profundidade média e máxima de carbonatação								Coeficiente de carbonatação	
Mistura	Idade [dias]	d _{km1} [mm]	d _{km2} [mm]	d _{km3} [mm]	d _{km4} [mm]	d _{km} [mm]	S [mm]	C _{var} [%]	d _{kmáx} [mm]	K _c [mm/ano ^{0,5}]	R ²
REF	14	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-	1,00	-
	21	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	49	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	70	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
	91	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-		
B 20	14	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-	8,52	0,81
	21	4	3	2	3	2,67	0,62	23,39	7,00		
	49	4	2	3	3	3,00	0,61	20,41	6,00		
	70	4	2	4	3	3,42	0,85	24,87	7,00		
	91	5	4	3	4	3,92	0,77	19,73	9,00		
B 30	14	5	3	3	4	3,75	0,62	16,56	6,00	18,36	0,98
	21	5	5	6	5	5,21	0,52	10,06	7,00		
	49	10	7	7	8	7,75	1,27	16,45	14,00		
	70	9	8	7	8	8,00	0,94	11,69	11,00		
	91	11	7	10	9	9,08	1,76	19,37	16,00		
B 40	14	9	8	9	9	8,75	0,37	4,21	11,00	22,62	0,84
	21	10	10	11	10	10,38	0,54	5,21	12,00		
	49	11	11	11	11	10,83	0,31	2,88	12,00		
	70	12	10	12	12	11,50	0,89	7,74	14,00		
	91	14	12	11	12	12,25	1,54	12,58	18,00		
B 50	14	13	13	13	13	12,67	0,16	1,23	15,00	99,14	0,96
	21	15	15	14	15	14,75	0,41	2,77	17,00		
	49	34	35	34	34	34,25	0,35	1,03	36,00		
	70	42	42	42	42	41,04	0,26	0,63	42,00		
	91	48	48	47	48	47,83	0,24	0,49	49,00		

**A.4 BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS NO ESTADO
ENDURECIDO, ULTRA-SONS**

Tabela A. 22 - Resultados dos ensaios para determinar a velocidade de propagação de ultra-sons

Identificação			Tempo de transmissão	Distância	Velocidade de propagação			
Mistura	Provete	Idade [dias]	t_{us} [ms]	L [mm]	$V_{us,c}$ [m/s]	V_{usmc} [m/s]	S [m/s]	C_{var} [%]
REF	1	7	31,50	150,00	4761,90	4710,14	73,20	1,55
	2		32,20	150,00	4658,39			
	1	28	32,20	150,00	4658,39	4692,64	41,89	0,89
	2		32,05	150,00	4680,19			
	3		31,65	150,00	4739,34			
	1	91	30,50	150,00	4918,03	4918,11	24,19	0,49
	2		30,65	150,00	4893,96			
	3		30,35	150,00	4942,34			
	B 20	1	7	34,25	150,00	4379,56	4315,73	89,45
2		34,45		150,00	4354,14			
3		35,60		150,00	4213,48			
1		28	36,55	150,00	4103,97	4082,80	251,23	6,15
2			34,70	150,00	4322,77			
3			39,25	150,00	3821,66			
1		91	34,54	150,00	4342,79	4297,90	44,94	1,05
2			34,90	150,00	4297,99			
3			35,27	150,00	4252,91			
B 30	1	7	37,90	150,00	3957,78	4003,18	92,48	2,31
	2		38,05	150,00	3942,18			
	3		36,50	150,00	4109,59			
	1	28	37,35	150,00	4016,06	4010,23	136,43	3,40
	2		36,20	150,00	4143,65			
	3		38,75	150,00	3870,97			
	1	91	37,30	150,00	4021,45	4108,81	82,00	2,00
	2		35,85	150,00	4184,10			
	3		36,40	150,00	4120,88			
B 40	1	7	40,75	150,00	3680,98	3737,29	86,03	2,30
	2		39,10	150,00	3836,32			
	3		40,60	150,00	3694,58			
	1	28	37,75	150,00	3973,51	3961,29	10,90	0,28
	2		37,95	150,00	3952,57			
	3		37,90	150,00	3957,78			
	1	91	37,50	150,00	4000,00	3927,48	67,69	1,72
	2		38,30	150,00	3916,45			
	3		38,80	150,00	3865,98			
B 50	1	7	41,10	150,00	3649,64	3669,03	16,95	0,46
	2		40,80	150,00	3676,47			
	3		40,75	150,00	3680,98			
	1	28	38,70	150,00	3875,97	3965,83	79,47	2,00
	2		37,25	150,00	4026,85			
	3		37,55	150,00	3994,67			
	1	91	41,45	150,00	3618,82	3660,26	36,18	0,99
	2		40,80	150,00	3676,47			
	3		40,70	150,00	3685,50			