

RINOPOLYCRETE - TOWARDS A CEMENT-FREE AND FULLY RECYCLED CONCRETE



PROJECTO FCT

PTDC/ECI-CON/29196/2017

**Recycled inorganic polymer concrete - Towards a cement-free and fully recycled concrete  
(RInoPolyCrete)**

**Tarefa 4 - Relatório 3**

**Desempenho em termos de durabilidade de betões com cinza de fundo de  
resíduos sólidos urbanos activada alcalinamente**

Setembro de 2022

Financiamento FCT/POCI



Governo da República Portuguesa



União Europeia FEDER

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR Portugal



## Resumo

Neste relatório, apresenta-se os resultados de um estudo acerca do desempenho em termos de durabilidade de betões activados alcalinamente (BAA), cuja constituição inclui cinzas volantes (CV) e cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos (CFRSU), ligantes utilizados como substitutos do comum cimento Portland (CP). Foi também avaliado o desempenho destes mesmos betões produzidos com agregados reciclados (AR) ao invés de agregados naturais (AN). Aos olhos do sector da construção, estas substituições acarretam uma importante vantagem visto que, tanto as CFRSU como os AR, são produtos completamente reciclados, sendo a sua utilização menos prejudicial ao ambiente.

O CP foi substituído na sua totalidade em quatro betões diferentes, onde as percentagens de CV foram de 100, 75, 50 e 25% e as referentes às CFRSU foram de 0, 25, 50 e 75%, respectivamente, tendo estes sido produzidos com 100% AN. Outros quatro betões foram produzidos substituindo os AN, na sua totalidade, por AR, tendo as CV e as CFRSU percentagens de substituição iguais às anteriores. Dois betões produzidos com 100% CP, um com AN outro com AR, foram também ensaiados e utilizados como referência.

Durante o decorrer da campanha experimental, notou-se que, com o aumento da utilização de CFRSU, os betões foram apresentando um pior desempenho, chegando a demonstrar variações percentuais acima de 100% comparativamente ao betão de referência. Apenas na retração foi notada uma melhoria, havendo uma redução para os betões produzidos com AN. Porém, para os betões produzidos com AR, esta melhoria não foi notada visto que parte dos BAA apresentaram expansões significativas (havendo uma expansão de 90  $\mu\text{m}/\text{mm}$  para o betão com 75% de CFRSU). Foi notado também um grande incremento na resistência à compressão dos BAA após cura em câmara de  $\text{CO}_2$ , chegando a mostrar um aumento de 14,9 MPa no betão com 25% CV e 75% CFRSU.

## Índice

<b>RESUMO</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>2</b>
2.1 AGREGADO RECICLADO .....	2
2.2 CINZA VOLANTE .....	4
2.3 CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	5
2.4 ACTIVAÇÃO ALCALINA.....	7
2.5 PROPRIEDADES DE BETÕES ACTIVADOS ALCALINAMENTE COM AGREGADOS RECICLADOS.....	9
2.5.1 Resistência à compressão .....	10
2.5.2 Retracção.....	13
2.5.3 Absorção de água por capilaridade.....	15
2.5.4 Absorção de água por imersão.....	17
2.5.5 Penetração de cloretos.....	18
2.5.6 Carbonatação .....	19
2.6 PROPRIEDADES DE BETÕES ACTIVADOS ALCALINAMENTE COM CINZAS VOLANTES.....	21
2.6.1 Resistência à compressão .....	21
2.6.2 Retracção.....	23
2.6.3 Absorção de água por capilaridade.....	25
2.6.4 Absorção de água por imersão.....	27
2.6.5 Penetração de cloretos.....	29
2.6.6 Carbonatação .....	29
2.7 PROPRIEDADES DE BETÕES ACTIVADOS ALCALINAMENTE COM CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	31
2.7.1 Resistência à compressão .....	31
2.7.2 Retracção.....	32
2.7.3 Absorção de água por capilaridade.....	34
2.7.4 Absorção de água por imersão.....	35
2.7.5 Carbonatação .....	36
<b>3 CAMPANHA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>37</b>
3.1 PLANO EXPERIMENTAL.....	37

3.2	MATERIAIS.....	38
3.2.1	Água.....	38
3.2.2	Agregados naturais.....	39
3.2.3	Agregados reciclados.....	39
3.2.4	Cimento.....	39
3.2.5	Cinza volante.....	39
3.2.6	Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	40
3.2.7	Hidróxido de sódio.....	40
3.2.8	Silicato de sódio.....	40
3.2.9	Adjuvantes.....	40
3.3	COMPOSIÇÃO DOS BETÕES.....	40
3.3.1	Curva de referência de Faury.....	41
3.3.2	Composição dos betões.....	43
3.4	PRODUÇÃO.....	43
3.4.1	Betões produzidos com CEM.....	43
3.4.2	Betões produzidos com CV e CFRSU.....	44
3.5	PREPARAÇÃO DOS PROVETES E CONDIÇÕES DE CURA.....	44
3.6	ENSAIOS REALIZADOS AOS AGREGADOS.....	46
3.6.1	Análise granulométrica.....	46
3.6.2	Massa volúmica e absorção de água.....	47
3.6.3	Baridade.....	49
3.6.4	Caracterização agregado reciclado.....	50
3.7	ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO.....	50
3.7.1	Ensaio do abaixamento do cone de Abrams.....	50
3.7.2	Massa volúmica.....	51
3.8	ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	52
3.8.1	Resistência à compressão.....	52
3.8.2	Absorção de água por capilaridade.....	52
3.8.3	Absorção de água por imersão.....	53
3.8.4	Penetração de cloretos.....	54
3.8.5	Carbonatação.....	56
3.8.6	Retracção e retracção autógena.....	57
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	58
4.2	PRIMEIRA FASE - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	58
4.2.1	Propriedades das CFRSU.....	58

4.2.2	<i>Análise granulométrica dos agregados</i> .....	60
4.2.3	<i>Massa volúmica e absorção de água dos AN e AR</i> .....	61
4.2.4	<i>Composição dos ARG</i> .....	61
4.3	SEGUNDA FASE - PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO.....	62
4.3.1	<i>Trabalhabilidade</i> .....	62
4.3.2	<i>Massa volúmica</i> .....	66
4.4	PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	68
4.4.1	<i>Retracção</i> .....	68
4.4.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	72
4.4.3	<i>Absorção de água por imersão</i> .....	75
4.4.4	<i>Penetração de cloretos</i> .....	76
4.4.5	<i>Carbonatação</i> .....	78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>83</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
5.2	CONCLUSÕES GERAIS.....	83
5.2.1	<i>Betões no estado fresco</i> .....	84
5.2.2	<i>Betões no estado endurecido</i> .....	84
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>88</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>I</b>

## Lista de figuras

Figura 1 - Comparação das dimensões das partículas de cimento Portland, de CV com reduzido teor de cálcio, de CV com elevado teor de cálcio e de sílica de fumo (Malhotra & Mehta, 1996) .....	5
Figura 2 - Distribuição granulométrica das CFRSU para diferentes utilizações (adaptada de Dhir et al., 2018) .....	6
Figura 3 - Quebra de ligações covalentes no ligante (adaptado de Krivenko (2017)).....	8
Figura 4 - Resistência à compressão de argamassas produzidas com CVAA: (a) com AN; (b) com AR (adaptado de Casanova et al., 2021) .....	13
Figura 5 - Retracção dos diferentes betões (adaptado de Yang et al., 2008).....	14
Figura 6 - Retracção ao último dia das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al., 2021) .....	15
Figura 7 - Absorção de água por capilaridade: (a) primeiras 6 horas; (b) ao 8º dia (adaptado de Shaikh, 2016) .....	16
Figura 8 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al., 2021).....	16
Figura 9 - Coeficiente de difusão do cloreto para as misturas testadas (adaptado de Parthiban & Mohan, 2017) .....	19
Figura 10 - Profundidade de penetração dos cloretos aos 30, 60, 90 e 120 dias nas misturas com CVAA (adaptado de Nuaklong et al., 2018) .....	20
Figura 11 - Resistência à compressão das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al., 2021) .....	23
Figura 12 - Retracção para betões com CP e com CVAA aos 90 dias (adaptada de Fernandez-Jimenez et al., 2006).....	24
Figura 13 - Retracção, normal e autógena, para betões com CVAA: (a) diferentes concentrações de NaOH; (b) diferentes rácios de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH (adaptado de Ruengsillapanun et al., 2021).....	25
Figura 14 - Absorção de água e volume de vazios (adoptado de Olivia & Nikraz, 2008) .....	27

Figura 15 - Resultados da absorção de água (adoptado de Zhu et al., 2014).....	28
Figura 16 - Carbonatação medida através do método da fenolftaleína: (a) betão com CVAA; (b) betão com CP.....	30
Figura 17 - Resistência à compressão para as misturas produzidas (adaptado de Liu et al., 2021) ....	30
Figura 18 - Resistência à compressão das argamassas com CP, CVAA com melhor desempenho e CFAA (adaptado de Casanova et al., 2021).....	32
Figura 19 - Resistência à compressão das argamassas com AAC, pré e pós carbonatação (adaptado de Avila et al., 2022).....	33
Figura 20 - Retração de: (a) argamassas com CV; (b) argamassas com CFRSU (adaptado de Casanova et al., 2021) .....	33
Figura 21 - Resultados da retração das argamassas com AAC: (a) retração; (b) retração autogénea (adaptado de Avila et al., 2022) .....	34
Figura 22 - Absorção por capilaridade das argamassas com AAC (adaptado de Avila et al., 2022) ..	35
Figura 23 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com CFAA, pré e pós carbonatação (Casanova et al., 2021).....	36
Figura 24 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas produzidas, pré e pós carbonatação (Avila et al., 2022) .....	37
Figura 25 - Curvas de referência de Faury.....	42
Figura 26 - DRX das CFRSU utilizadas na presente investigação e das CFRSU comuns.....	59
Figura 27 - MEV das CFRSU.....	60
Figura 28 - Análise granulométrica dos diferentes AN utilizados.....	60
Figura 29 - Provetes antes (a) e após utilização de bórax (b) .....	65
Figura 30 - Diferença entre betonagens consecutivas: (a) primeira betonagem, betão trabalhável; (b) segunda betonagem, betão duro à saída da betoneira .....	66
Figura 31 - Retração (esquerda) e da retração autogénea (direita) dos provetes produzidos com AN .....	70

Figura 32 - Retracção (esquerda) e retracção autógena (direita) dos provetes produzidos com AR.	71
Figura 33 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade dos provetes produzidos.....	73
Figura 34 - Fenómeno da perda de massa nos provetes durante ensaio da absorção de água por capilaridade.....	74
Figura 35 - Absorção de água por imersão dos provetes produzidos (%).....	75
Figura 36 - Problemas de estabilidade da matriz do betão produzido com AR e CFRSU (esquerda) e perda de massa dos provetes (assente no fundo) após 24 h na máquina de vácuo (direita) .....	77
Figura 37 - Profundidade de penetração dos iões cloreto .....	78
Figura 38 - Profundidade de penetração do CO <sub>2</sub> nos provetes produzidos com AN.....	80
Figura 39 - Profundidade de penetração do CO <sub>2</sub> nos provetes produzidos com AR.....	81

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Resistência à compressão aos 28 dias (adaptado de Cai et al., 2012) .....	10
Tabela 2 - Resistência à compressão aos 3, 7, 28, 60 e 90 dias (adaptado de Shi et al., 2012).....	11
Tabela 3 - Resistência mecânica à compressão de CVAA (adaptado de Nuaklong et al., 2016).....	12
Tabela 4 - Constituição das argamassas e respectivas condições de cura (Casanova et al., 2021) .....	13
Tabela 5 - Resistência à compressão das argamassas às 24 h de cura térmica (MPa) (adaptado de Atiş et al., 2015) .....	22
Tabela 6 - Composição das misturas produzidas (adaptado de Olivia & Nikraz, 2008).....	26
Tabela 7 - Constituintes dos betões produzidos e as suas propriedades (adaptado de Assi et al., 2018) .....	28
Tabela 8 - Valores de A e B sugeridos por Faury .....	42
Tabela 9 - Misturas realizadas no presente estudo.....	43
Tabela 10 - Ensaio realizados na presente investigação e respectivas dimensões dos provetes .....	45
Tabela 11 - Variação da distribuição granulométrica das CFRSU entre o moinho pequeno e o moinho grande.....	59
Tabela 12 - Resultados das massas volúmicas e absorção de água dos agregados.....	62
Tabela 13 - Proporções dos constituintes do ARG (% por massa) .....	62
Tabela 14 - Valores de abaixamento do cone de Abrams referentes às diferentes misturas .....	63
Tabela 15 - Espalhamento das diferentes argamassas aos 30 minutos (mm) .....	65
Tabela 16 - Massa volúmica dos betões no estado fresco.....	67
Tabela 17 - Resistência à compressão antes e após cura em câmara de CO <sub>2</sub> .....	82
Tabela 18 - Comparação dos resultados entre os betões produzidos com AN no estado endurecido .	85
Tabela 19 - Comparação dos resultados entre os betões produzidos com AR no estado endurecido .	86
Tabela 20 - Comparação dos resultados entre as famílias produzidas com AN e AR no estado endurecido.....	88

## 1 Introdução

Actualmente, há uma grande preocupação em termos da sustentabilidade no sector da construção que tem vindo a apresentar grandes impactes ambientais, desde a extracção de grandes quantidades de matéria-prima não renovável ao elevado consumo energético, que levam a elevadas emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa (Torgal e Jalali, 2010). Segundo o *United Nations Environment Programme* (2020), cerca de 10% das emissões globais de CO<sub>2</sub> para a atmosfera são provenientes do sector da construção e, com o decorrer dos anos, é esperado que se tornem cada vez mais elevadas. Benhelal et al. (2013) acrescentaram que, desses 10%, 5 a 7% são provenientes da produção do cimento Portland (CP). Atendendo que este tem vindo a ser o principal ligante utilizado na indústria da construção para a produção de materiais cimentício, a sua produção apresenta uma elevada “pegada ecológica”. Em termos de matéria-prima não renovável, o sector da construção ainda acarreta cerca de 40% do seu consumo a nível mundial sendo esta, muitas vezes, não utilizada de forma eficiente (Circularity Gap report, 2019).

Com o objectivo de minimizar os efeitos negativos provocados pelo sector da construção, é necessário estudar novas alternativas que substituam as actuais. O presente estudo foi então realizado visando responder a estas necessidades, onde o CP foi substituído na sua totalidade por cinzas volantes (CV) e cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos (CFRSU) (ligantes estes que funcionam através de uma activação alcalina) e estudado o comportamento dos mesmos com a substituição do agregado natural (AN), na sua totalidade, por agregado reciclado (AR).

Esta substituição não só promove a diminuição do impacte que o sector da construção acarreta, como resolve o problema da acumulação de resíduos. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (2022), cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos de Construção e Demolição (RCD) foram gerados no ano de 2020 em Portugal. Esta grande quantidade de resíduos resultante das demais construções espalhadas pelo país tornam a gestão dos mesmos uma tarefa difícil. Com isto, os RCD, ao serem reutilizados como AR, promovem a diminuição da quantidade dos mesmos que vai para aterro, beneficiando assim o ambiente. Outro dos problemas, que está actualmente a preocupar a sociedade, é o aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). É estimado que, em 2025, a produção mundial destes resíduos seja de 2,2 mil milhões de toneladas, o que perfaz uma quantidade de 1,42 kg/pessoa.dia (Silva *et al.*, 2017). Sendo as CFRSU

cerca de 85% a 95% do produto resultante da incineração dos RSU, a sua utilização, ao invés do CP, vai diminuir o impacte ambiental e ajudar na preservação de recursos naturais.

O objectivo deste estudo passa por avaliar o desempenho de betões activados alcalinamente (BAA) com diferentes percentagens de CV e CFRSU, ligantes utilizados como substituto ao convencional CP. Para tal, foram produzidas quatro composições diferentes de betão onde as percentagens de substituição do CP pelos ligantes alternativos foram de 100, 75, 50 e 25% para as CV e 0, 25, 50 e 75% para as CFRSU, respectivamente, todas produzidas com AN. Quatro betões adicionais foram produzidos substituindo por completo o AN por AR, perfazendo oito betões no total. Dois betões de referência, contendo CP como ligante, foram produzidos, tanto com 100% de AN como com 100% de AR, de modo a comparar com os demais. Estes betões foram então ensaiados de modo a serem avaliadas as propriedades no que diz respeito à sua durabilidade e resistência mecânica. Também foram estudadas as características destas misturas produzidas no seu estado fresco (i.e., trabalhabilidade e massa volúmica).

## 2 Estado da arte

A presente secção tem como objectivo apresentar a informação relevante e o desenvolvimento científico existente relativo ao tema abordado neste estudo. Em primeiro lugar, começa-se por apresentar algumas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais constituintes: AR, CV e CFRSU. Seguidamente, são analisados os betões activados alcalinamente com AR, com CV e com CFRSU, quanto ao seu desempenho em termos de durabilidade. As características tidas em conta para esta análise foram a retracção, a absorção de água por capilaridade e imersão, a penetração de cloretos e, por fim, a carbonatação. Sendo a utilização de CFRSU como ligante na produção de betões um tema de investigação recente, existem poucos estudos realizados acerca do mesmo. No entanto, a utilização deste como substituto parcial, tanto do cimento como de ligantes activados alcalinamente, permite identificar algumas das suas tendências e características.

### 2.1 Agregado reciclado

A utilização de AR no sector da Construção, em substituição de AN, apresenta grandes vantagens a níveis ambientais e foi considerada uma das abordagens mais eficazes para a reciclagem de RCD. Para além de ajudar na diminuição da pegada de CO<sub>2</sub> e do consumo de energia aquando da produção de AN, também ajuda na diminuição do impacte ambiental provocado

pela deposição dos mesmos em aterro. Além de ser uma alternativa mais sustentável para o ambiente, também cria novas oportunidades de mercado (Silva et al., 2016).

O AR, na sua constituição, pode conter diversos componentes, incluindo betão triturado de estruturas antigas, tijolo, pedras, fragmentos de elementos de alvenaria triturados, diferentes tipos de cerâmica (azulejo e cerâmica sanitária), vidros, entre outros. Esta distribuição aleatória da matriz causa algumas limitações na utilização destes materiais no que diz respeito às normas para o volume máximo de AR em betão (Abdollahnejad et al., 2019a).

Em relação à granulometria deste tipo de agregado, é possível obter qualquer graduação recorrendo à britagem do mesmo. No entanto, além deste processo poder afectar a forma e a quantidade de finos, pode haver a possibilidade de se ter de lavar o agregado antes da sua utilização devido à existência de poeira residual nas superfícies dos mesmos (Rodrigues et al., 2013). Tal como os AN, os AR podem ser divididos em dois tipos, agregados reciclados finos (ARF), denominação dada aqueles que apresentem granulometria, no máximo, até 4 mm (Ledesma et al., 2014; Neno et al., 2014; Fan et al., 2016), e agregados reciclados grossos (ARG), agregados com granulometria superior a esse valor.

Relativamente à densidade, Rodrigues et al. (2013) afirmam que, devido à presença de uma pasta cimentícia agregada ao AR, a densidade destes é geralmente inferior à dos AN. Silva et al. (2015) justificam a afirmação anterior baseando-se em três factores, sendo eles o processo de reciclagem dos AR, a qualidade de material original (quanto menor for a relação água/ligante ( $a/l$ ) do betão original maior vai ser a densidade dos AR) e ainda o tamanho dos agregados. Em relação à absorção de água, este tipo de agregado também se diferencia dos AN, sendo a sua absorção superior. Silva et al. (2014) afirmaram que os valores de absorção de água dos AN se encontram entre 0.5% e 1.5%; no entanto, devem ser tidas mais precauções aquando da utilização de AR devido à sua maior porosidade. Xiao (2018), apresentou valores de absorção de água, variando entre 4 e 13% para os ARF e entre 2 e 7% para os ARG.

Para uma mistura de betão de baixa a média resistência, a resistência à compressão depende intrinsecamente da resistência da pasta de cimento. Contudo, se a resistência à compressão do agregado for inferior à da pasta de cimento, a resistência do compósito torna-se também dependente da resistência dos seus agregados. Por conseguinte, é importante avaliar a resistência do AR para determinar a qualidade dos seus materiais originais e obter uma melhor compreensão

do seu efeito nas propriedades do betão. Perante a resistência mecânica de um betão produzido com AR, existem três zonas de transição: a zona entre o agregado e a pasta de ligante original aderida, entre essa mesma pasta e a nova pasta de ligante e ainda entre os AN originais e a nova pasta de cimento. Assim, a resistência mecânica da pasta de ligante aderida aos AR é fortemente influenciada pela resistência mecânica do betão original e pela qualidade dessas zonas de transição (Silva et al., 2014).

## 2.2 Cinza volante

As CV, sendo uma opção mais económica e mais sustentável ao cimento, têm vindo a afirmar-se como uma alternativa válida na produção de BAA devido à presença de silício e alumina na sua composição (Fang et al., 2018). No entanto, a produção de cinzas volantes em Portugal está a diminuir. Desde 30 de Novembro de 2021, as centrais termoeléctricas a carvão portuguesas deixaram de produzir energia. Com o acordo de Paris, celebrado a 12 de Dezembro de 2015, visou-se alcançar a descarbonização das economias mundiais e limitar o aumento médio da temperatura global em menos de 2 °C até 2050. Com este acordo, o Governo decretou a data de 2030 para se terminar com o uso de carvão para a produção de energia. Apesar de ser benéfico de um ponto de vista ambiental, a decisão representa um revés importante: com o fim da energia a partir do carvão, pois termina a disponibilidade de cinzas volantes fazendo com que a indústria do betão pronto perca este resíduo para o seu processo produtivo.

Este material é definido como um aluminossilicato que, por si só, não apresenta propriedades cimentícias; no entanto, com as condições correctas e reagindo com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formam um gel (Xu & Shi, 2018). As CV caracterizam-se por ser um pó fino constituído por partículas vítreas de forma esférica, resultantes da queima de carvão pulverizado em centrais termoeléctricas. Apresentam propriedades pozolânicas e são constituídos essencialmente por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O  $\text{SiO}_2$  apresenta-se em duas formas microestruturais distintas, cristalina e amorfa, sendo que, na forma amorfa, tem a capacidade de se dissolver por ação de um activador alcalino (AA). Essa dissolução é auxiliada, no início da polimerização, pelo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  resultando assim num gel de aluminossilicatos. O  $\text{CaO}$  presente nos materiais activados alcalinamente (MAA) é o constituinte que possibilita uma resistência mecânica inicial (Farhan et al., 2019).

Segundo a especificação ASTM C618 (2019), as CV que apresentam um teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  superior a 70% pertencem à Classe F e possuem um teor de CaO inferior a 10%. As CV que apresentam uma soma entre 50 e 70% pertencem à Classe C e possuem um teor de CaO superior a 10%. Esta classificação é utilizada quando se recorre a CV como adição ao cimento, mas também é aplicável nos polímeros inorgânicos.

Em termos morfológicos, as partículas das CV são, na sua generalidade, esféricas (sólidas ou ocas), com uma densidade de 2300-2600  $\text{kg/m}^3$ . As restantes apresentam formas irregulares que provêm de carvão não incinerado. Estas partículas possuem um diâmetro entre 1  $\mu\text{m}$  a mais de 200  $\mu\text{m}$ , granulometria que depende do método de combustão do carvão, entre outros factores (Xu & Shi, 2018). A dimensão das partículas é um factor muito importante; quanto maior a sua finura, maior será a sua superfície específica, fazendo com que tenha uma maior reactividade, isto é, a reacção das partículas com o AA vai ser mais eficaz, reduzindo assim possíveis formações de microfendas, visto que é criada uma matriz mais densa, levando a uma melhor capacidade mecânica (Farhan et al., 2019). Malhotra & Mehta (1996) fizeram uma comparação das dimensões das partículas de cimento Portland, de CV com reduzido teor de cálcio, de CV com elevado teor de cálcio e de sílica de fumo, apresentando-a como se encontra na Figura 1.

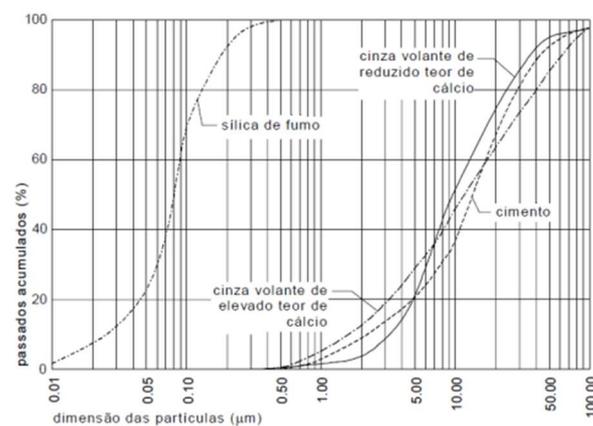


Figura 1 - Comparação das dimensões das partículas de cimento Portland, de CV com reduzido teor de cálcio, de CV com elevado teor de cálcio e de sílica de fumo (Malhotra & Mehta, 1996)

### 2.3 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

A produção mundial de RSU é massiva. Em 2012, era equivalente a 1,3 mil milhões de toneladas e estima-se que, até 2025, a sua produção aumente para 2,2 mil milhões de toneladas, o que

constitui um crescimento substancial da produção deste resíduo (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012) Através da incineração de RSU e após determinados tratamentos, obtém-se um subproduto - as CFRSU. Na Europa, cerca de 20 milhões de toneladas deste material são produzidas anualmente (Norgaard et al., 2019).

As CFRSU apresentam na sua constituição materiais cerâmicos, fragmentos de vidro, metais ferrosos e não ferrosos, minerais, matéria orgânica não queimada, entre outros, com partículas de tamanhos até 100 mm, sendo peneiradas e removidas as partículas acima de 20 a 50 mm. Dependendo da sua utilização final, estas vão passar por outro processo de peneiração, no caso de serem utilizadas para agregado fino, ou por um processo de moagem, caso venham a ser utilizadas como um componente cimentício, apresentando uma dimensão de partículas semelhante ao CP (Dhir et al., 2018). Na Figura 2, está representada a distribuição granulométrica das CFRSU para as diferentes utilizações.

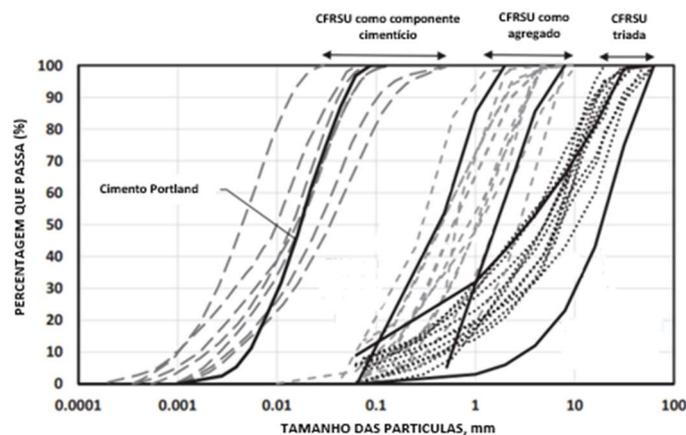


Figura 2 - Distribuição granulométrica das CFRSU para diferentes utilizações (adaptada de Dhir et al., 2018)

Em termos morfológicos, as CFRSU têm partículas com textura rugosa, com formato irregular e angular, apresentando uma microestrutura porosa devido à formação de bolhas de gás durante o processo de incineração de aquecimento e arrefecimento (Dhir et al., 2018). No entanto, se o tempo de tratamento dos RSU dentro do forno aumentar, a morfologia das CFRSU modifica-se, melhorando a formação dos cristais da cinza de fundo, tornando a superfície das partículas mais lisa (Chang & Wey, 2006). Quanto à densidade, esta vai variar consoante a sua utilização final, sendo maior para as CFRSU utilizadas como componente cimentício. Isto deve-se ao facto de, após a moagem, as partículas resultantes serem mais finas, compactas e menos porosas, comparativamente com as CFRSU utilizadas como agregado fino. No entanto, comparadas

com o cimento, as cinzas apresentam um valor de densidade inferior, rondando  $2630 \text{ kg/m}^3$ , sendo que o cimento apresenta valores por volta de  $3150 \text{ kg/m}^3$  (Dhir et al., 2018). Os valores de densidade aparente não diferem muito dos valores de massa volúmica devido ao facto de as CFRSU serem um material poroso, contendo vazios preenchidos com ar entre as partículas numa massa por unidade de volume de material solto. Em termos numéricos, a baridade varia entre  $510$  e  $2000 \text{ kg/m}^3$ , sendo o seu valor médio de  $1285 \text{ kg/m}^3$  (Dhir et al., 2018). A rugosidade, a porosidade, a elevada área superficial específica e a baixa densidade aparente levam as CFRSU a apresentar uma capacidade de absorção de água elevada, com um valor médio de  $9.3\%$  (Dhir et al., 2018), sendo este um valor elevado comparando com outros materiais, como por exemplo a areia, em que é  $1-3\%$ .

Em termos químicos, as CFRSU têm na sua composição óxidos, similares aos que se encontram em materiais cimentício, que, após moídos, apresentam uma forma reactiva e influenciam a sua utilização. Com maior predominância são encontrados o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), com um valor médio de  $37,4\%$ , o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), com valor médio de  $22,2\%$ , o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com valor médio de  $10,2\%$ , e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), com valor médio igual a  $8,3\%$ . Outros óxidos podem ser encontrados na sua constituição, mas em menor quantidade, tais como o óxido de sódio ( $2,8\%$ ), o óxido sulfúrico ( $2,7\%$ ), o pentóxido de fósforo ( $2,3\%$ ), o óxido de magnésio ( $2,0\%$ ) e o óxido de potássio ( $1,4\%$ ) (Dhir et al., 2018). Chimenos et al. (1999) apresentaram as fases minerais principais destas cinzas, sendo elas, o quartzo, o carbonato de cálcio, a cal e ainda o feldspato. Através destas percentagens, foi possível classificar as CFRSU dentro dos três tipos de cimento activados alcalinamente propostos por Glukhovsky, que os dividiu em: cimentos com alto teor de cálcio, com baixo teor de cálcio e híbrido e cimentos com mistura de dois ou mais ligantes. Visto que as CFRSU apresentam um valor médio de  $\text{CaO}$  igual a  $22,2\%$  da massa do ligante (como demonstrado no diagrama ternário de Dhir et al. (2018), este valor fica abaixo dos definidos por Glukhovsky, em 1979, e mencionado em Krivenko (2017) para cimentos activados alcalinamente com alto teor de  $\text{CaO}$ ).

## 2.4 Activação alcalina

Ao contrário do CP, que consegue ganhar resistência mecânica ao ser misturado com água, desenvolvendo silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), as CV e as CFRSU demonstram muito

baixa reactividade ao misturar apenas com água. No entanto, se estes ligantes forem submetidos a uma activação alcalina, a sua reactividade aumenta. Davidovits (1994) propôs a utilização de um AA para reagir com o silício (Si) e o alumínio (Al) presentes nestes ligante para espoletar o processo de polimerização dos mesmos. Segundo Krivenko (2017), o procedimento de activação alcalina possui três fases fulcrais. Na primeira, as ligações covalentes (Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si) vão ser destruídas devido a um aumento de pH da mistura (9 a 12), com a introdução de metais alcalinos. Esta destruição vai fazer com que se obtenha uma solução rica em catiões e aniões numa fase coloidal (Figura 3), na qual os catiões dos metais alcalinos se ligam com os aniões  $\equiv\text{Si-O}^-$ , neutralizando-os nos processos de policondensação (reacções de polimerização), o que perfaz a segunda etapa. Por fim, a última etapa corresponde à formação da estrutura.

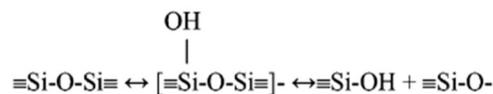
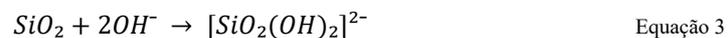
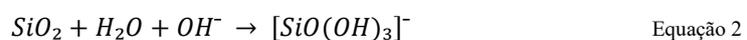
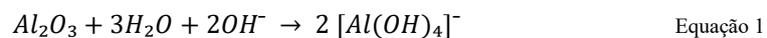


Figura 3 - Quebra de ligações covalentes no ligante (adaptado de Krivenko (2017))

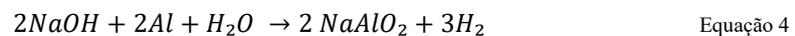
Severo et al. (2013) explicaram como ocorre a activação alcalina em materiais produzidos com CV, baseando-se em várias outras investigações. O processo inicia-se pela dissolução das partículas sólidas de aluminossilicatos em solução alcalina (SA), como a sílica e a alumina. A alcalinidade da mistura apresenta uma grande importância visto que influencia a taxa de dissolução destes produtos. Enquanto a alumina é altamente solúvel tanto em meio ácido como básico, a sílica apenas apresenta alta solubilidade em meio alcalino. As reacções referentes a esta primeira fase, fase da dissolução, estão esquematizadas segundo as Equações 1 a 3:



Após esta dissolução, ocorre a etapa referente à condensação, onde os produtos resultantes das equações anteriores se ligam devido à força de atracção de um dos grupos  $\text{OH}^-$  do  $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$  com os iões de Al do  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ , resultando assim na formação de uma estrutura intermediária. Ocorre então a condensação dos grupos de  $\text{OH}^-$  desta estrutura formando uma espécie de aluminossilicato (Si-O-Al-O), libertando uma molécula de água. Esta, ao ser expelida da matriz polimérica durante o processo de cura, vai desocupar espaços e deixar a mesma sem descontinuidades na sua porosidade, proporcionando benefícios no seu desempenho. Conclui-se que a

água adicionada na mistura não é necessária para que ocorra a reacção química e apenas é utilizada para garantir boa trabalhabilidade da mistura, ao contrário do CP que necessita da água para que ocorra o processo de hidratação (Rangan, 2008). Por último, a formação e o endurecimento do betão produzido com CV é resultado da condensação entre aluminatos e silicatos (Severo et al., 2013).

É presumível que a activação das CFRSU se processe da mesma maneira do que a activação atrás descrita; no entanto, um dos seus principais problemas é a presença de matéria orgânica e de alumínio na sua constituição, que podem provocar implicações no comportamento e na resistência mecânica do material. O alumínio, em meio alcalino, vai provocar a formação de bolhas de hidrogénio (Equação 4). Esta reacção, até estabilizar, vai demorar um período de tempo indeterminado e, se coincidir com o período de presa do material, pode causar perdas futuras ao nível do seu comportamento mecânico (Dhir et al., 2018). Saikia et al. (2015) afirmaram que, com um tratamento considerável das CFRSU com água e uma solução de NaOH, há a conversão do alumínio em aluminatos, o que leva a uma melhoria das propriedades do material.



Em comparação com as CV, as CFRSU apresentam menor resistência, espolitando um menor interesse na produção de MAA. Enquanto as CV possuem um elevado grau de polimerização, levando a um maior desenvolvimento de resistência, as CFRSU, tendo partículas grandes e porosas, apresentam reactividade reduzida (Chindaprasirt et al., 2009). Mesmo testando a reactividade com uma granulometria mais fina (ensaios levados a cabo por Jaturapitakkul & Cheerarot (2003)), alcançando grandes resistências, esta não se iguala à das CV (Hanjitsuwan et al., 2017).

## 2.5 Propriedades de betões activados alcalinamente com agregados reciclados

Na secção seguinte, são apresentados estudos realizados por diferentes investigadores, acerca das propriedades de betões activados alcalinamente com agregados reciclados. Essas propriedades são: resistência à compressão, retracção, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, penetração de cloretos e carbonatação. São também apresentados estudos sobre betões produzidos com AN, com e sem activação alcalina, e betões produzidos com AR, focando as mesmas propriedades, de modo a comparar os resultados obtidos.

### 2.5.1 Resistência à compressão

Cai et al. (2012) produziram várias amassaduras de forma a investigar a resistência à compressão de betões com AR. Para tal, utilizaram vários rácios de substituição de AR (0%, 20%, 30%, 50%, 70% e 100%) e ensaiaram quatro betões com graus de resistência diferentes (C20, C30, C35 e C40). O tamanho das partículas de AR situava-se entre 5 e 37,5mm e o agregado fino utilizado foi areia fluvial, com um módulo de finura de 2,62 com uma percentagem de teor de água de 5%. O ligante utilizado foi CP comum. Os betões foram então misturados utilizando o método baseado na pré-absorção do AR e a água suplementar foi calculada a partir do teste de absorção de água do AR. Os resultados da resistência à compressão foram medidos aos 7, 28 e 60 dias e os resultados aos 28 dias encontram-se sumarizados na Tabela 1. Em todos os ensaios realizados, nota-se um decréscimo na resistência (2,2%-15,3%) quando se utiliza 100% de AR, comparado com o betão produzido na totalidade com AN.

Tabela 1 - Resistência à compressão aos 28 dias (adaptado de Cai et al., 2012)

28 dias	Resistência à compressão com diferentes rácios de substituição de AR (MPa)					
	0%	20%	30%	50%	70%	100%
C20	28,9	27,5	24,5	27,9	24,3	24,5
C30	37,4	37,8	34,2	37,7	35,9	34,8
C35	45,7	43,0	44,6	46,7	45,1	43,9
C40	48,1	49,6	49,4	49,7	45,0	47,0

Shaikh (2016) ensaiou, durante a sua investigação, 4 séries de betões produzidos com cinzas volantes activadas alcalinamente (CVAA), onde a percentagem de agregado natural grosso (ANG) foi diminuindo, havendo uma substituição desse por agregado reciclado grosso (ARG). A primeira série (GPC0) foi utilizada como de controlo, não havendo nenhuma substituição de ANG. Nas restantes séries, os ANG foram substituídos por ARG a taxas de 15% (GPC15), 30% (GPC30) e 50% (GPC50) (por peso). Imediatamente após a produção e moldagem dos respectivos betões, estes foram submetidos a uma cura a 60 °C, durante 24 horas e, passado esse tempo, foram desmoldados e mantidos à temperatura ambiente até à data do teste (28 dias após betonagem). Ao ensaiarem os provetes, concluíram que a resistência à compressão diminui à medida que aumenta a percentagem de ARG na sua constituição. Os provetes foram testados tanto aos 7 como aos 28 dias após desmoldados. Ao aumentar o conteúdo de AR, a resistência

à compressão, em ambas as idades, diminui gradualmente, ainda que a um ritmo relativamente baixo, apenas 15% e 16% a 7 e 28 dias, respectivamente, para a mistura GPC50, o que é ligeiramente inferior ao betão produzido com CP com a mesma quantidade de AR.

Shi et al. (2012) estudaram, de igual forma, a influência da incorporação de AR nas propriedades de betões produzidos com CVAA. Para tal, produziram várias amassaduras, onde os AN foram substituídos por AR em 0, 50 e 100%. Como termo de comparação, fizeram também, com as mesmas percentagens de substituição de AR, betões produzidos a partir de CP. O rácio de a/l utilizado para todas as amassaduras foi de 0.50. Os provetes produzidos com CVAA foram submetidos a uma cura térmica de 80 °C durante 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e colocados à temperatura ambiente até ao dia de ensaio. O ensaio à compressão foi então realizado a 3, 7, 28, 60 e 90 dias após desmoldar e os resultados encontram-se na Tabela 2. Os autores concluíram que, com o aumento da percentagem de AR na constituição das misturas, a resistência à compressão diminuiu, tanto para os provetes produzidos com CVAA como para os produzidos com CP. No entanto, o decréscimo na resistência foi maior nas CVAA, mesmo estas apresentando melhor comportamento do que os betões convencionais (havendo um decréscimo de 10,8%, na resistência aos 28 dias, do BN100, comparando com o BN0, e um decréscimo de 36,2%, aos 28 dias, do CVAA100, comparado com o CVAA0).

Tabela 2 - Resistência à compressão aos 3, 7, 28, 60 e 90 dias (adaptado de Shi et al., 2012)

Mistura	3 dias	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
BN0	22,5	37,0	50,0	51,7	62,4
BN50	22,4	36,1	45,0	46,5	53,6
BN100	22,0	36,4	44,6	45,6	50,8
CVAA0	74,4	80,6	85,7	86,1	88,2
CVAA50	61,1	67,7	71,6	71,7	72,0
CVAA100	47,8	50,8	54,7	55,0	55,1

Nuaklong et al. (2016), na sua investigação, estudaram de igual forma a influência dos AR em betões produzidos a partir de CVAA. Para tal, produziram 6 misturas onde, em três delas, substituíram ANG por ARG na sua totalidade. Para todas as misturas, foi utilizado um rácio a/l de 0,6 e as quantidades referentes ao AA (NaOH) variaram, sendo as concentrações de 8, 12 e 16 M. Após realizada a betonagem e passada 1 hora dentro dos moldes, os provetes foram submetidos

a uma cura térmica durante 2 dias a 60 °C. No fim do período de cura, foram desmoldados e colocados numa sala com condições controladas com 23 °C e 50% humidade relativa (HR). Passados 7 dias, os provetes foram ensaiados à compressão sendo os resultados apresentados na Tabela 3. Através dos valores observados, pode-se concluir que, para 12 M de NaOH (concentração ideal do AA), há um decréscimo de 7% na resistência à compressão do betão com CVAA-AR, comparado com o CVAA-AN.

Tabela 3 - Resistência mecânica à compressão de CVAA (adaptado de Nuaklong et al., 2016)

NaOH (mol)	Resistência à compressão (MPa) - normalizada (%)	
	CVAA-AN	CVAA-AR
8	40,0 - 100	30,6 - 76
12	41,4 - 100	38,4 - 93
16	38,4 - 100	35,8 - 91

Casanova et al. (2021) testaram 12 famílias de argamassas activadas alcalinamente na sua investigação, sendo que foi utilizada uma substituição total de AR por AN em parte das amassaduras. Como ligantes foram utilizadas CVAA e cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos activadas alcalinamente (CFAA). Foi também produzida uma mistura com CP como mistura de controlo. Todas as argamassas foram produzidas com uma proporção volumétrica de ligante/agregado igual a 1/3. Relativamente às condições de cura, todos os provetes foram curados durante 24 horas à temperatura ambiente (com película plástica a envolver os moldes). Após esse tempo, foram submetidas a diferentes curas térmicas: 24 horas em condições ambientais (18 °C e HR de 65%), 24 horas a 70 °C, 48 horas a 70 °C e 24 horas a 90 °C. Terminado o respectivo tempo de cura térmica, foram mantidos dentro de uma câmara com uma temperatura constante de 20 °C e 60% de HR até à idade do teste. Todas as amassaduras estão expressas na Tabela 4.

Os resultados da resistência à compressão foram os esperados e estão de acordo com os das investigações anteriores, onde houve uma grande diminuição na resistência quando se utilizou AR. Os resultados para as argamassas produzidas com CVAA encontram-se expressos na Figura 4. Observa-se que, aos 28 dias, a resistência à compressão se encontrava entre 25 e 56 MPa nas argamassas produzidas com AN, havendo uma redução de 15,4-62,2% comparando com a argamassa de referência (aos 28 dias, obtiveram 66,2 MPa). Para as produzidas com AR, a resistência variou foi de 11-16 MPa.

Tabela 4 - Constituição das argamassas e respectivas condições de cura (Casanova et al., 2021)

Código da mistura	Ligante	Agregados	Tipo de cura	
FA-NA 70/24	CV	Agregado natural	70 °C durante 24 h	
FA-NA 70/48			70 °C durante 48 h	
FA-NA 90/24			90 °C durante 24 h	
FA-RA 70/24			70 °C durante 24 h	
FA-RA 70/48			Agregado reciclado	70 °C durante 24 h
FA-RA 90/24			90 °C durante 24 h	
BA-NA 70/24	CFRSU	Agregado natural	70 °C durante 24 h	
BA-NA 70/48			70 °C durante 48 h	
BA-NA 90/24			90 °C durante 24 h	
BA-RA 70/24			70 °C durante 24 h	
BA-RA 70/48			Agregado reciclado	70 °C durante 48 h
BA-RA 90/24			90 °C durante 24 h	

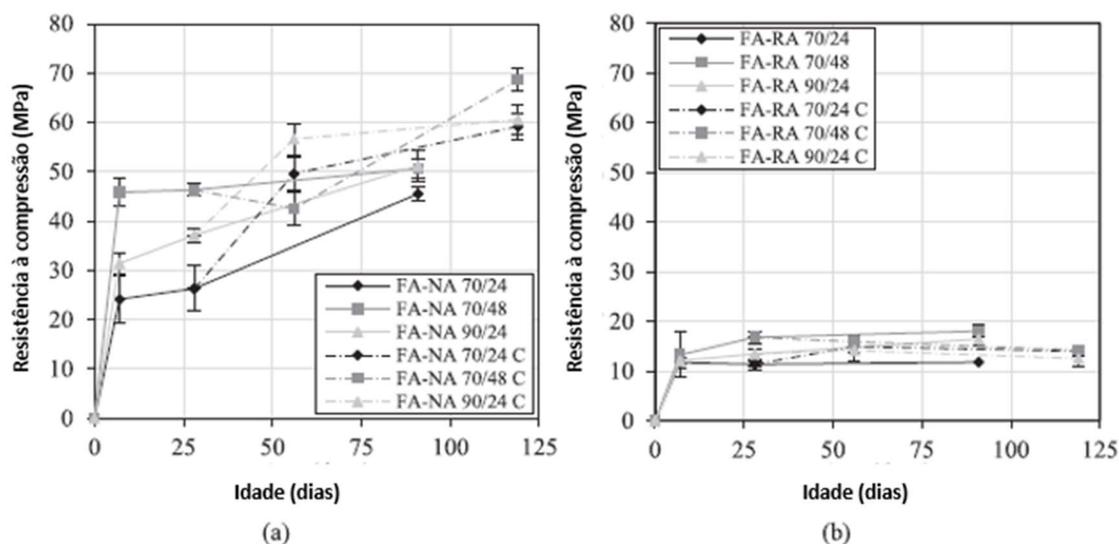


Figura 4 - Resistência à compressão de argamassas produzidas com CVAA: (a) com AN; (b) com AR (adaptado de Casanova et al., 2021)

## 2.5.2 Retracção

Yang et al. (2008) produziram 10 betões com diferentes constituições, sendo um deles o betão de referência, produzido com AN. Os restantes betões foram produzidos substituindo AN por três tipos de AR. A classificação dos AR utilizados foi identificada de acordo com a sua absorção de

água: os agregados grossos de grau I, II e III tinham uma absorção de água inferior a 3%, 5% e 7%, respectivamente, enquanto os agregados finos de grau I e II tinham uma absorção de água inferior a 5% e 10%, respectivamente. As substituições fizeram-se total e parcialmente sendo que os provetes ensaiados em termos de retracção foram a mistura de controlo, o betão RG I -100 (ARG de grau 1 + agregado natural fino (ANF)), o betão RG II -100 (ANG + ARF de grau 2 + ANF) e o betão RG III -100 (ARG de grau 3 + ANF). Os autores, após os testes, concluíram que, em idades precoces (primeiros 10 dias), o betão produzido a partir de AR apresenta menor retracção do que o betão de referência devido a uma maior capacidade de absorção de água por parte dos AR, permitindo que haja uma compensação de água nos primeiros dias de ensaio. A água presente dentro dos AR vai continuar a hidratar a matriz do betão evitando assim retracção excessiva. No entanto, a retracção a longo prazo dos betões produzidos com AR aumenta relativamente ao produzido com AN. Na Figura 5, que apresenta os resultados, pode-se observar uma maior retracção nos provetes referentes à substituição de AN por AR.

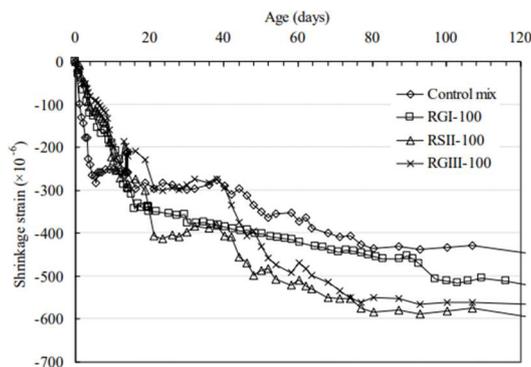


Figura 5 - Retracção dos diferentes betões (adaptado de Yang et al., 2008)

Mastali et al. (2018) produziam argamassas constituídas por CVAA e AR na sua investigação, variando apenas as concentrações de hidróxido de sódio, entre 7, 8 e 9 M. Os resultados a que chegaram foram posteriormente discutidos por Abdollahnejad et al. (2019b). Os autores concluíram que as amassaduras de CVAA com AR têm uma maior retracção nos primeiros 7 dias (50% da taxa total) comparada com betões produzidos com outros ligantes.

Na Figura 6, apresenta-se os valores obtidos por Casanova et al. (2021) (investigação descrita na subsecção anterior) no último dia de medição para as misturas produzidas com CVAA. Como expectável, a substituição de AN por AR levou a um aumento substancial de retracção, excepto para a mistura submetida a um tempo de cura igual a 48 h e a uma temperatura de 70 °C. Esta

mistura produzida com AR apresentou uma menor retracção do que a congénere com AN.

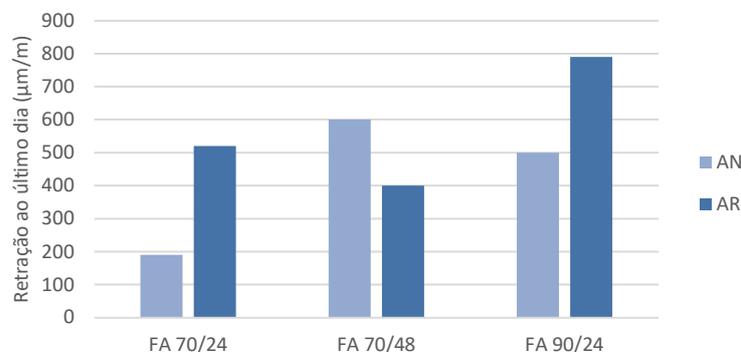


Figura 6 - Retracção ao último dia das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al., 2021)

### 2.5.3 Absorção de água por capilaridade

A taxa de absorção de água por capilaridade no betão depende da porosidade dos mesmos, onde, para o betão não saturado, a taxa de entrada de água é largamente controlada pela absorção devido à ascensão capilar.

Shaikh (2016) ensaiaram, na investigação descrita na secção anterior, a influência da utilização de ARG na absorção de água por capilaridade do betão produzido com CVAA. A norma seguida para este ensaio foi a ASTM C1585-13 (2013). A Figura 7(a) mostra os resultados a que os autores chegaram no final das primeiras 6 horas (absorção inicial). Concluíram que uma maior percentagem de ARG leva a uma maior taxa de absorção de água, excepto no betão GPC15, onde a absorção foi ligeiramente inferior à do betão de referência. No caso da série GPC50, a absorção por capilaridade aumenta em cerca de 26%, valor muito inferior ao observado por Shaikh numa investigação anterior, para a absorção de água por capilaridade num betão produzido a partir de CP e a mesma percentagem de substituição de ARG. Estas melhores propriedades indicam uma melhor microestrutura da pasta do betão activado alcalinamente em comparação com um constituído por CP. Na Figura 7(b), estão representados os resultados a que os autores chegaram passado 8 dias do início do ensaio (absorção secundária). Os valores apresentam-se idênticos aos da absorção inicial, levando assim à mesma conclusão: quanto maior é a utilização de ARG, maior será a taxa de absorção de água.

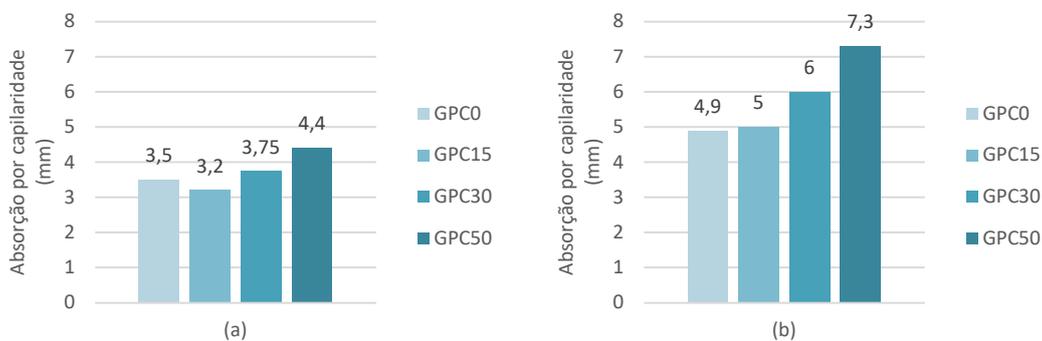


Figura 7 - Absorção de água por capilaridade: (a) primeiras 6 horas; (b) ao 8º dia (adaptado de Shaikh, 2016)

No estudo de Casanova et al. (2021) (investigação descrita anteriormente), onde os autores produziram argamassas activadas alcalinamente com AR na sua constituição (amassaduras na Tabela 4), eles procederam ao ensaio da absorção de água por capilaridade, chegando às mesmas conclusões: a utilização de AR ao invés de AN leva a um aumento da absorção de água. Os valores a que os autores chegaram para as argamassas produzidas com CVAA estão expressos na Figura 8. Esta tendência também é observada nas argamassas produzidas com CFRSU.

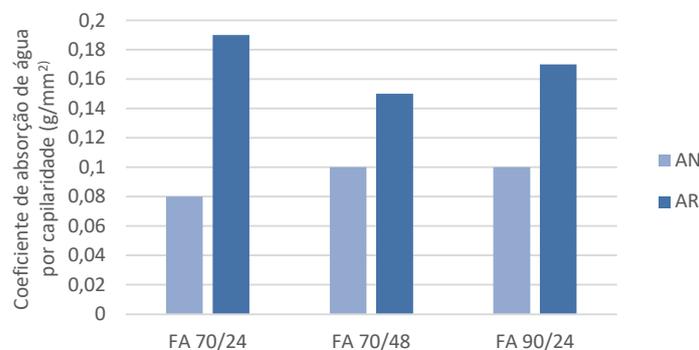


Figura 8 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al., 2021)

Nuaklong et al. (2018) produziram uma série de betões activados alcalinamente de forma a estudar as propriedades de betões produzidos a partir de substituições parciais de CV por metacaulino, realizando também a substituição total de ANG por ARG em metade das mesmas. Na série I, foi utilizado calcário natural como agregado grosso em quatro misturas, sendo elas 0MK-L, 10 MK-L, 20 MK-L, e 30 MK-L). Para a série II, quatro misturas semelhantes, 0MK-C, 10 MK-C, 20 MK-C, e 30 MK-C, foram preparadas com 100% AR, para obter oito misturas. O betão fresco foi colocado em moldes metálicos e, antes de serem curados num forno a 60 °C

durante 2 dias, foram mantidos à temperatura ambiente durante 1 hora (para permitir a secagem) e foram envolvidos com uma película plástica para evitar perdas de água por evaporação durante a cura térmica. Após este tempo de cura, os provetes foram desmoldados e colocados numa sala com temperatura controlada a 22-25 °C e 50-55% HR até ao dia de ensaio. Passados 7 dias, os provetes foram ensaiados à absorção de água por capilaridade. Para todas as misturas, os autores chegaram à conclusão de que, ao substituir por completo ANG por ARG, há um aumento de absorção de água. Os valores para o betão produzido com 100% CV variaram de  $38,2 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$  para  $67,8 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$  (aumento de 55%).

#### 2.5.4 Absorção de água por imersão

Shaikh (2016), na mesma investigação caracterizada anteriormente, ensaiou os provetes produzidos a fim de testar os mesmos quanto à sua absorção de água por imersão. Os resultados a que chegou foram consistentes com os obtidos no ensaio da absorção de água por capilaridade. Os betões produzidos com ARG apresentaram uma maior absorção de água do que o betão de controlo, produzido com ANG, e quanto maior a percentagem de substituição de ARG por ANG, maior essa absorção. Para a série GPC50, a absorção de água foi cerca de 20% maior do que a da série GPC0 (absorções de 5.9% e 4.9%, respectivamente). Estes resultados devem-se às propriedades dos ARG, em que a sua absorção de água é relativamente maior (4.9%) do que a dos ANG (0.5%). Estes valores, comparados com os valores de betões produzidos com CP e contendo 50% de ARG, da investigação realizada por Ahmed (2013), são muito mais baixos. Ahmed (2013) relatou uma absorção de água de cerca de 42% maior do que a do betão constituído com CP contendo 100% de ANG.

Huang et al. (2021) produziram 3 tipos de betão activado alcalinamente, onde utilizaram diferentes percentagens de ARF em substituição de ANF, sendo eles designados por RFA-0 (0% ARF), RFA-50 (50% ARF) e RFA-100 (100% ARF). Antes da produção do betão, todos os agregados foram pré molhados e saturados. A mistura foi feita numa sala onde as condições ambientais estavam controladas, com  $20 \pm 2$  °C. Após a mistura, os provetes foram moldados e, passado um dia, foram desmoldados e colocados numa câmara de cura à temperatura de  $20 \pm 2$  °C com uma HR de 95%. Após 7 dias submetidos às condições de cura descritas, os provetes foram ensaiados à absorção de água. Os autores concluíram que a absorção de água das amostras aumenta com o aumento da taxa de substituição de ARF e atinge um valor máximo de

7,80% quando se utiliza 100% de ARF, sendo que, para a mistura RFA-0, a absorção foi de 3,53%. Estes valores são explicados pelo facto de os ARF possuírem uma maior absorção de água comparado com os ANF, levando estes a absorverem um maior volume de água livre na mistura, proporcionando um aumento de porosidade ao betão.

Nuaklong et al. (2018) ensaiaram os seus provetes quanto à sua absorção de água e porosidade chegando à mesma tendência do que os autores anteriores. Ao incorporar AR, estas propriedades tendem a aumentar comparativamente a betões cujo agregado é AN. Para as duas misturas com 0% de metacaulino, quando se substituiu ANG por ARG, a porosidade aumentou de 14.3% para 23.8% e a absorção de água de 5.1% para 10.3%.

### **2.5.5 Penetração de cloretos**

O ataque químico às estruturas de betão é uma das principais razões da sua degradação. Um desses ataques é a entrada de iões de cloreto no betão que, posteriormente, reagem quimicamente com a armadura, causando corrosão. Isto leva ao destacamento do betão e ao fim prematuro do ciclo de vida da estrutura. A resistência à penetração dos iões cloretos no betão depende em grande parte da porosidade, da conectividade entre os poros e da capacidade das ligações químicas do cimento.

Shaikh (2016), na investigação anteriormente descrita, ensaiou os provetes quanto à sua resistência de penetração de cloretos chegando a resultados, aos 28 dias, de 11.1, 18.6, 21.1 e 25.5 mm para as misturas GPC0, GPC15, GPC30 e GPC50, respectivamente. Com a substituição parcial de ANG por ARG, o betão é mais susceptível à entrada dos iões cloretos. Para as séries GPC15, GPC30 e GPC50, há um aumento de 67%, 90% e 129% na profundidade de penetração do cloreto em relação à série de controlo. Esta diminuição da resistência foi antecipada pelo autor, dado que o ARG possui uma maior porosidade.

Parthiban & Mohan (2017) testaram a influência do AR nas propriedades do betão produzido a partir de escória activada alcalinamente. Produziram 6 tipos de betões diferentes onde um deles foi designado como a mistura de controlo não activada alcalinamente (OPC), produzida com AN e CP. Os cinco restantes eram constituídos por escória activada alcalinamente, com diferentes percentagens de substituição de ARG, sendo eles o AAS0 (0% ARG), o AAS25 (25%), o AAS50 (50%), o AAS75 (75%) e o AAS100 (100%). Todos os ARG foram pré-humedecidos e saturados

andes da mistura com o objectivo de reduzir o a absorção da água da amassadura. Todas as misturas foram produzidas e curadas à temperatura ambiente com um intervalo de temperatura de 26 a 30°C e uma HR de 55 a 71%. Os valores do coeficiente de difusão de cloretos para os diferentes níveis de substituição de AN por ARG estão representados na Figura 9. Verificou-se que, comparativamente à mistura de controlo activada alcalinamente sem AR, os valores do coeficiente de difusão de cloretos aumentaram com o aumento da percentagem de substituição de AN por AR.

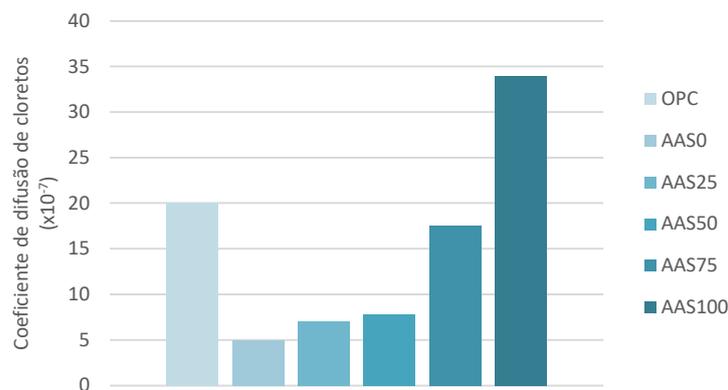


Figura 9 - Coeficiente de difusão do cloreto para as misturas testadas (adaptado de Parthiban & Mohan, 2017)

Nuaklong et al. (2018), na investigação descrita anteriormente, observaram a mesma tendência nos betões produzidos com CVAA com substituição de ANG por ARG. Os valores são apresentados na Figura 10. Em todos os dias de medição, a profundidade de penetração foi superior para as misturas com ARG comparativamente com os betões produzido com ANG.

### 2.5.6 Carbonatação

A durabilidade do betão é afectada pela resistência à carbonatação. Quando a frente de carbonatação atinge a profundidade das armaduras, ocorre o fenómeno de despassivação das mesmas, dando-se a destruição da película passiva, levando assim ao início do processo de corrosão. Da reacção do CO<sub>2</sub> com os compostos da pasta ligante resulta a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). A camada afectada por este fenómeno passa a ter uma alcalinidade menor do que aquela que não é afectada (quando o pH desce para valores inferiores a 10-11, ocorre a despassivação da armadura).

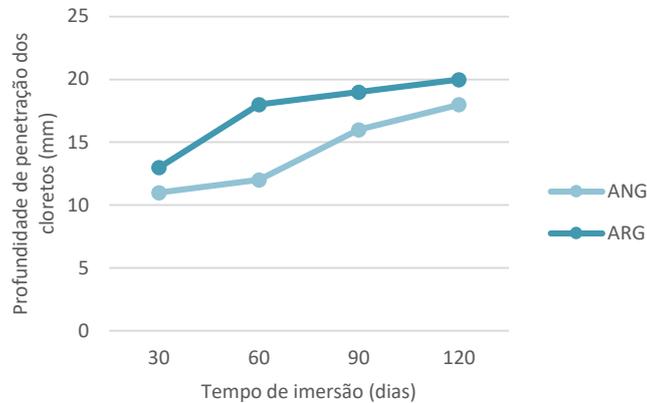


Figura 10 - Profundidade de penetração dos cloretos aos 30, 60, 90 e 120 dias nas misturas com CVAA (adaptado de Nuaklong et al., 2018)

Casanova et al. (2021) testaram os seus provetes perante esta propriedade e chegaram a resultados inconclusivos relativamente à profundidade de penetração visto que, quando comparados os resultados com a amostra de referência, os produzidos com AR apresentavam-se completamente carbonatados. Devido à grande porosidade dos AR, a difusão do  $\text{CO}_2$  para dentro da matriz da argamassa vai ser maior, aumentando assim a profundidade penetrada. No entanto, esta migração de  $\text{CO}_2$  para dentro da matriz das argamassas e dos betões não traz apenas vantagens. Quando este entra, vai ocorrer a sua dissolução em ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que leva à decomposição de certos elementos, como por exemplo compostos à base de metais alcalinos, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), silicatos e aluminatos presentes na matriz. No caso dos compostos à base de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ocorre uma descalcificação (Morandeu et al., 2014). Os iões  $\text{Ca}^{2+}$ , tendem a migrar e precipitar sob a forma de  $\text{CaCO}_3$  em espaços intersticiais adjacentes, aumentando assim a densidade da matriz, o que resulta num melhor desempenho mecânico. Casanova et al. (2021) observaram este melhoramento na resistência à compressão. Até aos 28 dias, todos os provetes foram sujeitos ao mesmo ambiente de cura e, após esse período, foram expostos a um ambiente rico em  $\text{CO}_2$  durante 28 dias e 91 dias. Para as argamassas produzidas com AN, quando comparadas com os espécimes expostos a 28 dias de cura normal numa câmara ambiental, a resistência das misturas FA-NA 70/24, 70/48 e 90/24 aumentou de 37 MPa para 59 MPa, de 46MPa para 69 MPa e de 37 MPa para 60 MPa, respectivamente. No entanto, para as misturas produzidas com AR, embora também se esperasse um ganho de resistência com a carbonatação da matriz, tal não ocorreu, sendo todas as compressões abaixo de 20 MPa,

antes e após a carbonatação. Isto pode ser explicado pela provável inexistência de  $\text{Ca(OH)}_2$  na argamassa aderente do AR, que teria sido quase totalmente carbonatada antes da sua utilização. Os resultados encontram-se na Figura 4.

## 2.6 Propriedades de betões activados alcalinamente com cinzas volantes

Nesta secção, apresenta-se um levantamento de várias investigações onde foram estudadas as mesmas propriedades descritas anteriormente, mas para betões activados alcalinamente com CV. Devido à existência de poucos estudos acerca de betão com este tipo de ligante, foram também descritos alguns estudos acerca de argamassas com a mesma constituição.

### 2.6.1 Resistência à compressão

Shi et al. (2012), ao investigarem as propriedades mecânicas de betões com CVAA e AR, produziram três amassaduras totalmente constituídas com CP e três com CVAA. Na Tabela 2, apresentada na secção anterior, encontram-se as famílias produzidas bem como os resultados das resistências à compressão. Ao comparar os valores, nota-se um melhor desempenho dos betões que apresentam CVAA em relação aos que possuem CP. Aos 28 dias, para 0% de substituição de AN por AR, é notado um aumento de 41,7% quando utilizadas CVAA, ao invés de CP. À medida que as idades aumentam, há um aumento mais rápido da resistência nos betões com CP em relação aos com CVAA. Isto acontece porque as reações de polimerização são altamente dependentes da temperatura. A temperatura elevada acelerou a polimerização entre as CV e a SA. Após a remoção do betão do forno, houve um decréscimo da temperatura, fazendo com que a reacção de polimerização se tornasse mais lenta diminuindo assim a evolução da resistência.

Atiş et al. (2015) investigaram a influência da concentração do AA e a cura térmica sobre a resistência à compressão de argamassas produzidas com CVAA. Para tal, produziram um conjunto variado de argamassas com diferentes constituições. Foram utilizados rácios de agregado/ligante e de a/l sempre constante, igual a 3 e 1/3, respectivamente. O AA utilizado foi o NaOH e a sua concentração foi diferente para as diferentes misturas, começado com uma concentração de 4%, tendo um incremento constante de 2% até atingir 20%. Em termos de cura térmica, todos os provetes foram sujeitos a oito diferentes temperaturas durante três durações de tempo. As temperaturas foram alteradas de 45 °C para 115 °C, com um incremento constante

de 10 °C, sendo as durações de 24, 48 e 72 h. Os autores, ao analisarem os resultados, chegaram à conclusão de que, à medida que a concentração do AA aumenta na mistura, a resistência à compressão aumenta até a um ponto óptimo que também depende da temperatura de cura térmica. O mesmo acontece quando se aumenta a temperatura. A resistência à compressão aumenta à medida que a temperatura de cura térmica aumenta até a um ponto óptimo que também depende da concentração de AA. Outra conclusão a que os autores chegaram foi que, para uma baixa temperatura de cura térmica, um período de 72 h pode ser suficiente para atingir bons resultados de resistência à compressão, mas, para uma relativamente alta temperatura de cura térmica, 24 h podem ser suficientes. Na Tabela 5, encontram-se os valores de compressão para 24 h de cura térmica bem como o ponto óptimo a que os autores chegaram (para os outros períodos de cura as resistências foram menores).

Tabela 5 - Resistência à compressão das argamassas às 24 h de cura térmica (MPa)  
(adaptado de Atiş et al., 2015)

		Na/Ligante (%)								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temperatura °C	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	55	1.6	5.5	7.3	8.4	8.6	3	3	1.2	0
	65	3.6	10.6	17.8	22.6	22.8	10.6	6.5	6.5	4.5
	75	10.5	13.3	21.3	28.7	29.7	34.3	32.7	18.7	10.7
	85	13.2	14.1	23.3	34.9	36.5	38.8	35.8	34.5	30.3
	95	17.3	27.7	28.4	32	42.6	70.6	61.5	51	43.6
	105	12.6	15.4	17.6	41	56.2	113	112.2	110.7	104.3
	115	0	0	0	61.4	73	120	110.5	106.1	88.9

Casanova et al. (2021) estudaram a influência da temperatura de cura nas propriedades de argamassas produzidas com CVAA (condições de cura presentes na Tabela 4). Os valores relativos à resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias encontram-se representados na Figura 11. Os autores concluíram que os valores óptimos, em relação ao tempo de cura e à temperatura a utilizar, ocorreram 70 °C e 48 h. Concluíram também que, para os valores óptimos aos primeiros dias de ensaio, a resistência da mistura foi maior do que a da argamassa de controlo (efeito justificado por Shi et al. (2012), na investigação descrita anteriormente).

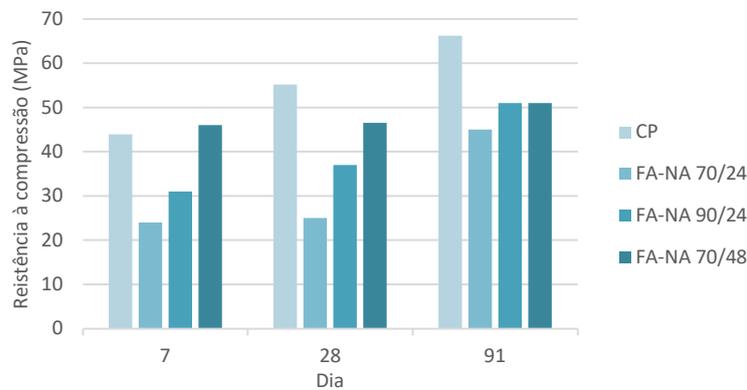


Figura 11 - Resistência à compressão das argamassas com CVAA (adaptado de Casanova et al, 2021)

### 2.6.2 Retracção

Fernandez-Jimenez et al. (2006) testaram quatro composições distintas na sua investigação, duas delas com CP e as restantes com CVAA. Foram utilizados dois tipos de SA: a solução N (8 mol de NaOH) e a solução W (mistura que continha 85% de uma solução de 12.5 mol de NaOH e 15% de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). A utilização de soluções alcalinas distintas foi feita a fim de encontrar uma relação entre o AA e a retracção. Em relação à cura realizada, os provetes produzidos com CP foram submetidos a duas condições. Após a mistura, permaneceram no molde durante 20 horas, a 20 °C ou 40 °C, enquanto as CVAA, no mesmo período, foram submetidas a 85 °C e, após desmoldagem, mantidas nas condições ambientes do laboratório, 21 °C e 50% HR. A Figura 12 apresenta os resultados da retracção. Os autores concluíram que o baixo valor de retracção a que chegaram nas famílias de CVAA (< 0.025%) comparativamente ao chegado nos provetes produzidos com CP (0.09% aos 70 dias) pode ser explicado pelas características microestruturais das CV, em que o principal produto produzido na fase inicial da polimerização é o gel N-A-S-H cujas propriedades não são afectadas pela perda de água incorporada durante o seu sintetismo.

Casanova et al. (2021) testaram as suas argamassas produzidas com CVAA (Tabela 4) à retracção (resultados na Figura 6). O provete FA-NA 70/24 foi considerado o material mais estável, tendo uma menor variação no tempo (cerca de 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  após 91 dias). Os provetes FA-NA 70/48 e 90/24 mostraram um desempenho pior, obtendo retracções equivalentes às esperadas para argamassas produzidas com CP, por volta de 500-600  $\mu\text{m}/\text{m}$  (Gonçalves et al., 2019).

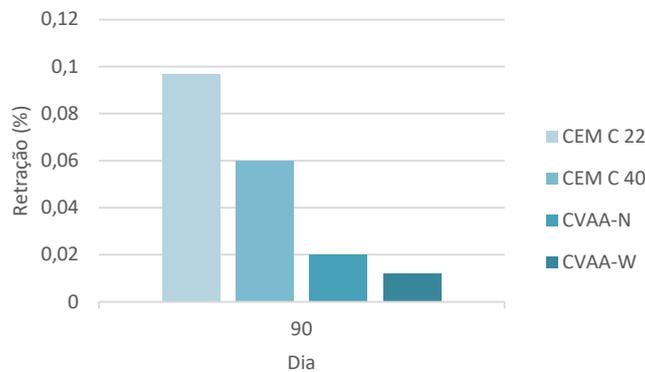


Figura 12 - Retracção para betões com CP e com CVAA aos 90 dias (adaptada de Fernandez-Jimenez et al., 2006)

Thomas et al. (2017) avaliaram a melhoria da estabilidade dimensional, através do envelhecimento ou da cura térmica, de betões produzidos com CVAA. Para tal, produziram quatro betões distintos, onde um deles era constituído por CP (PC1) e os restantes por CV (FC1, FC2 e FC3) com diferentes percentagens de  $\text{Na}_2\text{O}$  (4%, 5% e 6%, respectivamente). Após a produção, parte dos provetes foi deixada em condições de teste normais, ou seja, curados à temperatura ambiente, enquanto a outra parte dos provetes foi submetida a uma cura térmica, sendo estes desmoldados passadas 48 h. Todos eles foram então submetidos a ensaios de retracção. Os autores concluíram que, em geral, os betões AA foram menos estáveis (chegando a atingir  $1000 \mu\text{m}$ ) do que o betão produzido com o CP (em condições normais) em tempos precoces. No entanto, a estabilidade volumétrica dos provetes submetidos à cura térmica melhorou, levando a uma diminuição da retracção em 75% (sendo a retracção do betão com CP igual a  $550 \mu\text{m}$  e a do betão FC2 igual a  $200 \mu\text{m}$ ). Esta melhoria deve-se à redução na porosidade do betão. A fraca estabilidade precoce dos BAA resulta principalmente de um atraso na formação e no desenvolvimento da sua microestrutura que, com a cura térmica, é acelerada.

Ruengsillapanun et al. (2021) fizeram ensaios de retracção a 12 provetes produzidos com CVAA, ensaios estes que foram divididos em retracção e retracção autogénea. Na produção dos betões, foram utilizadas diferentes concentrações de NaOH e diferentes rácios de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  de modo a comparar os efeitos destes na retracção do betão. Os provetes foram também expostos a diferentes temperaturas, sendo que o provete NS03M6 (rácio de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  igual a 0,3 e concentração de NaOH igual a 6 M) foi o exposto à maior delas. Os provetes referentes à retracção autogénea foram, depois de desmoldados, envolvidos com

três camadas de película aderente e duas camadas de película de alumínio para proteger a água de evaporar. Todos os provetes foram mantidos a uma temperatura de controlo de  $23 \pm 4$  °C com 50% HR. Os resultados estão representados na Figura 13. Estes mostram que as concentrações mais elevadas de NaOH resultaram numa menor retracção do betão produzido com CVAA. Um comportamento semelhante foi relatado em pesquisas anteriores (Chindaprasirt, 2014), onde foi sugerido que a sílica gel no betão faz com que este expanda e, no final, tenha uma menor retracção. Também se nota que, quanto maior a temperatura de cura dos betões, menor será a retracção do mesmo; o provete NS03M6, sujeito à maior temperatura, foi o que retraiu menos. Outra conclusão que é retirada dos resultados foi que, em comparação com a retracção normal, a autogénea é menor para todas as misturas ensaiadas (para o NS03M6, houve uma redução de 27,3%).

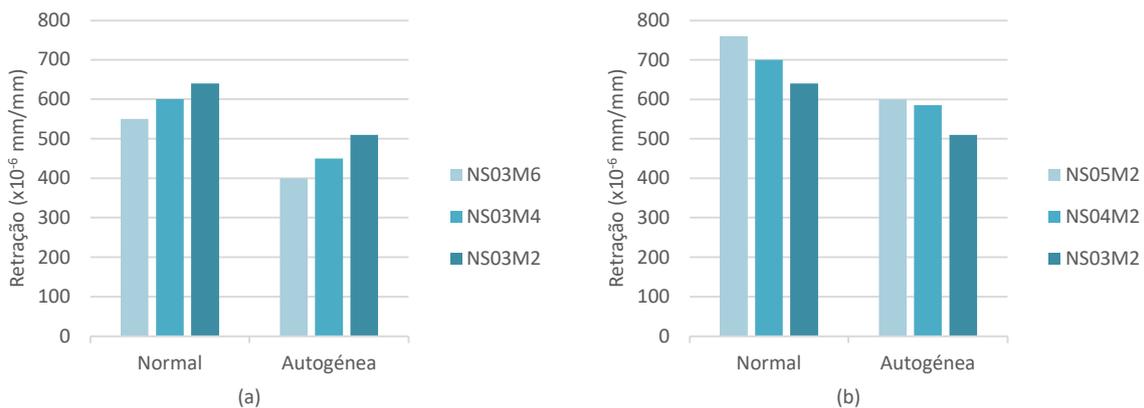


Figura 13 - Retracção, normal e autogénea, para betões com CVAA: (a) diferentes concentrações de NaOH; (b) diferentes rácios de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH (adaptado de Ruengsilapanun et al., 2021)

### 2.6.3 Absorção de água por capilaridade

Olivia & Nikraz (2008) produziram, na sua investigação, 9 misturas com composições distintas, a fim de avaliar algumas propriedades do betão, sendo uma dessas a absorção de água por capilaridade. Produziram então 8 misturas distintas onde a mistura GP1 possuía um rácio água/sólido (a/s) de 0.23, um rácio agregado/sólido (agr./s) de 3.9 e um rácio solução alcalina/cinza volante (SA/CV) de 0.35. As restantes misturas (GP2-GP8) foram produzidas alterando os rácios atrás mencionados. A composição de todas as misturas encontra-se descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição das misturas produzidas (adaptado de Olivia & Nikraz, 2008)

Mistura	a/s	Agr./s	SA/CV	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )								
				Água	Agregado grosso (mm)			Areia	Cinzas volantes	NaOH (14M)	SS	SP
					7	10	20					
GP1	0,23	3,90	0,35	25,8	647	554	-	647	408	41	103	6,1
GP2	0,22	3,90	0,35	20,7	647	554	-	647	408	41	103	6,1
GP3	0,20	3,90	0,35	16,5	647	554	-	647	408	41	103	6,1
GP4	0,22	3,50	0,35	25,8	630	540	-	630	444	44	111	6,1
GP5	0,24	4,70	0,35	25,8	672	576	-	672	356	36	89	6,1
GP6	0,23	3,90	0,30	25,8	647	554	-	647	424	36	91	6,1
GP7	0,23	3,90	0,45	25,8	647	554	-	647	381	49	122	6,1
GP8	0,23	3,90	0,35	25,8	645	370	277	554	408	41	103	6,1
GP9	0,23	3,90	0,35	25,8	-	924	370	554	408	41	103	6,1

As misturas foram expostas a 60 °C durante 24 horas e após as condições de cura iniciais, permaneceram num ambiente controlado a uma temperatura de 23-25 °C. Procedendo ao ensaio da absorção de água e após reunir todos os dados, chegaram a percentagens de água absorvida e alguns desses valores estão representados na Figura 14, valores considerados baixos (de acordo com a Vic Road's standard specification). Este nível baixo de absorção é um bom indicador de baixa porosidade no betão, que pode vir a inibir o fluxo de água para o mesmo. Chegaram assim à conclusão de que a absorção de água diminui quando o rácio a/l diminui, quando aumenta o rácio agr./l e quando aumenta a proporção SA/CV.

Visto que o número de vazios influencia fortemente a absorção de água por capilaridade, é possível prever tendências através da porosidade do provete. Zhu et al. (2014) produziram, durante a sua investigação, argamassas constituídas por CVAA com diferentes rácios de a/s, rácios esses compreendidos entre 0.6 e 0.8 (rácio em massa, sendo de 0,41-0,32 em termos de H<sub>2</sub>O/total sólido). Como mistura de controlo, produziram uma amassadura com CP. Todas as argamassas activadas alcalinamente estiveram sujeitas a três ambientes de cura. Durante 1 dia, foram curados a 20 °C seguida por 2 dias de cura selada a 65 °C. Após a cura térmica, foram colocados de novo a 20 °C até ao dia de ensaio. Chegaram então a valores de porosidade entre 8.1% e 10.1% para as argamassas produzidas com rácios de a/s iguais a 0.6 e 0.8, respectivamente. Estes valores não são muito diferentes do da argamassa de controlo que foi de 9.8%. Pode-se concluir que argamassas, e possivelmente betões, activados alcalinamente com CV possuem uma absorção semelhante à dos produzidos com CP.

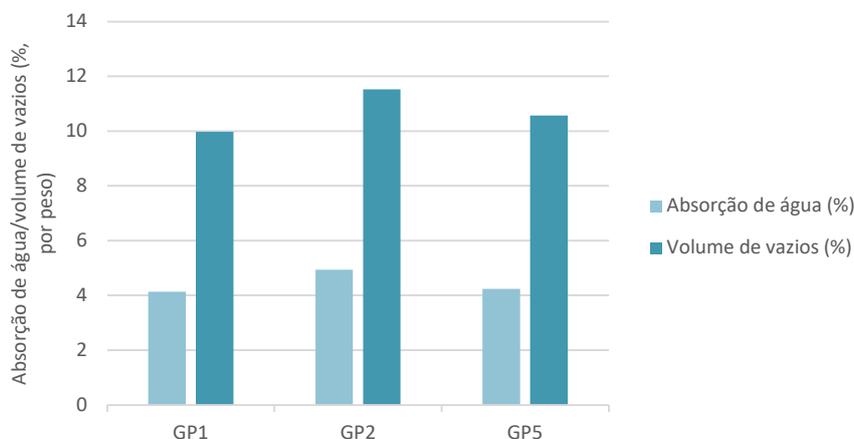


Figura 14 - Absorção de água e volume de vazios (adoptado de Olivia & Nikraz, 2008)

#### 2.6.4 Absorção de água por imersão

Chi & Huang (2013) estudaram a absorção de água por imersão em 11 tipos de argamassas contendo composições diferentes, duas das quais compostas por CVAA (mistura MA4 e MA6). Todas as restantes misturas foram produzidas com CVAA, mas parte dela foi substituída por escória. Foi também produzida uma mistura de controlo com CP. Após o término da mistura, os provetes foram mantidos durante 24 h dentro de moldes metálicos. Foram posteriormente desmoldados e colocados numa sala de cura contendo 80% de HR à temperatura de 25 °C. Os autores chegaram a um valor percentual de absorção de água por imersão igual a 6.1% na mistura MA4 e de 4.6% na mistura MA6. Visto que a grande diferença na constituição destas duas argamassas era a concentração de Na<sub>2</sub>O (4% e 6% do peso do material cimentício), concluiu-se que, quanto maior a sua concentração, menor será a absorção de água pelo provete. Isto deve-se à formação de uma maior quantidade do gel N-A-S-(H). Quando utilizados 6% de Na<sub>2</sub>O, ocorre um maior número de reações, levando assim à criação de uma matriz menos porosa. Este efeito leva a uma menor absorção. Comparativamente à mistura produzida com CP, que obteve uma absorção igual a 7.5%, as misturas com CVAA têm uma menor absorção.

Assi et al. (2018) produziram vários tipos de betões constituídos por CVAA e também analisaram a absorção de água por imersão. Os materiais utilizados no fabrico dos mesmos incluíram CV (Classe F), AA (solução de sílica de fumo e solução de hidróxido de sódio misturada em água), agregados finos e grossos e ainda um superplastificante (SP). Com o objectivo de compreender o efeito da origem e da granulometria das CV, estas foram adquiridas de duas fontes diferentes e

foram utilizados tamanhos de partículas variados, levando a diferentes valores percentuais de absorção de água. A Tabela 7 sumariza, para além dos resultados, os constituintes e as suas propriedades. Os autores concluíram que a origem das CV tem influência na absorção de água por imersão e que, quanto menor a granulometria das mesmas, menor será esta propriedade. Quanto maior a sua finura, maior vai ser a sua superfície específica, fazendo com que tenha uma maior reactividade deixando o material menos poroso. Os resultados desta investigação levam também a concluir que, quanto maior a porosidade, maior será a absorção de água.

Tabela 7 - Constituintes dos betões produzidos e as suas propriedades (adaptado de Assi et al., 2018)

Tipo	AA	Origem CV	Absorção de água por imersão (%)	Volume porosidade (%)
Wateree (42.3 $\mu\text{m}$ )	Sílica fumo	Estação Wateree	7.10	16.6
McMeekin (38.8 $\mu\text{m}$ )	Sílica fumo	Belews Creek	7.70	17.0
McMeekin (17.9 $\mu\text{m}$ )	Silicato de sódio	Estação Wateree	6.10	16.4
McMeekin (4,78 $\mu\text{m}$ )	Silicato de sódio	Belews Creek	6.01	13.3

No estudo levado a cabo por Zhu et al. (2014), descrito anteriormente, os autores, para além de estudarem a porosidade do material, estudaram também a sua absorção de água. Os valores são apresentados na Figura 15. É de notar que, com a diminuição do rácio a/s, há uma melhoria da estrutura microscópica do provete, menor porosidade, levando a uma menor absorção de água. Em comparação com os valores das argamassas de CP, há uma maior absorção, mas sem muitas diferenças (como esperado pelos valores da porosidade).

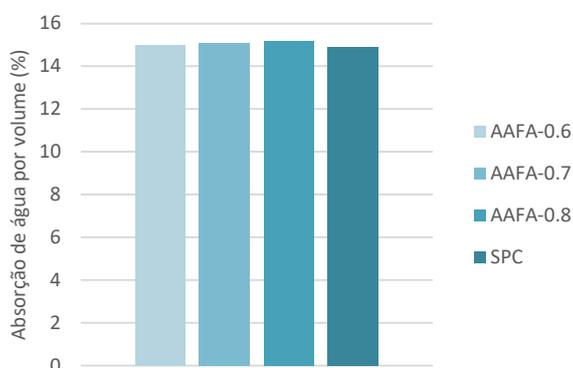


Figura 15 - Resultados da absorção de água (adoptado de Zhu et al., 2014)

### 2.6.5 Penetração de cloretos

Zhu et al. (2014) testaram também a penetração de cloretos nas suas amassaduras. O estudo demonstrou que as argamassas produzidas com CVAA têm uma taxa de penetração de Cl mais elevada do que as produzidas com CP, mas não apresentam uma diferença muito significativa. A taxa de penetração depende da porosidade do provete e esta é influenciada pelo rácio a/s, como descrito.

Chindaprasirt & Chalee (2014) investigaram esta propriedade em misturas produzidas com CVAA, utilizando  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  como AA, e variando as quantidades de NaOH. Essas quantidades foram de 8, 10, 12, 14, 16 e 18 mol/L, mantendo sempre constante o rácio molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Chegaram à conclusão de que, quanto maior for a concentração de NaOH na mistura alcalina, menor irá ser a penetração de cloretos. Zhuang et al. (2016) explicaram este efeito dizendo que a concentração relativamente elevada de NaOH permite a dissolução de uma maior quantidade de iões de silício ( $\text{Si}^{4+}$ ) e de alumínio (Al) das CV, fazendo com que haja um melhor grau de polimerização, o que resulta numa diminuição na porosidade da mistura produzida.

Ismail et al. (2013) testaram esta propriedade em argamassas e betões produzidos com CVAA. Foram produzidas 6 famílias de argamassas onde uma delas era constituída por 100% CV e outra delas produzida com 100% CP. Ao realizarem o teste de penetração de cloretos, chegaram a valores do coeficiente de difusão dos cloretos  $> 60 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  para os produzidos com CP e  $> 80 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  para os produzidos com CVAA.

### 2.6.6 Carbonatação

Pasupathy et al. (2018) testaram a profundidade de carbonatação em betões produzidos com CVAA, tendo como referência um betão produzido com CP. Na composição do betão com CVAA, foi utilizada uma solução de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2$ ) e uma solução de NaOH (8 M) como AA. Para uma melhor trabalhabilidade do betão no estado fresco, foi ainda utilizado um SP. Depois da produção, o betão com CVAA foi submetido a três condições de cura distintas: nas primeiras 24 horas, os provetes foram mantidos a uma temperatura de 60 °C; depois de desmoldados, foram colocados, durante 28 dias, em condições de temperatura ambiente (23 °C); passados 28 dias, foram submetidos a uma carbonatação acelerada, onde foram colocados dentro de uma câmara de carbonatação a 23 °C, com 65% de HR e 1% de  $\text{CO}_2$ . Após estes dias de cura, procedeu-se à realização do método da fenolftaleína para medir a profundidade de

carbonatação, em que, ao borrifar o provete, a zona que não está carbonatada apresenta uma cor rosa. A Figura 16 apresenta a frente de carbonatação dos dois provetes produzidos e, ao comparar os dois tipos de betão, é notável a discrepância. O betão de CP apresenta apenas uma pequena zona carbonatada enquanto o betão com CVAA apresenta uma carbonatação de cerca de 90%.

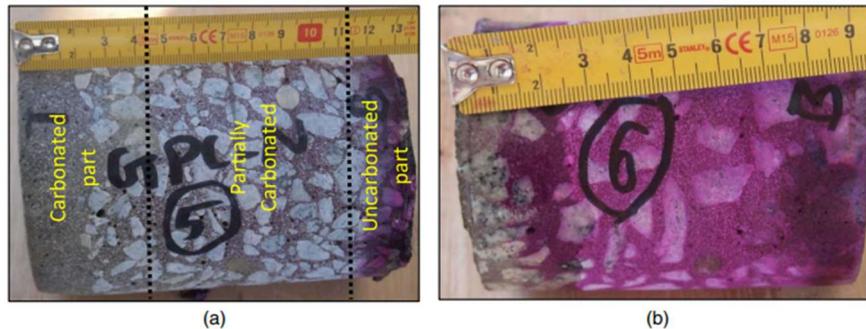


Figura 16 - Carbonatação medida através do método da fenolftaleína: (a) betão com CVAA; (b) betão com CP

Liu et al. (2021) produziram argamassas activadas alcalinamente à base de CV e escória, de modo a entender o efeito que a cura por carbonatação tem sobre a resistência à compressão das mesmas. Para isso, fizeram várias amassaduras, variando o AA das mesmas. Os ensaios de resistência à compressão foram determinados através da média dos resultados de 3 provetes cúbicos (50 x 50 x 50 mm), aos dias 7, 14, 28 e 56. Para testar os cubos após carbonatação, estes foram submetidos a uma cura em câmara de CO<sub>2</sub> e ensaiados aos 28 dias. Para a mistura M1 (Figura 17), onde a SA era formulada através da mistura de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> e NaOH, os valores da compressão após 28 dias em câmara de CO<sub>2</sub> foram muito satisfatórios, sendo superiores aos medidos antes (aumento de 14.7%).

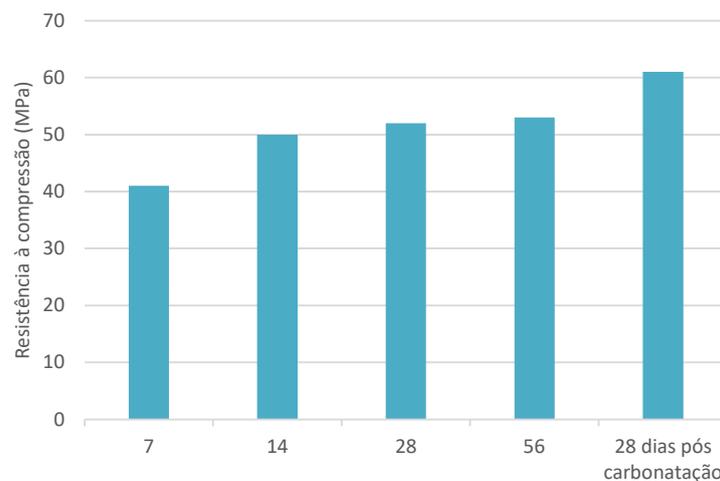


Figura 17 - Resistência à compressão para as misturas produzidas (adaptado de Liu et al., 2021)

Casanova et al. (2021) chegaram a resultados equivalentes. Ao comparar os provetes expostos a 28 dias de cura normal com aqueles expostos à cura em câmara de CO<sub>2</sub>, a resistência, nestes últimos, aumentou cerca de 20 MPa para a mistura FA-NA 70/24 e 90/24. No entanto, por razões desconhecidas, isto não foi observado para FA-NA 70/48, que apresentou uma redução de resistência após 28 dias, apesar de ter apresentado quase 70 MPa após 91 dias (a argamassa de controlo apresentou uma resistência à compressão de 91 dias de 69,2 MPa). Todas as misturas carbonatadas com 112 dias apresentaram um ganho de resistência entre 18% e 36% quando comparadas com as não carbonatadas de 91 dias.

## **2.7 Propriedades de betões activados alcalinamente com cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos**

Nesta secção, são apresentados estudos acerca das propriedades de betões activados alcalinamente com CFRSU. Visto este ser um estudo muito recente e inovador, existe um leque muito reduzido de investigações sobre o mesmo. Apenas foram encontradas investigações acerca de argamassas produzidas a partir de CFAA às seguintes propriedades: resistência à compressão (pré e pós carbonatação), retracção, retracção autógena, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

### **2.7.1 Resistência à compressão**

Casanova et al. (2021) testaram 12 famílias de argamassas na sua investigação, sendo que seis delas continham CFAA. As restantes continham CVAA como ligante. Para as argamassas produzidas com CFAA, foi necessário um tempo de mistura prolongado para potenciar a oxidação do alumínio metálico (15 minutos de mistura + 45 minutos de descanso antes de moldar). Na Tabela 4, apresenta-se todas as famílias produzidas bem como as respectivas condições de cura. Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, os autores seguiram a norma EN 1015-11 (2011), cujos resultados são apresentados na Figura 18. Nota-se que o material produzido com CFAA tem um desempenho muito pior do que as restantes, havendo uma queda de 59,7 MPa aos 28 dias, comparando a argamassa com melhor desempenho (CP) com a BA-NA 90/24 (melhor desempenho dentro das argamassas com CFAA). O reduzido desempenho deste material é justificado pela grande porosidade em combinação com a baixa reactividade das CFRSU.

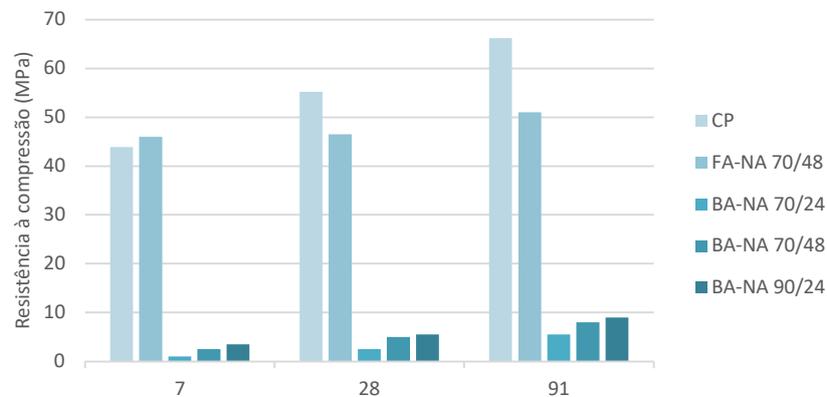


Figura 18 - Resistência à compressão das argamassas com CP, CVAA com melhor desempenho e CFAA (adaptado de Casanova et al., 2021)

Avila et al. (2022) produziram várias famílias de argamassas activadas alcalinamente onde a viabilidade da composição do precursor foi avaliada com base numa substituição de 0% (0.0 M), 25% (0.25 M), 50% (0.5 M), 75% (0.75 M) e 100% (1.0 M) de CFRSU pré-tratada por CV. As amassaduras foram ainda divididas em dois grupos, aquelas cujo activador era constante (AAC) e aquelas cujo activador era o óptimo para a composição definida (AAO). Em todas as produções, foi utilizado um rácio ligante/agregado igual a 0.33 e um rácio a/l de 0.4 (quantidade total de água que corresponde à da solução de silicato de sódio e da água adicionada). Os provetes, depois de moldados, permaneceram por um período de 24 h em condições ambientais, cobertos por uma película plástica, e foram posteriormente colocados no forno a 80 °C durante 24 h. Após este período, as amostras foram seladas com uma película plástica até ao dia do teste. Os valores da resistência à compressão são apresentados na Figura 19. Os resultados mostram que, com o aumento de CFAA na constituição das argamassas, há um decréscimo de resistência à compressão, como foi observado na investigação anterior.

## 2.7.2 Retracção

Casanova et al. (2021), na investigação descrita na subsecção anterior, procederam ao ensaio de retracção a fim de entender o comportamento das argamassas produzidas com CFAA. Os resultados encontram-se na Figura 20. Os autores concluíram que, embora fosse esperada uma maior retracção por parte das argamassas produzidas com CFRSU, devido ao menor conteúdo de fases amorfas e à formação do gás H<sub>2</sub>, a maioria delas mostrou um desempenho equivalente ao das misturas produzidas com CV. As argamassas BA-NA 70/24 e 70/48 mostraram uma

expansão considerável nos primeiros 3 e 5 dias de cura começando a retrair depois. Os autores explicam que esta expansão pode ter sido provocada pela formação de  $H_2$  a partir da reacção do Al metálico, que não ocorreu totalmente durante o processo de cura térmica. No entanto, como esta tendência não foi observada nas restantes misturas produzidas com CFRSU, concluíram que são necessários testes adicionais para justificar esta hipótese.

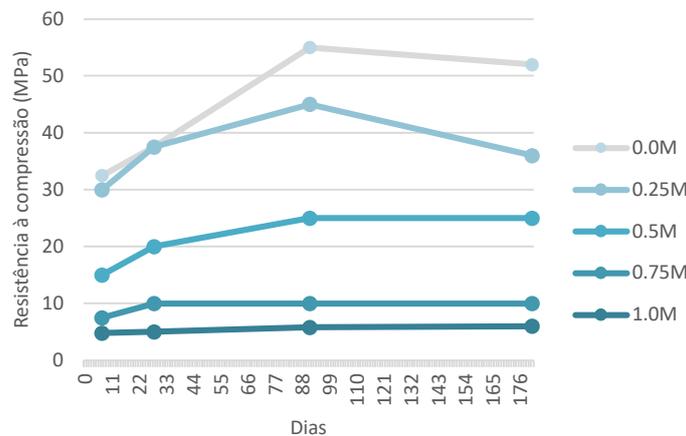


Figura 19 - Resistência à compressão das argamassas com AAC, pré e pós carbonatação (adaptado de Avila et al., 2022)

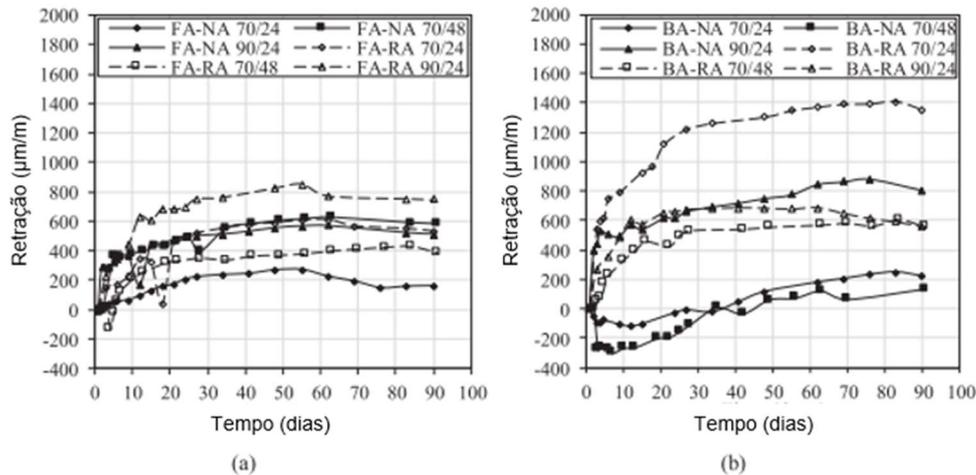


Figura 20 - Retracção de: (a) argamassas com CV; (b) argamassas com CFRSU (adaptado de Casanova et al., 2021)

Avila et al. (2022) procederam também à realização do ensaio da retracção na investigação citada anteriormente. Para tal, ensaiaram as argamassas produzidas com o AA constante e as medições foram feitas tanto em argamassas seladas como em argamassas não seladas, com o

objectivo de avaliar não só a retracção normal como a autogénea. A retracção, em ambos os casos, aumentou com o aumento do conteúdo de CFRSU. Para as argamassas produzidas com teores de CFRSU superiores a 50%, as curvas apresentam-se muito próximas umas das outras, enquanto as produzidas com 75% ou 100% de CV têm um comportamento diferente. Os autores concluíram que, para percentagens de CFRSU superiores a 50%, o pré-tratamento pode não ter sido inteiramente eficaz, deixando um remanescente de partículas de alumínio não reagidas, podendo ter reagido posteriormente, aumentando a porosidade dos provetes. Para além disso, todas as argamassas passaram por uma cura térmica de 24 h, o que acelera a evaporação durante a fase de presa, podendo levar à formação de microfissuras, possibilitando uma grande retracção. Quanto à retracção autogénea, quando medida em amostras seladas produzidas com CP, é geralmente inferior à das amostras não seladas, devido à maior perda de água destas últimas. No entanto, os autores observaram o contrário na sua investigação, explicando o ocorrido pela existência da fase de cura térmica, que reduz significativamente o teor de água dos provetes. Visto que a retracção ocorre devido à perda de água do provete (com o aumento de tensões de tracção) e que os provetes de retracção autogénea não estabelecem trocas de água com o exterior, tendo o provete uma quantidade muito baixa de água, a retracção vai ocorrer devido as reações internas da matriz da argamassa, onde ocorreu um grande consumo de água interno. Os resultados a que os autores chegaram encontram-se representados na Figura 21.

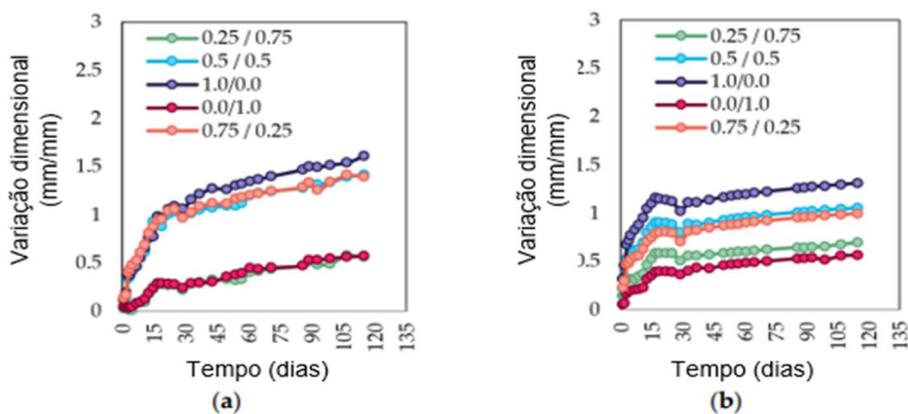


Figura 21 - Resultados da retracção das argamassas com AAC: (a) retracção; (b) retracção autogénea (adaptado de Avila et al., 2022)

### 2.7.3 Absorção de água por capilaridade

Avila et al. (2022) realizaram o ensaio de absorção de água por capilaridade apenas nas misturas

produzidas com o AAC, a fim de eliminar qualquer influência dos rácios  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}/l$  variáveis. Na Figura 22, apresenta-se os coeficientes obtidos para a primeira fase do ensaio (medições entre 10 e 90 min) e aqueles referentes à segunda fase (entre 90 e 4320 min). Os resultados foram de certa forma idênticos aos anteriores para outras propriedades, sugerindo, uma vez mais, que as argamassas com percentagens de CFRSU iguais ou superiores a 50% são mais porosas e, portanto, mais susceptíveis ao movimento da água.

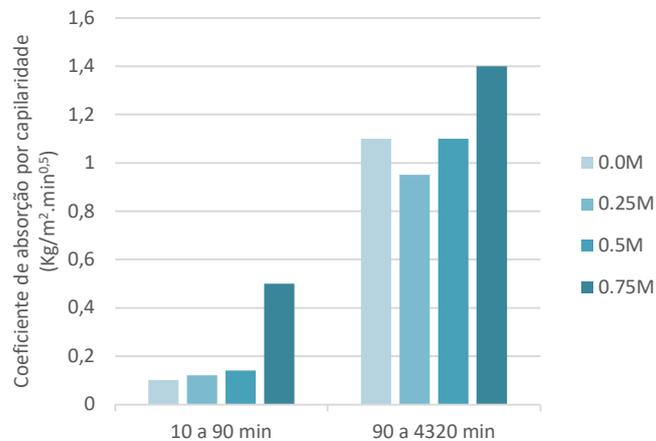


Figura 22 - Absorção por capilaridade das argamassas com AAC (adaptado de Avila et al., 2022)

Os resultados do ensaio indicam ainda que, para o ligante rico em  $\text{Ca}^{2+}$  (CFRSU) e para o ligante pobre em  $\text{Ca}^{2+}$  (CV), o  $\text{Na}^+$  dissolve-se e lixivia para o exterior dos provetes quando a água entra nos poros capilares, indicando assim que uma determinada quantidade de álcalis não se encontra fisicamente ligada dentro da matriz.

Casanova et al. (2021) também identificaram uma maior porosidade nas argamassas produzidas com CFAA. Como referido, quanto maior a porosidade de um material, maior o transporte de fluidos para dentro da matriz. Dessa forma, visto que as argamassas com CFRSU possuem maior porosidade do que as restantes misturas, é esperada uma maior absorção de água por parte delas.

#### 2.7.4 Absorção de água por imersão

Avila et al. (2022) procederam ao ensaio de absorção de água por imersão nos provetes produzidos com AAC, devido às mesmas razões mencionadas na secção anterior. Os valores percentuais para a absorção foram de 13.4% (0.0M), 13.1% (0.25M) e 14.8% (0.5M). Semelhante às propriedades

atrás descritas, a absorção de água por imersão aumentou com o aumento da percentagem de CFRSU presente na mistura, apesar de apresentar um valor idêntico para as misturas 0.0 M e 0.25 M. Para as misturas de 0.75 M e 1.0 M, não foi possível obter resultados, uma vez que as amostras se partiram devido à perda excessiva de massa 24 h após terem sido submersas.

A mesma explicação, relativamente à porosidade das argamassas observada por Casanova et al. (2021), pode ser referida aqui. Quanto maior a porosidade, maior será a absorção de água, fazendo com que as argamassas produzidas com CFAA tenham, teoricamente, uma maior absorção de água.

### 2.7.5 Carbonatação

Casanova et al. (2021) testaram as suas argamassas para averiguar a permeabilidade à penetração de CO<sub>2</sub> obtendo resultados inconclusivos visto que, quando procederam ao teste da fenolf-taleína, os provetes já se encontravam totalmente carbonatados. No entanto, testaram os provetes carbonatados à compressão. Foi possível observar uma notável melhoria do desempenho dos mesmos. Os autores explicam que esta melhoria se dá devido à descalcificação das fases cálcicas e consequente precipitação de CaCO<sub>3</sub>, bem como da carbonatação de Na<sup>+</sup> em carbonatos de sódio, ambos aumentando o grau de polimerização dos géis Si-O-Si e Si-O-Al, aumentando significativamente a resistência do material. Os resultados, comparativamente aos observados aos 28 dias sem carbonatação, encontram-se na Figura 23.

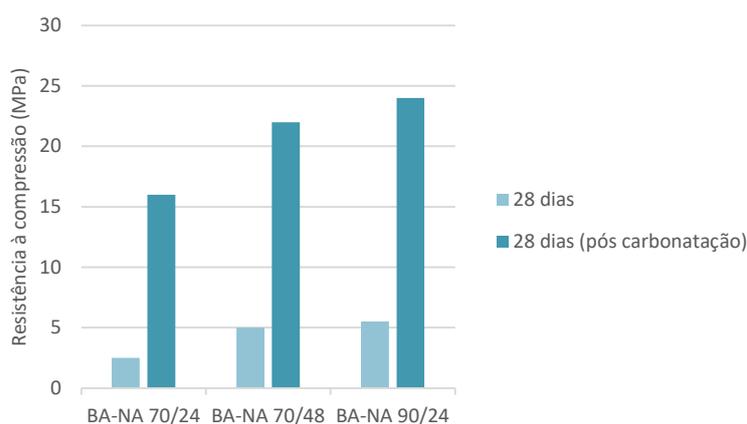


Figura 23 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com CFAA, pré e pós carbonatação (Casanova et al., 2021)

Avila et al. (2022) observaram, de igual modo, a inexistência de coloração após o teste da fenolf-taleína (mostrando assim uma total carbonatação dos provetes) e o incremento de resistência à

compressão após serem sujeitos a uma cura em câmara de CO<sub>2</sub>. Os valores encontram-se apresentados na Figura 24. Os autores concluíram que a carbonatação melhorou substancialmente as propriedades mecânicas das argamassas activadas alcalinamente, especialmente naquelas com maiores conteúdos de CFRSU, uma vez que é um precursor com um elevado teor de cálcio.

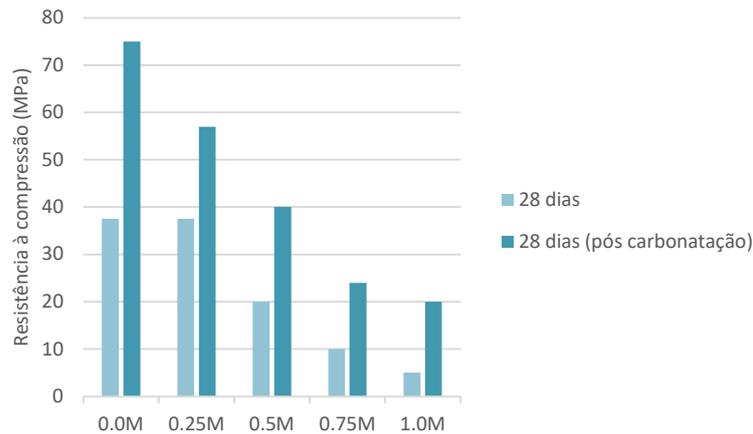


Figura 24 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas produzidas, pré e pós carbonatação (Avila et al., 2022)

### 3 Campanha experimental

Nesta secção, começa-se por definir as diferentes fases do plano experimental, assim como todos os materiais constituintes dos diferentes betões produzidos, as suas composições e o método utilizado para a produção dos mesmos. Seguidamente, define-se o método de preparação dos provetes e as condições de cura a eles impostas. Por último, são identificados e descritos os ensaios realizados, tanto aos agregados, naturais e reciclados, como ao betão no estado fresco e endurecido.

#### 3.1 Plano experimental

A presente campanha experimental foi dividida em três fases distintas visando um correcto planeamento da mesma.

A primeira fase tem como objectivo a caracterização dos constituintes utilizados na produção dos betões. Para tal, foi realizada uma análise granulométrica e ainda ensaios de massa volúmica, absorção de água e baridade aos AN e AR. Aos AR, foi ainda realizado um ensaio de caracterização.

A segunda fase corresponde aos ensaios efectuados ao betão no estado fresco, onde foram realizados os ensaios de consistência e massa volúmica do betão, antes de este ganhar presa e endurecer. Na terceira fase, foram efectuados os ensaios ao betão no estado endurecido, sendo que, nesta investigação, se avaliou o betão em termos mecânicos e de durabilidade. Recorreu-se assim à realização dos seguintes ensaios: resistência à compressão (antes e pós carbonatação), absorção de água por capilaridade e imersão, penetração de cloretos, carbonatação, retracção e retracção autogénea.

Durante as fases descritas no parágrafo anterior, devido a resultados não esperados (tempos de presa muito curtos, impossibilitando a moldagem do betão), foi necessária uma intervenção para resolver esse problema. Para tal, foram produzidas várias argamassas contendo na sua constituição borato de sódio (bórax), um adjuvante retardador de presa, com o objectivo de achar a melhor dosagem a ser utilizada nos betões a fim de obter um melhor desempenho na sua trabalhabilidade.

Durante as betonagens, outro problema surgiu, levando uma vez mais à necessidade de resolução do mesmo. Todas as betonagens foram divididas em duas, cada uma perfazendo 60 litros de betão. No entanto, mesmo com a utilização do retardador de presa (bórax), o betão produzido na segunda betonagem apresentava um endurecimento muito rápido. Foi notado que, da primeira para a segunda betonagem, uma película ficava aderida às paredes da betoneira proveniente da solução de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Esta poderia ser prejudicial ao desempenho do betão a seguir produzido. Foi então adoptada uma técnica de limpeza com um desengordurante e uma pistola de pressão de água em todas as amassaduras realizadas, após a primeira betonagem.

## 3.2 Materiais

Usualmente, o betão é um material constituído por agregados, água e ligante. A este, podem ainda ser acrescentadas adições e adjuvantes para fins distintos. Neste estudo, foram utilizados diferentes tipos de agregados, tanto naturais como reciclados, e diferentes tipos de ligantes, tais como cimento, CV e CFRSU. Para a activação alcalina, foram ainda utilizados hidróxido de sódio e silicato de sódio. Como adjuvantes, foram usados um superplastificante e um retardador de presa.

### 3.2.1 Água

Toda a água utilizada para a produção do betão é proveniente da rede pública. A quantidade necessária tem em conta a relação  $a/l$ , que foi de 0,5 para o betão produzido com cimento. Para

o betão activado alcalinamente, o total de água corresponde à proveniente da solução de silicato de sódio bem como à água adicional vinda da rede pública de modo a obter o total correspondente da relação a/l.

### **3.2.2 Agregados naturais**

Foram utilizadas duas granulometrias de areia de natureza siliciosa como agregado natural fino. A areia fina apresenta uma dimensão de partículas entre 0 e 2 mm e a areia grossa uma dimensão que varia de 0 a 4 mm. Os agregados naturais grossos de natureza calcária utilizados nesta investigação, designados por “Bago de Arroz”, “Brita 1” e “Brita 2”, apresentam uma granulometria de 1 a 6,3 mm, de 9,5 a 19 mm e de 19 a 25 mm, respectivamente.

### **3.2.3 Agregados reciclados**

Nesta investigação, foram utilizados AR provenientes da empresa de Vimajas. Foram utilizadas dez fracções granulométricas de agregado reciclado, cinco delas correspondentes aos agregados finos, de 0-0,25 mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm e de 2-4 mm, obtidas através de uma inicial moagem, auxiliada pela máquina de Los Angeles, e posterior peneiração. As cinco restantes fracções, correspondentes ao agregado grosso, foram obtidas através da peneiração, sendo estas de 4-5,6 mm, 5,6-8 mm, 8-11,2 mm, 11,2-16 mm e 16-22,4 mm.

### **3.2.4 Cimento**

O cimento utilizado na produção de betão foi o CEM I 42,5R, oriundo da empresa “Secil”.

### **3.2.5 Cinza volante**

Provenientes de Sines, cedidas pela empresa “EDP”, as cinzas volantes que foram utilizadas durante a investigação são da classe F de pozolanicidade, devido à soma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ser superior a 70%. Esta classificação foi feita segundo a norma ASTM C618 (2019) que identifica os requisitos químicos necessários para as cinzas volantes serem utilizadas em betão.

### 3.2.6 Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos

As CFRSU utilizadas foram tratadas na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (CTRSU) e cedidas pela empresa “Valorsul”. Na CTRSU, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são incinerados e desta incineração resultam vários produtos, sendo um deles as CFRSU. Estas cinzas são inertizadas e colocadas em aterro ou encaminhadas para a instalação de tratamento e valorização de escória (ITVE) para serem sujeitas a um processo de valorização.

### 3.2.7 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (ou soda cáustica) utilizado na produção do AA foi fornecido pela empresa “Crimolara”. Tem uma pureza > 99% e apresenta-se no estado sólido em forma de pérolas.

### 3.2.8 Silicato de sódio

Para a mistura do AA, também foi utilizada uma solução aquosa alcalina de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), proveniente da empresa “Crimolara”. Na presente investigação, foi utilizado um rácio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  igual a 0,5.

### 3.2.9 Adjuvantes

Para atingir a trabalhabilidade necessária, foi utilizado Sikaplast-717, um redutor de água cedido pela empresa “Sika Portugal” e produzido através de uma combinação de dispersantes orgânicos sintéticos de naftaleno em base aquosa.

Devido à presa rápida que o betão apresentava, foi utilizado borato de sódio (ou bórax) como retardador de presa. Este adjuvante foi comprado à empresa “Crimolara” e apresenta, na sua constituição,  $\text{B}_2\text{O}_3$  (36,47-38,50%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (16,24-17,14%),  $\text{SO}_4$  (máx 135 ppm), Cl (máx 70 ppm) e ainda Fe (máx 10 ppm).

## 3.3 Composição dos betões

Para se poder determinar a composição dos vários betões que foram produzidos durante a investigação, foi utilizado o método das curvas de referência de Faury e foram seguidas as recomendações da norma NP EN 206:2013+ A1 (2017).

Foram adoptados os seguintes pressupostos para o betão de referência:

- **classe de resistência:** C30/37;
- **classe de exposição ambiental:** XC3 + XS1;
- **classe de consistência:** S5;
- **máxima dimensão dos agregados:** 22,4 mm.

### 3.3.1 Curva de referência de Faury

A compactidade do betão é influenciada directamente pela sua composição granulométrica, assim como as suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Na presente investigação, foi utilizada a curva de referência de Faury para determinar as quantidades ponderadas dos agregados a utilizar na produção de cada betão.

A curva de referência de Faury é constituída por dois segmentos de recta, formados a partir de três pontos, representados num diagrama, no qual o eixo das abcissas se refere às dimensões das aberturas das malhas dos peneiros e o eixo das ordenadas à percentagem de material que passa pelas mesmas. No eixo das abcissas, os valores variam entre 0,0065 mm, valor que corresponde à menor dimensão das partículas, e 22,4 mm ( $D_{máx}$ ), valores que nas ordenadas correspondem a 0% e 100% da percentagem de material passado.

O ponto intermédio da curva de referência de Faury é definido pelo valor  $D_{máx}/2$ , no eixo das abcissas, e pelo valor  $Y_{D/2}$ , no eixo das ordenadas, obtido através da Equação 5:

$$Y_{D/2} = A + 17^5 \sqrt{D_{máx}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{máx}} - 0,75} \quad \text{Equação 5}$$

Na equação, os valores dos parâmetros A e B, que dependem tanto da natureza dos agregados como da trabalhabilidade do betão, são sugeridos por Faury e podem ser consultados na Tabela 8.

Estando os três pontos definidos, é possível completar o traçado da curva de referência de Faury que, sabendo-se a percentagem de cimento em relação ao volume sólido total, permite também determinar a curva de referência de Faury sem cimento. Na Figura 25, apresenta-se as curvas de referência de Faury que foram utilizadas para a produção do betão durante a presente investigação, considerando e ignorando as partículas de cimento.

Tabela 8 - Valores de A e B sugeridos por Faury

Trabalhabilidade	Meios de compactação possíveis de empregar	Valores de A			Valores de B
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia e agregado grosso britado	
Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado				
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Sem nada	32	34	38	2

Com o valor de A e B determinados, o ponto intermédio define-se por:

$$X = \frac{D_{m\acute{a}x}}{2} = 11,2 \text{ mm} \quad \text{Equação 6}$$

$$Y D/2 = 30 + 17\sqrt[5]{22,4} + \frac{2}{1-0,75} \quad \text{Equação 7}$$

Utilizou-se o método da intersecção das curvas granulométricas dos agregados com a curva de referência de Faury para se calcular as percentagens e quantidades de agregados finos e grossos. Para isso, é necessário ajustar a curva granulométrica dos agregados tanto quanto possível à curva de referência de Faury, processo feito analiticamente via Excel com a menor soma dos quadrados das diferenças.

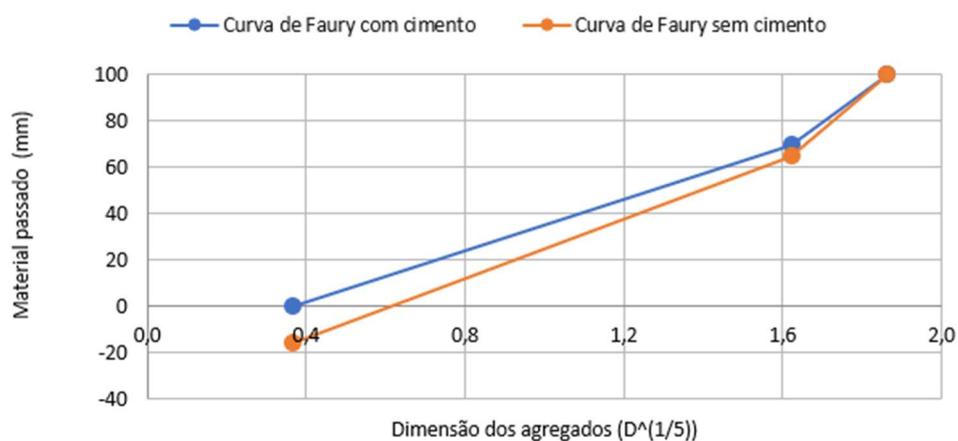


Figura 25 - Curvas de referência de Faury

### 3.3.2 Composição dos betões

Para a presente investigação, foram produzidos dez betões com composições diferentes, cinco com agregados naturais e os restantes com agregado reciclado. Em oito destes, foi substituído o CP, na íntegra, por CV e CFRSU. Todas as misturas produzidas estão representadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Misturas realizadas no presente estudo

Mistura	Composição (kg/m <sup>3</sup> )			Agregado
	Ligante			
	CEM (CP)	CV	CFRSU	
100CEM:AN	300	-	-	Natural
100CV:AN	-	300	-	
75CV/25CF:AN	-	225	75	
50CV/50CF:AN	-	150	150	
25CV/75CF:AN	-	75	225	
100CEM:AR	300	-	-	Reciclado
100CV:AR	-	300	-	
75CV/25CF:AR	-	225	75	
50CV/50CF:AR	-	150	150	
25CV/75CF:AR	-	75	225	

### 3.4 Produção

Para a produção dos diferentes betões, ao longo da campanha experimental, foram utilizados dois métodos de produção distintos, um para os betões produzidos a partir de CEM e outro para os betões produzidos com CV e CFRSU. Esta diferença deve-se à necessidade de utilização de um AA no segundo método, que é preparado previamente, antes do processo de betonagem.

#### 3.4.1 Betões produzidos com CEM

Para estes betões, o método de produção consistia em:

- depois do processo de humedificação da betoneira, adicionou-se os agregados grossos, juntamente com 2/3 da quantidade de água necessária prevista para a betonagem completa;
- ao fim de 4 minutos, acrescentou-se os agregados finos a esta mistura;
- passados 2 minutos, introduziu-se o cimento e, depois, 1/3 de água remanescente;
- deixou-se homogeneizar a mistura durante mais 4 minutos, completando 10 minutos.

### 3.4.2 Betões produzidos com CV e CFRSU

Relativamente a estes betões, o processo de produção é diferente ao anterior, visto que o ligante utilizado é activado alcalinamente. Para isso, foi necessário realizar uma mistura, ainda antes de se proceder à betonagem. Esta mistura diferia dos betões produzidos apenas com CV para os betões produzidos com CV e CFRSU devido à necessidade de um pré-tratamento das CFRSU.

Assim, para os betões produzidos apenas com CV:

- misturou-se, momentos antes de se iniciar a betonagem, o total de água a utilizar para a mistura, com o hidróxido de sódio até se atingir uma solução homogénea.

Para os betões produzidos com CV e CFRSU:

- misturou-se, 24 horas antes de se realizar a betonagem, o total de água a utilizar na mistura, o hidróxido de sódio e as CFRSU. É necessário realizar este pré-tratamento 24 horas antes da betonagem, devido ao fenómeno de expansão que advém da reacção entre a água, o alumínio presente nas CFRSU e o NaOH que, ao reagirem, produzem  $H_2$ , o que pode ser prejudicial para o betão, aumentando a sua porosidade. Juntou-se também, a esta mistura, 1% do adjuvante como surfactante para ajudar a homogeneizar a mistura dada a propriedade hidrofóbica das CFRSU.

Com as misturas preparadas, o método de produção para ambos os betões consistia em:

- depois do processo de humidificação da betoneira e estando a mistura anterior realizada, esta colocou-se na betoneira juntamente com as CV, a solução de silicato de sódio e os adjuvantes;
- ao fim de 5 minutos, acrescentou-se à mistura os agregados finos e grossos;
- deixou-se homogeneizar a mistura durante 4 a 5 minutos.

### 3.5 Preparação dos provetes e condições de cura

Após a produção das amassaduras, estas foram colocadas em moldes que, após 24 horas, são desmoldados apresentando as dimensões necessárias respectivas a cada um dos ensaios a realizar. Na presente investigação foram produzidos 16 provetes para cada um dos betões previstos. Todos eles encontram-se na Tabela 10, assim como os respectivos ensaios e dimensões.

Tabela 10 - Ensaio realizados na presente investigação e respectivas dimensões dos provetes

Ensaio	Idade en- saio (dias)	Largura provete (cm)	Altura pro- vete (cm)	Volume pro- vete (l)	Número de provetes	Volume total (l)
Cloretos	28	10	20	1,6	1	1,6
Retracção	1 a 91		50	5,0	2	10
Retracção autogé- nea	1 a 91		50	5,0	2	10
Absorção de água por capilaridade	28		50	5,0	2	10
Absorção de água por imersão	28		10	1,0	3	3
Compressão pós carbonatação em câmara de CO <sub>2</sub>	28		10	1,0	3	3
Carbonatação em câmara de CO <sub>2</sub>	7		20	1,6	1	1,6
	14					
	28					

O procedimento para a preparação dos provetes foi o seguinte:

- em primeiro lugar, montou-se e limpou-se os moldes (com o auxílio de uma escova de aço ou uma catrabucha), seguida da aplicação do óleo descofrante
- introduziu-se a amassadura nos moldes;
- utilizando a agulha vibratória, iniciou-se o processo de vibração respectivo a cada um dos moldes;
- regularizou-se a superfície exposta ao ar, com o auxílio de uma colher de pedreiro;
- nas 24 horas seguintes, os provetes produzidos com cimento foram deixados à temperatura ambiente com uma capa de plástico por cima (para evitar evaporação de água e contaminação do betão), enquanto os provetes com ligantes activados alcalinamente foram colocados num forno e submetidos a uma temperatura de  $70 \pm 2$  °C;
- os provetes foram descofrados e mantidos na câmara seca (20 °C e 55% HR) até à data de ensaio.

Para os provetes submetidos ao ensaio da carbonatação, as condições de cura mudam aos 28 dias de câmara seca, conforme a norma. Estes foram colocados dentro de uma câmara de carbonatação onde ficaram expostos a uma temperatura de  $23 \pm 3$  °C, a uma humidade relativa entre 55 e 65% e uma concentração de CO<sub>2</sub> de  $5,0 \pm 0,1$ %.

### 3.6 Ensaios realizados aos agregados

#### 3.6.1 Análise granulométrica

Este ensaio tem como objectivo quantificar a distribuição das partículas nas diferentes fracções granulométricas, permitindo fazer a caracterização geométrica das partículas dos agregados a fim de elaborar a sua curva granulométrica, a qual é utilizada para a determinação das quantidades de cada agregado no betão. Foi seguida a norma NP EN 933-1 (2000) e a norma NP EN 933-2 (1999) na realização do ensaio. A análise granulométrica foi apenas feita para os AN visto que, na presente campanha experimental, os AR foram peneirados e separados pelas diferentes fracções geométricas, não sendo preciso recorrer às curvas granulométricas. Para a realização do ensaio, é necessário recolher uma amostra que requer uma massa mínima de acordo com a máxima dimensão do agregado; estes valores encontram-se listados na respectiva norma bem como todo o equipamento a utilizar.

O procedimento de ensaio foi:

- recolheu-se a amostra respeitando a massa mínima definida pela norma;
- secou-se a amostra numa estufa ventilada durante 48 horas;
- procedeu-se à lavagem do provete de ensaio sobre o peneiro de 0,063 mm e secou-se posteriormente numa estufa até massa constante;
- pesou-se o provete, registando o valor como  $M_1$ ;
- montaram-se os peneiros, de acordo com a série normalizada pretendida e a dimensão máxima do agregado a ensaiar;
- colocou-se a amostra no topo da coluna dos peneiros e depois foi agitada durante 90 segundos;
- desligou-se o agitador e foram retirados os peneiros de cima do mesmo; de seguida, retirou-se os peneiros um por um de cima para baixo;
- pesou-se a massa retida em cada peneiro e foi registado o valor como  $R_i$ ;
- pesou-se a massa do material retido no fundo e registou-se como  $P$ ;
- verificou-se se a soma da massa do material retido e do material no fundo dos peneiros teve uma variação superior a 1,0%. Em caso afirmativo, deve repetir-se o processo de peneiração.

A percentagem retida em cada peneiro foi determinada recorrendo à Equação 8:

$$Ri(\%) = \frac{Ri}{M_1} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 8}$$

$Ri(\%)$  - percentagem de material retido no peneiro  $i$  (%);

$Ri$  - massa retida no peneiro  $i$  (g);

$M_1$  - massa total da amostra seca (g).

Com os cálculos terminados e todas as percentagens obtidas, foi permitido efectuar o traçado da curva granulométrica.

### 3.6.2 Massa volúmica e absorção de água

Para o cálculo da massa volúmica e da absorção de água dos agregados, foi utilizado o método do picnómetro seguindo a norma NP EN 1097-6 (2003). Este ensaio permite a obtenção de três massas volúmicas distintas (massa volúmica do material impermeável das partículas, massa volúmica das partículas secas em estufa e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca), que vão influenciar directamente a massa volúmica do betão. Através deste ensaio, também se obtém a quantidade de água absorvida pelos agregados, que é importante para conseguir compensar a absorção de água durante o período de amassadura. Para este ensaio, os agregados foram separados em fracções: para os AN, o ensaio fez-se à areia fina, à areia grossa, ao Bago de Arroz, à Brita 1 e à Brita 2 e, para o AR, separou-se as amostras em fracções de 0,063-4 mm e 4-22,4 mm. Os valores em massa da amostra a ensaiar estão estipulados pela norma bem como todo o equipamento a utilizar.

Este ensaio apresenta algumas diferenças no modo de procedimento para agregados grossos e agregados finos. Para os agregados grossos, de dimensão entre 4-22,4 mm, o procedimento foi o seguinte:

- foi obtida a amostra a analisar tendo o cuidado de respeitar a massa mínima exigida; na composição da amostra, a proporção de cada intervalo granulométrico foi mantida igual à proporção do mesmo intervalo em relação ao volume total de sólidos no betão;
- a amostra foi totalmente imersa num picnómetro com água a  $22 \pm 3$  °C;
- agitou-se e inclinou-se o picnómetro de modo a libertar o ar ocluído e deixou-se a amostra repousar durante  $24 \pm 0,5$  horas;

- após as 24 horas, encheu-se o picnómetro até este transbordar;
- secou-se o exterior do picnómetro e procedeu-se à sua pesagem, registando a massa como  $M_2$ , e mediu-se a temperatura da água;
- retirou-se os agregados do interior do picnómetro e deixou-se a escorrer durante alguns minutos;
- voltou a encher-se o picnómetro com água e este foi pesado, registando a massa como  $M_3$  (foi necessário confirmar que a variação da temperatura da água nas pesagens de  $M_2$  e  $M_3$  é inferior a  $2\text{ }^\circ\text{C}$ );
- secou-se a superfície das partículas da amostra com um pano absorvente;
- pesou-se a amostra saturada com a superfície seca e foi registada a sua massa como  $M_1$ ;
- o provete foi seco em estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  até que a variação da massa entre leituras intervaladas de 24 h fosse inferior a 1% (massa constante);
- a amostra seca em estufa foi pesada e registada a sua massa como  $M_4$ .

Para agregados finos, de dimensão entre 0,063-4mm, o procedimento foi:

- repetiu-se os primeiros 5 passos do procedimento relativo aos agregados grossos, de dimensão entre 4-22,4 mm;
- decantou-se a maioria da água que cobria o provete e esvaziou-se o picnómetro sobre um tabuleiro;
- encheu-se de novo o picnómetro com água e foi colocada a tampa no mesmo. Seguidamente, secou-se o picnómetro por fora e foi pesado ( $M_3$ ) (foi de novo analisando se a variação da mesma excedia  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , desde a medição anterior);
- de maneira a permitir a evaporação da humidade superficial dos agregados, estes foram dispostos num tabuleiro e secados superficialmente com um secador de ar quente. Para que as partículas não aderissem umas às outras e para eliminar a humidade superficial, os agregados foram remexidos diversas vezes;
- o provete saturado com superfície seca foi colocado num tabuleiro de forma a efectuar-se a pesagem do provete ( $M_1$ );
- por fim, secou-se o agregado em estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  até se obter massa constante e registar como  $M_4$ .

Deste modo, calculou-se as massas volúmicas e a absorção de água (em percentagem da massa seca), através das Equações 9 a 12.

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad \text{Equação 9}$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad \text{Equação 10}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad \text{Equação 11}$$

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{Equação 12}$$

$\rho_a$  - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm<sup>3</sup>);

$\rho_{rd}$  - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm<sup>3</sup>);

$\rho_{ssd}$  - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm<sup>3</sup>);

$WA_{24}$  - massa volúmica da água (%).

### 3.6.3 Baridade

A baridade dos agregados, também conhecida por massa volúmica aparente, consiste na massa por unidade de volume aparente de um determinado conjunto de agregados e é uma característica importante visto que influencia a capacidade resistente do betão. Neste ensaio, foi utilizada a norma NP EN 1097-3 (2003).

O procedimento de ensaio foi:

- após a amostra ter sido seca em estufa até ter atingido massa constante, retirou-se a amostra e deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente;
- pesou-se o recipiente metálico e registou-se a sua massa ( $M_A$ );
- encheu-se o recipiente de agregados até transbordar;
- alisou-se o topo do recipiente, removendo o excesso de agregados, e pesou-se o conjunto; registou-se a sua massa ( $M_B$ ).

Completando estes procedimentos, a baridade dos agregados foi determinada através da Equação 13:

$$\rho_b = \frac{M_B - M_A}{V} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{Equação 13}$$

$V$  - volume do recipiente metálico ( $\text{dm}^3$ );

$M_A$  - massa do recipiente metálico vazio (kg);

$M_B$  - massa do recipiente cheio com agregados (kg).

### **3.6.4 Caracterização agregado reciclado**

Foi utilizada a norma BS EN 933-11 (2009) para a realização deste ensaio. Esta norma descreve um método simples para a análise de agregados reciclados grossos com o objectivo de identificar e estimar as proporções relativas dos materiais constituintes. O teste consiste na separação manual de partículas de uma porção de teste de agregado reciclado grosso numa lista de constituintes. A proporção de cada constituinte na porção de teste é então determinada e expressa como uma percentagem.

### **3.7 Ensaio ao betão no estado fresco**

Esta secção tem como objectivo apresentar todos os ensaios e relativos procedimentos realizados ao betão no estado fresco. Foram então executados dois ensaios sendo eles o ensaio do abaixamento do cone de Abrams e o ensaio da medição da massa volúmica. Os ensaios ao betão no estado fresco são importantes visto que dão a possibilidade de fazer uma previsão não só do desempenho dos diferentes betões no estado endurecido como da facilidade de colocação do betão nos moldes, adequando a fluidez à aplicação pretendida.

#### **3.7.1 Ensaio do abaixamento do cone de Abrams**

Este ensaio foi realizado com o objectivo de controlar a consistência e a fluidez do betão no estado fresco. Neste teste, o betão fresco é colocado dentro de um molde metálico, aberto nas duas extremidades, em forma de cone. Após retirar o molde, vai ocorrer o assentamento na massa de betão, fornecendo uma medida da consistência do betão. A norma seguida para a realização deste ensaio foi a NP EN 12350-2 (2002).

O procedimento de ensaio foi:

- humedeceu-se todo o equipamento a utilizar;
- colocou-se a placa onde decorre o ensaio num local plano e bem nivelado horizontalmente;
- colocou-se o molde por cima da placa, pressionando-o com os pés contra a mesma, de

modo a evitar o vazamento do betão;

- encheu-se 1/3 do molde com betão, com ajuda de um funil, procedendo-se depois à realização de 25 pancadas com a vareta metálica (pancadas realizadas na periferia do molde, progredindo gradualmente para o centro);
- encheu-se mais 1/3 do molde e repetiu-se o processo (25 pancadas com a vareta);
- finalizou-se o enchimento do último terço, repetindo o processo anterior;
- nivelou-se a abertura superior do cone, usando uma espátula;
- removeu-se o molde metálico com um movimento gradual e vertical, evitando movimentos horizontais e bruscos, permitindo o escorregamento do betão das paredes do molde;
- mediu-se e registou-se o abaixamento determinando a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do provete que assentou.

### 3.7.2 Massa volúmica

A norma seguida para o ensaio da massa volúmica foi a norma NP EN 12350-6 (2002), tendo esta como objectivo verificar a influência dos constituintes na massa volúmica dos diferentes betões.

Se o betão apresentar, no seu estado fresco, uma menor massa volúmica, utilizando a mesma quantidade de ligantes e agregados, tal significa que este apresenta um maior número de vazios e de água na sua composição, afectando assim directamente a sua resistência e durabilidade no estado endurecido.

O procedimento de ensaio foi:

- pesou-se o recipiente metálico e registou-se a sua massa como  $M_1$ ;
- encheu-se o recipiente com a amostra de betão após o término da amassadura;
- procedeu-se a uma cuidada vibração, tendo especial cuidado com o tempo mínimo necessário para atingir a completa compactação do betão;
- a superfície foi nivelada com o auxílio da espátula;
- limpou-se e secou-se o exterior do recipiente;
- o molde foi pesado cheio e registou-se a sua massa como  $M_2$ .

Através da Equação 14, o resultado do ensaio foi obtido.

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Equação 14

$D$  - massa volúmica do betão em estado fresco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$V$  - volume do recipiente ( $\text{m}^3$ ).

### 3.8 Ensaios do betão no estado endurecido

#### 3.8.1 Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado tendo como objectivo determinar a capacidade resistente dos diferentes betões sob tensões uniformes de compressão, antes e após terem permanecido em câmara de  $\text{CO}_2$  e foi seguida a norma NP EN 12390-3 (2011). Para tal, foram utilizados 3 provetes cúbicos com 150 mm de aresta, ensaiados aos 7, 28 e 91 dias após betonagem (submetidos a uma cura em câmara seca), e 3 com 100 mm de aresta, que foram submetidos a uma cura de 28 dias em câmara seca mais 28 dias em câmara de  $\text{CO}_2$ , apresentando esta uma humidade relativa entre 55 e 65% e uma concentração de  $\text{CO}_2$  de  $5,0 \pm 0,1\%$ .

Os provetes foram ensaiados numa prensa onde foram centrados relativamente ao prato inferior com a superfície de enchimento virada para fora, sem contactar com as superfícies da prensa.

A resistência à compressão foi obtida através da Equação 15:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Equação 15}$$

$f_c$  - resistência à compressão do provete (MPa);

$F$  - carga máxima (N);

$A_c$  - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada ( $\text{mm}^2$ ).

#### 3.8.2 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio permite avaliar a capacidade de o betão absorver líquidos por ascensão através dos vasos capilares. Esta propriedade é medida pela diferença entre a massa do provete de betão endurecido, que esteve com uma das faces em contacto com a água, durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água. O presente ensaio foi realizado segundo a especificação LNEC E-393 (1993).

O procedimento de ensaio foi:

- após 14 dias de cura em câmara seca, os 2 provetes de dimensões 10×10×50 cm foram cortados ao meio, com o auxílio de uma serra de disco eléctrica, para cumprir os pressupostos da especificação ficando estes com dimensões de 10×10×25 cm;
- foram de novo colocados em câmara seca por mais 14 dias;
- passados 14 dias, perfazendo 28 dias de cura totais, os provetes foram pesados registando-se como  $M_0$ ;
- colocou-se no fundo de um tabuleiro os suportes destinados a manter a face inferior do provete em contacto com a água;
- posicionou-se os provetes sobre os suportes de modo a que ficassem apoiados sobre a face de corte;
- encheu-se o tabuleiro com água até que o nível atingisse  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior dos provetes, evitando molhar as outras faces;
- cobriu-se o tabuleiro e os provetes com uma campânula e o nível de água foi mantido constante durante todo o ensaio;
- foram feitas medições ao fim de tempos  $t_i$ , iguais a 3, 6, 24 e 72 horas a contar desde a colocação dos provetes em contacto com a água;
- os provetes foram retirados da água deixando escorrer a água e colocado sobre uma superfície não absorvente durante  $60 \pm 5$  segundos;
- pesou-se os provetes e registou-se os provetes como  $M_i$ , sendo esta a massa do provete no tempo  $t_i$ .

A absorção de água por capilaridade no tempo  $t_i$  é calculada através da Equação 16:

$$C = \frac{(M_i - M_0)}{A_f} \text{ g/mm}^2 \quad \text{Equação 16}$$

C - coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $\text{g/mm}^2$ );

$A_f$  - área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

### 3.8.3 Absorção de água por imersão

Este ensaio seguiu a especificação LNEC E-394 (1993). A absorção de água por imersão é a diferença entre a massa do provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo

proвете quando seco, expressa em termos de volume e possibilita a avaliação do betão em termos de durabilidade, determinando a porosidade aberta do mesmo.

O procedimento de ensaio foi:

- após 28 dias de cura em câmara seca, colocou-se os 3 provetes de 10 cm de aresta num recipiente;
- colocou-se água de consumo público por etapas, de modo que o provete seja imerso sucessivamente, em intervalos de 1 hora, 1/3 da sua altura, 2/3 da sua altura e na totalidade da sua altura (o nível de água não deve ultrapassar 20 mm da face superior do provete imerso);
- deixou-se os provetes imersos água durante 24 horas (até este ter alcançado massa constante, ou seja, quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas for inferior a 0,1% da média das duas leituras);
- mediu-se a massa do provete saturado registando como  $M_1$  e a massa do provete dentro de água registando como  $M_2$  (massa hidrostática, após saturação);
- retirou-se o provete de dentro de água e colocou-se o mesmo a secar numa estufa ventilada a temperatura de  $110 \pm 5$  °C, até este atingir massa constante;
- finalmente, após secagem do provete, mediu-se a massa do provete seco,  $M_3$ .

A absorção de água por imersão (%) é dada pela Equação 17:

$$A_i = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 17}$$

$M_1$  - massa do provete saturado no ar (g);

$M_2$  - massa hidrostática do provete saturado (g);

$M_3$  - massa do provete seco (g).

### 3.8.4 Penetração de cloretos

Este ensaio tem como objectivo a determinação da resistência do betão à migração dos iões de cloretos e é feito através de um potencial eléctrico aplicado axialmente ao provete que vai ajudar a migração dos iões para dentro do mesmo. Este ensaio é importante já que o ataque de cloretos no betão vai potenciar a corrosão das armaduras. Este ensaio seguiu a norma NT BUILD 492 (1999).

O procedimento de ensaio foi:

- após 14 dias de cura em câmara seca, cortou-se um provete cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, em quatro provetes para ensaio, cada um com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, com o auxílio de uma serra de disco eléctrica;
- foram de novo colocados em câmara seca por mais 14 dias;
- ao fim dos 28 dias totais de cura, colocou-se os provetes na máquina de vácuo por 4 horas imersos numa solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- desligou-se a máquina de vácuo e os provetes foram deixados dentro da mesma durante 24 horas;
- após 24 horas, estes foram retirados da máquina de vácuo e colocados dentro de uma manga de borracha;
- colocou-se os provetes dentro de um reservatório cheio com a solução de católito e um cátodo;
- encheu-se a manga de borracha pela parte de cima com a solução de anólito e imergiu-se o ânodo na mesma;
- ligou-se o ânodo ao polo positivo e o cátodo ao polo negativo da fonte de alimentação;
- a fonte de alimentação foi ligada, com uma voltagem predefinida de 30 V, procedeu-se aos ajustes da mesma conforme a norma e a corrente foi registada;
- registou-se a temperatura inicial em cada solução de anólito e foi escolhida a duração de teste apropriada de acordo com a norma;
- por fim, após terminar a duração de teste, registou-se a corrente e a temperatura final;
- retirou-se os provetes da manga de borracha e foram partidos ao meio com o auxílio de um martelo;
- borrifou-se os provetes com a solução de nitrato de prata e foram medidas as profundidades de penetração com o auxílio de um paquímetro digital.

O coeficiente de migração de cloretos, em regime não estacionário, foi determinado através da Equação 18:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273+T)L}{(U-2)t} \times \left( Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times Xd}{U-2}} \right) \quad (x10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}) \quad \text{Equação 18}$$

$D_{nssm}$  - coeficiente de migração não estável ( $x10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ );

U - valor absoluto da tensão aplicada (V);

T - valor médio das temperaturas inicial e final na solução de anólito (°C);

L - espessura do provete (mm);

$X_d$  - valor médio das profundidades de penetração (mm);

t - duração do teste (h).

### 3.8.5 Carbonatação

Este ensaio tem como objectivo medir a resistência à carbonatação dos betões produzidos visto que esta representa um papel fundamental na durabilidade dos mesmos. Quando a frente de carbonatação atinge a armadura, ocorre a despassivação da mesma e deixa de estar protegida contra os agentes corrosivos. Foi seguida a especificação LNEC E-391 (1993) para a realização deste ensaio.

O procedimento de ensaio foi:

- após 14 dias de cura em câmara seca, cortou-se 3 provetes cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm em provetes com 10 cm de diâmetro e 4 cm de altura, com o auxílio de uma serra de disco eléctrica;
- foram de novo colocados em câmara seca por mais 7 dias;
- passados os 7 dias, foram pintadas as faces cortadas com uma tinta de borracha de modo a que apenas as faces laterais dos provetes estivessem em contacto com o exterior;
- foram de novo colocados em câmara seca por mais 7 dias;
- ao fim de 28 dias totais de cura em câmara seca, estes foram colocados em diferentes condições de cura, dentro de uma câmara de CO<sub>2</sub> com uma humidade relativa entre 55 e 65% e uma concentração de CO<sub>2</sub> de  $5,0 \pm 0,1\%$ .
- ensaiou-se os três provetes cortados em tempos de cura diferentes, aos 7, 14 e 28 dias em câmara de CO<sub>2</sub>;
- cada provete foi retirado e partiu-se em quatro metades iguais com a ajuda de um martelo;
- nas superfícies fracturadas, borrifou-se a solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% (mostra a frente de carbonatação);

- por fim mediu-se e registou-se a profundidade de carbonatação com a ajuda de um paquímetro.

A resistência à carbonatação de cada tipo de betão foi determinada através da média da profundidade de carbonatação dos três provetes.

### 3.8.6 Retracção e retracção autógena

Na presente investigação, para o ensaio da retracção, foi seguida a especificação LNEC E-398 (1993). Esta infere que a retracção do betão representa a diferença entre os valores do comprimento de um provete após secagem, sob condições específicas, ao longo de um determinado período e o valor do seu comprimento após desmoldagem. Para este ensaio, foram utilizados quatro provetes prismáticos de secção quadrada, com 40 cm de comprimento e 10 cm de aresta. Para cada tipo de betão, utilizou-se dois provetes para a retracção normal e dois provetes para a retracção autógena. Durante todo o período de ensaio, os provetes foram mantidos a uma temperatura ambiente de  $20 \pm 2$  °C e uma humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ .

O procedimento de ensaio foi o seguinte:

- após a desmoldagem, às 24 horas de idade, colou-se duas pastilhas metálicas no provete com cola de secagem rápida. Esta colagem efectuou-se com o auxílio de uma régua, tendo as pastilhas ficado a uma distância igual das extremidades do provete;
- para os provetes de retracção autógena, foi ainda aplicada uma película aderente e uma película de alumínio em seu redor, com o objectivo de minimizar o transporte de água;
- efectuou-se a primeira medição ( $d_i$ ), considerada como o ponto de referência para as seguintes leituras;
- repetiu-se o procedimento todos os dias durante a primeira semana, de dois em dois dias nas duas semanas seguintes, de três em três dias na semana seguinte e de semana a semana daí em diante.

A extensão de retracção dos provetes foi calculada através da Equação 19:

$$ecs = \frac{df - d_i}{d_i} \quad \text{Equação 19}$$

$d_i$  - distância entre os pontos de referência no início do ensaio;

$d_f$  - distância entre os pontos de referência no fim do ensaio.

## **4 Análise e discussão dos resultados**

### **4.1 Introdução**

Nesta secção, pretende-se apresentar os resultados obtidos ao longo da presente campanha experimental e proceder à sua avaliação, de modo a concluir sobre a utilização de CV e CFRSU na produção de BAA. Em primeiro lugar, pode-se observar os resultados relativos aos ensaios realizados aos constituintes dos betões produzidos (primeira fase). De seguida, procedeu-se à análise das propriedades do betão no estado fresco, dando assim capacidade de os avaliar em termos de trabalhabilidade (segunda fase). Por último, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios ao betão endurecido, sendo estes fundamentais para a investigação, permitindo tirar conclusões relativas ao desempenho do betão, em termos mecânicos e de durabilidade (terceira fase). Os resultados obtidos foram relacionados, sempre que possível, com os apresentados na segunda secção desta investigação, de modo a compreender as tendências e comparar com aqueles realizados em investigações anteriores.

### **4.2 Primeira fase - Propriedades dos materiais**

Na presente subsecção, são apresentados os resultados das propriedades dos constituintes dos betões utilizados no decorrer da investigação (CFRSU, AN e AR).

#### **4.2.1 Propriedades das CFRSU**

As CFRSU, no seu estado original, apresentam-se com partículas de variados tamanhos. Para estas serem utilizáveis como ligante e apresentarem maior reactividade, com o aumento da sua superfície específica, foram submetidas a um processo de moagem de forma a atingir uma granulometria semelhante à do cimento. Na Tabela 11, são apresentadas as análises granulométricas referentes a dois processos diferentes de moagem sendo eles a moagem das cinzas num moinho pequeno durante 1 hora com uma carga de aproximadamente 1 kg e a moagem num moinho grande durante 1 hora cuja capacidade era cerca de 20 kg de carga. Foi utilizado, no decorrer desta investigação, o método do moinho grande, visto que era necessária uma grande quantidade de CFRSU para a produção dos betões.

Tabela 11 - Variação da distribuição granulométrica das CFRSU entre o moinho pequeno e o moinho grande

Peneiros (µm)	Percentagem acumulada passada (%)	
	Moinho pequeno	Moinho grande
106	83.9	93.1
53	75.4	58.1
45	75.3	52.6
23	54.2	39.3

Foi também realizada uma difracção de raio-X (ensaio DRX) que possibilitou a identificação das fases cristalinas destas cinzas (Figura 26). Os resultados obtidos foram um pouco controversos comparando com aqueles provenientes do relatório do projecto (e com os valores usuais das amostras de CFRSU (Figura 26), visto que as cinzas utilizadas nesta investigação apresentaram um pico de calcite muito maior do que o expectável, atingindo 35.5% da massa total ensaiada. Seria esperado que o pico de quartzo fosse o que apresentasse maior predominância, mas o de calcite atingiu valores superiores. Como o processo de polimerização é espoletado pela reacção do AA com o silício (Si) e com o alumínio (Al), havendo uma menor quantidade de quartzo, mineral formado por uma estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), estas CFRSU analisadas vão ter um menor poder reactivo. Foram também retiradas imagens destas cinzas ao microscópio electrónico de varredura (MEV). Estas imagens serviram para confirmar o mencionado na secção 2.3, onde foi referido que as CFRSU, em termos morfológicos, têm partículas com textura rugosa e formato irregular e angular (Figura 27).

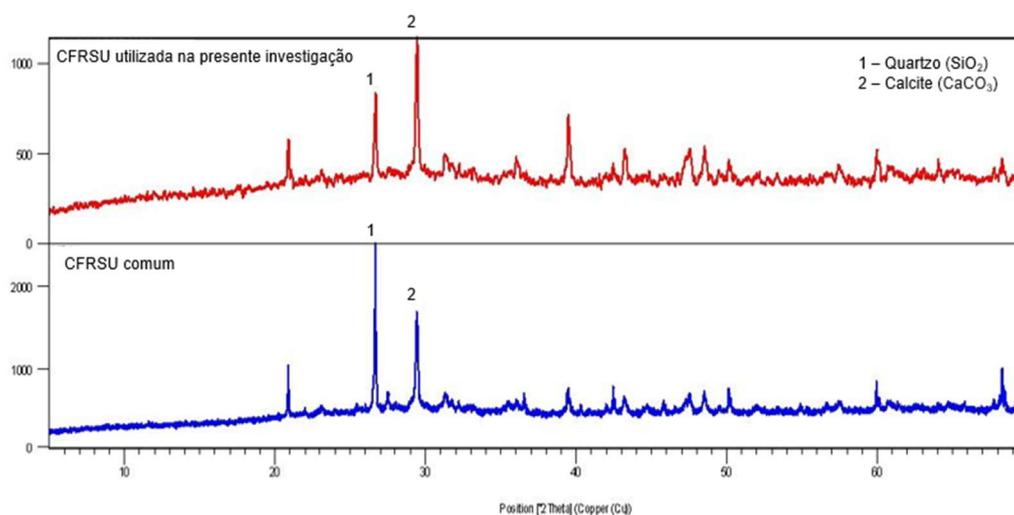


Figura 26 - DRX das CFRSU utilizadas na presente investigação e das CFRSU comuns

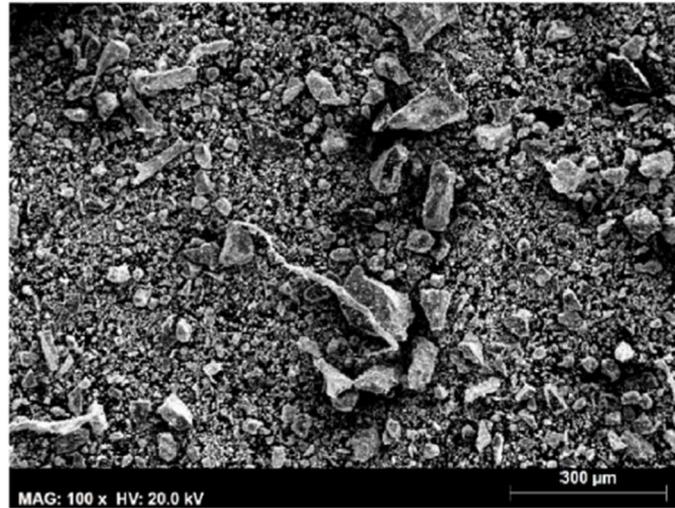


Figura 27 - MEV das CFRSU

#### 4.2.2 Análise granulométrica dos agregados

Como referido em 3.6.1, o ensaio da granulometria aos agregados foi realizado tendo em conta as normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999). Na Figura 28, são apresentadas as curvas granulométricas dos diferentes tipos de AN utilizados assim como a curva granulométrica total.

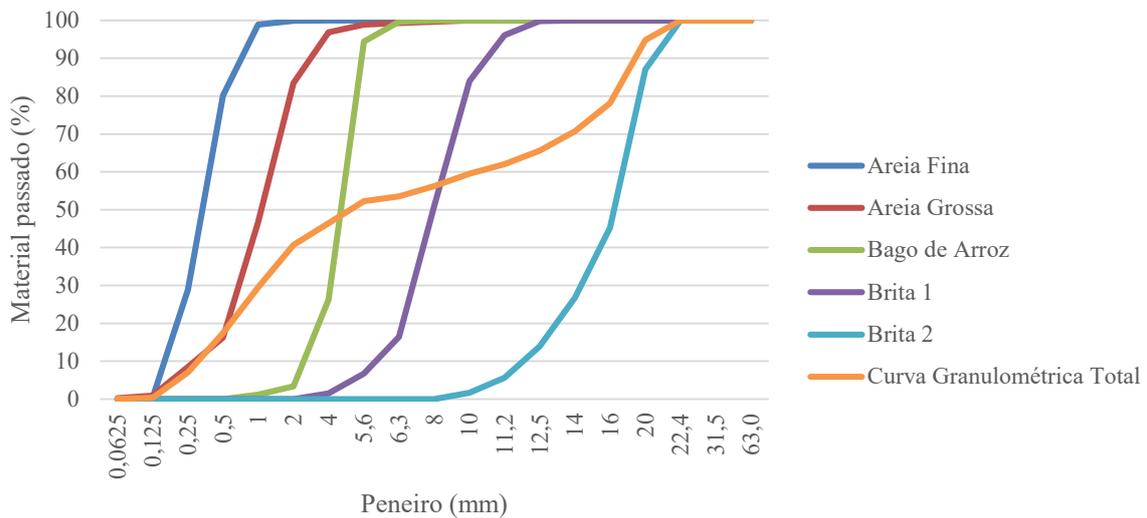


Figura 28 - Análise granulométrica dos diferentes AN utilizados

Esta última foi produzida através do ajustamento das curvas de cada tipo de AN à curva de referência de Faury, sendo o erro médio percentual, quando comparada a curva real com a de Faury, igual a 1.33%. Os resultados de cada uma são apresentados nos anexos (Tabela A.1). Ao

analisar e comparar os resultados obtidos com os valores fornecidos pela empresa, concluiu-se que as diferenças existentes são residuais. Para os AR, este processo não foi realizado visto que foi efectuada uma peneiração para obter todas as fracções que posteriormente foram combinadas para equivalerem à curva granulométrica total dos AN.

#### 4.2.3 Massa volúmica e absorção de água dos AN e AR

Para a determinação destas propriedades, foi seguida a norma NP EN 1097-6 (2003). As massas volúmicas assumem um papel fulcral na caracterização dos agregados, visto que afectam directamente a massa volúmica do betão produzido, permitindo assim inferir as suas características. Foram então medidos três tipos de massa volúmica diferentes: massa volúmica do material impermeável das partículas ( $\rho_a$ ); massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\rho_{rd}$ ); massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\rho_{ssd}$ ). A baridade (massa volúmica aparente,  $\rho_b$ ) dos agregados foi determinada de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2003). Foi também calculada a absorção de água dos agregados ( $WA_{24}$ ). Esta propriedade é igualmente importante visto que condiciona a quantidade de água a utilizar em cada amassadura, sendo necessário ajustar a relação a/l total dos betões produzidos. Os resultados para cada uma das propriedades são apresentados na Tabela 12. Como esperado, para os AR, há um decréscimo dos valores referentes às densidades e um respectivo aumento da absorção de água por eles realizada. Estes valores eram os esperados, visto que os AR apresentam maior porosidade do que os AN.

#### 4.2.4 Composição dos ARG

O ensaio de caracterização dos ARG foi feito tendo em conta a norma BS EN 933-11 (2009). As partículas foram separadas manualmente de uma porção de teste e os resultados encontram-se na Tabela 13. Nesta caracterização, não foram encontradas partículas de vidro (Rg). Ao analisar os resultados, constata-se que a porção que apresenta maior percentagem é a Rc referente ao cimento e ao betão (38.5%). Este constituinte, em comparação com os componentes Ru, confere ao betão uma menor densidade, levando assim a um défice nas propriedades do betão produzido. No entanto, pode ser benéfico para o mesmo, visto que poderá apresentar uma quantidade de  $Ca(OH)_2$  (se não se encontrarem completamente carbonatados), ajudando no ganho de resistência após cura em câmara de  $CO_2$ . A componente Ru representa 28.1% da amostra ensaiada. Este constituinte vai ser o principal elemento de contribuição para a resistência do betão produzido pelo que,

quanto maior a sua percentagem, melhor será o comportamento do mesmo. A componente Rb (e.g. telhas, tijolos e outros fragmentos cerâmicos) apresenta uma percentagem de 22.9%. Sendo a telha um elemento relativamente poroso, vai fornecer ao betão uma menor estanqueidade. Os fragmentos cerâmicos de e.g. louça sanitária, visto que apresentam superfícies muito lisas, poderão ser prejudiciais devido a uma maior dificuldade na adesão do ligante ao agregado. No entanto, este elemento é composto por silício (Si) ajudando assim nas reações de polimerização da activação alcalina. Os últimos dois constituintes (Ra e X) apresentam uma percentagem residual comparada aos restantes, representando apenas um décimo da amostra total.

Tabela 12 - Resultados das massas volúmicas e absorção de água dos agregados

Propriedade	AN					AR	
	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	Fino	Grosso
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2689	2604	2733	2716	2673	2425	2533
$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2668	2582	2657	2658	2611	2112	2222
$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2676	2590	2685	2679	2634	2241	2345
WA <sub>24</sub> (%)	0.29	0.33	1.04	0.79	0.87	6.12	5.52
$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	1560	1614	1327	1451	1441	1328	1257

Tabela 13 - Proporções dos constituintes do ARG (% por massa)

Rc	Ru	Rb	Ra	X
Cimento e betão	Pedra natural	Telha e cerâmica	Pavimento	Lixo
38.5	28.1	22.9	10.3	0.2

### 4.3 Segunda fase - Propriedades do betão no estado fresco

#### 4.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do betão é uma das propriedades que mais afecta o desempenho do mesmo no seu estado endurecido. Vários factores, tais como a relação a/l, a adição de adjuvantes (reductores de água e retardadores de presa) e, até mesmo, o tipo de AA utilizado, podem modificar esta propriedade. Em betões produzidos com AR, a trabalhabilidade é uma das propriedades mais afectadas pela grande absorção de água que estes possuem. Os agregados, ao absorverem a água livre presente no betão, reduzem a plasticidade deste último. Na presente investigação,

de modo a contornar esta situação, foi calculada a parcela de água absorvida pelo agregado (Tabela 14), permitindo assim compensar essa absorção.

A trabalhabilidade foi determinada através do ensaio de abaixamento do cone de Abrams, realizado de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2002). Foi inicialmente considerada uma classe de consistência S3, garantido que os resultados do ensaio se encontravam entre 100 e 150 mm. Na Tabela 14, são sumarizados os valores obtidos referentes às diferentes misturas. A relação  $a/l$  foi, para todas as misturas, igual a 0,5. Analisando a tabela, ambas as misturas produzidas com cimento apresentam a classe esperada (S3). No entanto, observa-se que, para todas as MAA, o abaixamento foi superior a 220 mm (classe de consistência S5), classe essa muito diferente daquela que foi considerada no início.

Tabela 14 - Valores de abaixamento do cone de Abrams referentes às diferentes misturas

Mistura	Abaixamento (mm)	Classe de consistência
100CEM:AN	103	S3
100CV:AN	$\geq 220$	S5
75CV/25CF:AN	$\geq 220$	S5
50CV/50CF:AN	$\geq 220$	S5
25CV/75CF:AN	$\geq 220$	S5
100 CEM:AR	110	S3
100CV:AR	$\geq 220$	S5
75CV/25CF:AR	$\geq 220$	S5
50CV/50CF:AR	$\geq 220$	S5
25CV/75CF:AR	$\geq 220$	S5

Apesar da mesma quantidade de água entre as misturas de referência e as activadas alcalinamente, esta discrepância pode ser explicada por diversos motivos. Sendo a primeira campanha de betão feita no âmbito do projecto RInoPolyCrete, quaisquer considerações acerca da trabalhabilidade foram retiradas de investigações onde foram realizadas argamassas. Nestes estudos, foi possível obter misturas com trabalhabilidade equivalente, mas percebeu-se que as formulações óptimas nestes casos não eram extrapoláveis para betões. Adicionalmente, tendo em conta a experiência passada com a presa acelerada em misturas activadas alcalinamente, de modo a evitar o mesmo fenómeno no betão, usou-se uma quantidade de redutores de água adequada para evitar este fenómeno, mas que se traduziu numa trabalhabilidade excessiva. Igualmente,

dada a escassez de materiais e de tempo para efectuar toda a campanha experimental, não foi possível fazer uma etapa de acerto de trabalhabilidade.

Relativamente ao efeito da inclusão de CV, quanto maior a percentagem na mistura, seria expectável uma maior trabalhabilidade devido à conhecida forma esférica das partículas deste ligante, que reduz a fricção entre as partículas. Seria expectável o efeito oposto relativamente à CFRSU uma vez que tem um formato algo irregular (Figura 27). Não havendo tempo para otimizar a trabalhabilidade, os resultados obtidos foram aceites e levados até ao fim da investigação, ficando esses acertos para corrigir em futuras investigações.

No entanto, como descrito em 3.1, mesmo havendo um abaixamento superior a 220 mm, permitindo uma boa trabalhabilidade do betão, passados 3 a 5 minutos ocorreu uma presa rápida impossibilitando o processo de moldagem e vibração de algumas misturas (Figura 29a). Este efeito de presa rápida é várias vezes observado na revisão da literatura. Para perceber a causa do efeito, foram produzidas várias argamassas teste com diferentes constituições: A1 apresentando apenas NaOH; A2 com um rácio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  igual a 1; A3 com um rácio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  igual a 0.5; A4 com um rácio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  igual a 1 e uma adição de 4% (em massa de ligante) de um retardador de presa (tetraborato de sódio ou bórax). Depois de produzidas e passados 30 minutos, as argamassas foram ensaiadas numa mesa de espalhamento (Tabela 15). Observando os resultados, é claro que o bórax fornece uma maior trabalhabilidade à amassadura. Quando comparada a mistura A2 com a mistura A3, a que apresenta maior espalhamento é a produzida com o rácio de 0.5, como também acontece na literatura. Sendo a mistura A4 igual à A2 (apenas é adicionado bórax nesta última), se este retardador não tivesse efeito, seria esperado que a mistura A3 fosse melhor do que a A4. No entanto, comparando estas misturas, aquela com melhor comportamento é a A4. Com isto, conclui-se que o bórax, de facto, retarda a presa do betão. Tendo em conta os resultados apresentados, optou-se pelo uso do bórax (e um rácio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  igual a 0.5) em todos os betões produzidos (Figura 29b). Nesta reacção química, o tetraborato de sódio sofre uma hidrolisação, fazendo com que a água quebre as suas ligações. Esta quebra possibilita a reacção entre o borato e os iões cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em fase desidratada. Esta reacção forma uma camada adicional de borato à base de cálcio sobre as partículas do ligante, impedindo as mesmas de serem hidratadas na fase inicial (Zhang et al., 2019).

Tabela 15 - Espalhamento das diferentes argamassas aos 30 minutos (mm)

A1	A2	A3	A4
247,7	246,7	255,3	264,3



Figura 29 - Provetes antes (a) e após utilização de bórax (b)

Um estudo sugere que, quanto maior a percentagem de bórax (em massa de ligante), maior será a trabalhabilidade. Contudo, utilizando uma percentagem acima de 4%, poderá ser prejudicial à resistência mecânica dos betões com ele produzidos. Oderji et al. (2019) reportaram que a utilização de 4% resultou num espalhamento de 32,5 cm, 30 minutos após produção. No entanto, este não é o único motivo pelo qual o tempo de presa do betão foi aumentado ao adicionar este retardador. Atentando às reações que promovem a polimerização e a condensação do BAA, Jin et al. (2021) referiram que o NaOH estimula a dissolução e promove a polimerização das substâncias activas nas cinzas, formando um ambiente de forte excitação alcalina. Isto proporciona condições favoráveis para a fusão de substâncias activas e o desenvolvimento da resistência das misturas. Contudo, o  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  proporciona um ambiente de excitação muito menos alcalino do que o NaOH (pH 14), atingindo uma condensação rápida de amostras AA sob baixa alcalinidade (pH = 11,55). No entanto, este pH não pode formar um ambiente de excitação eficaz para induzir a dissolução do cálcio reactivo, silício e alumínio das cinzas e a formação de produtos de polimerização tornando esta situação controversa, visto que é necessário um pH muito alto para atingir altas resistências, mas um pH não tão alto para haver uma condensação considerável da amostra, visto que apenas a capacidade de auto-condensação do silicato de sódio leva à coagulação de amostras AA. Por este motivo, justifica-se o que foi dito no parágrafo anterior e o que tem sido observado em

variadas investigações: quanto maior a quantidade de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , menor será o tempo de presa da amostra. Com a adição do bórax na mistura, além de criar a película de borato à base de cálcio ao redor das partículas, também aumenta o pH da mistura. Ao aumentar o pH, vai haver uma maior dificuldade da auto-condensação do silicato de sódio, aumentando assim o tempo de presa do betão e, melhorando posteriormente a sua resistência mecânica (maior facilidade na fusão de substâncias activas e no desenvolvimento da resistência).

Contudo, apesar do claro benefício do bórax, foi observado outro fenómeno. Na primeira betonagem de cada mistura, após a adição do retardador de presa na constituição do betão, ocorreu uma presa muito rápida na segunda amassadura produzida em diversas famílias (Figura 30). Como descrito em 3.1, foi notada a presença de uma película aderida às paredes da betoneira, proveniente da solução de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  utilizada na primeira betonagem e que poderia estar a contaminar o betão na segunda betonagem. Esta contaminação aumentava então o teor de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  na mistura, fazendo assim com que o tempo de presa fosse muito mais rápido devido aos fenómenos explicados no parágrafo anterior. Foi então utilizado, para todas as betonagens futuras, um desengorrandante e uma pistola de pressão de água para limpar a betoneira entre betonagens consecutivas.

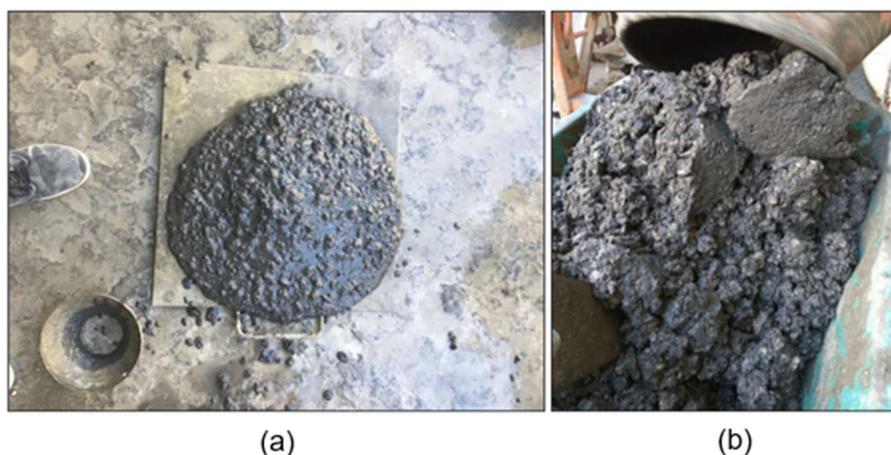


Figura 30 - Diferença entre betonagens consecutivas: (a) primeira betonagem, betão trabalhável; (b) segunda betonagem, betão duro à saída da betoneira

#### 4.3.2 Massa volúmica

A massa volúmica do betão no estado fresco foi ensaiada segundo a norma NP EN 12350-6 (2002). Todos os resultados são apresentados na Tabela 16, assim como as variações percentuais de massa volúmica comparativamente à mistura de referência (100CEM:AN). Analisando

os valores obtidos, como esperado, observou-se um decréscimo da massa volúmica quando os AR foram utilizados, em conformidade com a literatura. Foram registadas variações de 11.8%, para a mistura 100CEM:AR. Este fenómeno deve-se à baixa densidade deste tipo de agregado causada pela presença de uma pasta cimentícia aderida às suas partículas (Rodrigues et al., 2013) e também pela presença de fragmentos provenientes de alvenaria bastante porosos.

Com o incremento do conteúdo de CFRSU, também se observa uma descida na massa volúmica. Embora as CFRSU sejam mais densas do que as CV, estas últimas podem apresentar uma maior compacidade devido à sua morfologia. Para além desse aspecto, a densidade das misturas com CFRSU é também mais baixa devido à formação de  $H_2$  quando em contacto com a SA. Embora as CFRSU tivessem sido alvo de um pré-tratamento, experiência passada demonstrou que nem todas as partículas reagiam nessa etapa e, portanto, sofreriam oxidação mais tarde durante a mistura do betão, levando à formação de bolhas com gás  $H_2$ . Este aspecto pode justificar a oscilação de resultados nas misturas que apresentam CFRSU, podendo o pré-tratamento não ter sido concluído adequadamente durante as 24 horas que antecediam a betonagem.

Tabela 16 - Massa volúmica dos betões no estado fresco

Mistura	Massa volúmica (kg/dm <sup>3</sup> )	Varição (%)
100CEM:AN	2,393	0
100CV:AN	2,202	8.0
75CV/25CF:AN	2,188	8.6
50CV/50CF:AN	2,196	8.2
25CV/75CF:AN	2,190	8.5
100 CEM:AR	2,111	11.8
100CV:AR	2,021	15.5
75CV/25CF:AR	1,980	17.3
50CV/50CF:AR	2,001	16.4
25CV/75CF:AR	1,998	16.5

## 4.4 Propriedades do betão no estado endurecido

### 4.4.1 Retracção

Devido à estabilidade das suas propriedades químicas e dimensionais, as CV são um ligante capaz de diminuir a retracção dos betões, sendo esse um dos principais motivos para a sua utilização. No entanto, sendo o estudo muito recente de MAA com CFRSU, é necessário estudar também a influência desse tipo de ligante na estabilidade dimensional dos betões com ele produzidos. Outras características, como o comportamento destes ligantes à retracção autogénea e a substituição de AN por AR na sua totalidade, foram avaliadas. Foi então realizado o ensaio da retracção em todas as famílias produzidas seguindo as indicações descritas na norma LNEC E398 (1993).

Para os betões produzidos com AN, os resultados da retracção e da retracção autogénea encontram-se na Figura 31, estando em anexo (Tabela A2) as correspondentes variações dimensionais. Nota-se que os valores referentes aos betões AA são menores quando comparados com o betão produzido com CP. No último dia de ensaio, o valor de retracção deste betão foi igual a 528  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , enquanto os valores de retracção das restantes se encontravam compreendidos entre 103 e 199  $\mu\text{m}/\text{mm}$  (redução de 62-80%). Tanto Fernandez-Jimenez et al. (2006) como Thomas et al. (2017) observaram este fenómeno quando, nas suas investigações, compararam amassaduras produzidas com CP com amassaduras produzidas através de CVAA. Estes valores são explicados pelas características microestruturais das CV e pela sua estabilidade dimensional, havendo assim uma maior dificuldade de saída de água da amassadura devido ao elevado grau de finura que este ligante apresenta. No entanto, para as misturas produzidas com CFRSU, devido à maior porosidade do betão com elas produzido, seria esperada uma maior retracção à medida que aumenta a percentagem destas na composição dos betões. De facto, para a mistura 75CV/25CF e 25CF/75CF, a retracção medida no último dia de ensaio (192 e 199  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , respectivamente) foi maior do que a do betão 100CV (157  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ) e, entre elas, foi maior a que apresentava maior conteúdo de CFRSU. Contudo, a mistura produzida com 50% de CV e 50% de CFRSU contraria o referido. Esta apresenta, no último dia de ensaio, uma retracção de 103  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , muito menor do que a do betão 100CV (redução de 34%). Perante estes resultados, que seguem a mesma tendência para os ensaios referidos mais à frente, e para perceber o ocorrido, recorreu-se à realização de uma nova betonagem do betão 50CV/50CF:na, os resultados

da qual não foi possível obter até à escrita do presente estudo.

Na Figura 31, referente à retracção autogénea dos betões com AN, constatou-se que nem todos seguem a tendência anterior. Como esperado, os valores obtidos, no último dia de ensaio, dos BAA (compreendidos entre 42 e 252  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ) apresentam-se mais baixos do que o valor de retracção do betão 100CEM (384  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ). No entanto, o expectável quanto ao aumento do conteúdo de CFRSU na composição do betão não se verificou. Como referido, com um aumento gradual deste tipo de ligante, seria de esperar um aumento nos valores da retracção. Para a mistura 25CV/75CF, essa tendência foi verificada, tendo sido obtido um valor de retracção de 252  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , no último dia de ensaio. Para as restantes misturas, os valores foram 178  $\mu\text{m}/\text{mm}$  no betão 100CV, 76  $\mu\text{m}/\text{mm}$  no 75CV/25CF e 42  $\mu\text{m}/\text{mm}$  no 50CV/50CF. Estes resultados estão assim desenquadrados do que seria tendencial visto que, devido às propriedades das CV, seria expectável o betão 100CV apresentar menor retracção, como ocorre nos valores da Figura 31. Contudo, outro resultado que se apresenta congruente com os valores anteriores é o do betão 50CV/50CF. Este, na retracção autogénea, também é o que apresenta menor valor, apresentando, no último dia de ensaio, uma retracção de 42  $\mu\text{m}/\text{mm}$ . Este resultado vai, como referido, contra o que é apresentado na revisão da literatura e, por esse motivo, foi realizada uma nova betonagem. É de notar que, no início da retracção desta mistura, houve uma expansão. Casanova et al. (2021) observaram o mesmo fenómeno em algumas das suas misturas produzidas com CFRSU, explicando esta expansão pela formação de  $\text{H}_2$  proveniente da reacção de partículas de alumínio que não oxidaram totalmente durante o processo de pré-tratamento e de cura térmica. Visto que este efeito apenas ocorreu numa mistura, não se pode considerar esta conclusão como final, sendo assim necessários mais estudos para entender o que levou a essa expansão.

Confrontando então os resultados das diferentes retracções, notou-se que, aos 91 dias, em algumas misturas, o valor da retracção autogénea é superior. Neste tipo de retracção, visto que os provetes se encontram selados (envoltos em película aderente plástica e folha de alumínio), ou seja, não existem trocas com o meio envolvente, seria expectável ter menores valores de variação dimensional. No entanto, para a mistura 100CV (retracção de 157  $\mu\text{m}/\text{mm}$  e retracção autogénea de 178  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ) e para a mistura 25CV/75CF (retracção de 199  $\mu\text{m}/\text{mm}$  e retracção autogénea de 252  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ), esses valores foram maiores. Avila et al. (2022) observaram este fenómeno explicando o ocorrido pela existência da fase de cura térmica, que reduz significativamente o teor

de água dos provetes. Após esta etapa, tendo o provete uma quantidade de água mais baixa e sendo imediatamente selado, a retracção vai ocorrer devido as reacções internas da matriz, onde ocorre um grande consumo de água interno. Nos provetes não selados, após a etapa da cura térmica e, por isso, com reduzida quantidade de água interna, esta foi em parte reposta ao longo do tempo por equilíbrio higroscópico com o meio envolvente, resultando assim numa retracção por evaporação reduzida.

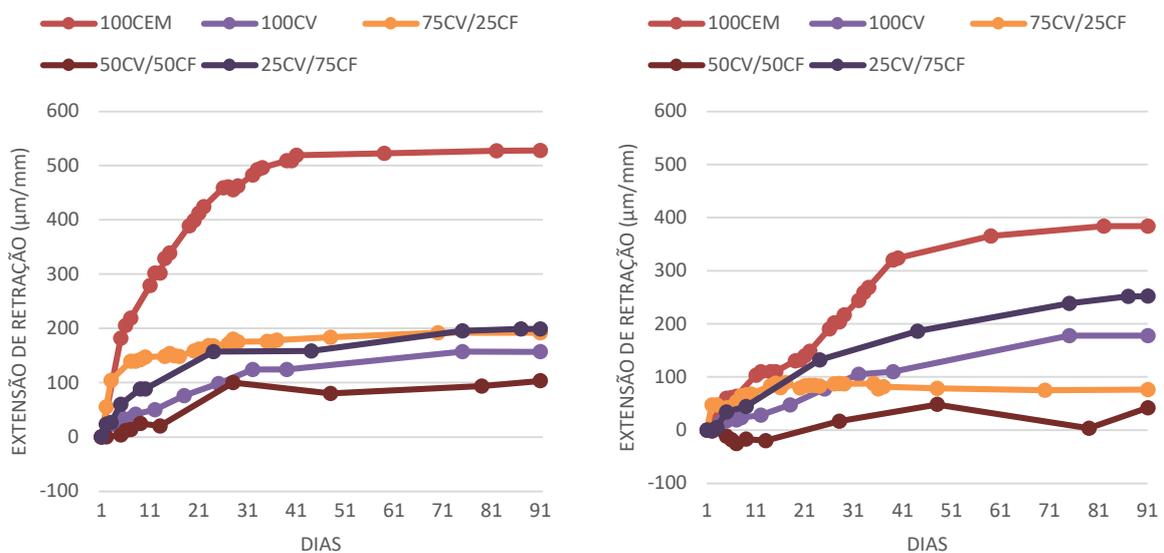


Figura 31 - Retracção (esquerda) e da retracção autogénea (direita) dos provetes produzidos com AN

Na Figura 32, são apresentados os valores da retracção e da retracção autogénea dos betões produzidos com AR. Em anexo (Tabela A.3), pode-se encontrar as correspondentes variações dimensionais. Não parece existir uma grande variação nas retracções dos BAA. Mesmo assim, a tendência observada para a retracção dos betões produzidos com AN mantém-se, sendo a mistura que possui uma maior retracção a produzida com 100% de CP (453 µm/mm ao último dia de ensaio), seguida do betão 25CV/75CF (127 µm/mm) e do betão 50CV/50CF (116 µm/mm). Pela lógica seguida, o betão que supostamente deveria seguir-se seria o 75CV/25CF visto que, com maior conteúdo de CFRSU, deveria ter uma retracção maior. No entanto, este betão apresenta uma retracção de 109 µm/mm, ligeiramente inferior à do betão 100CV, que apresenta 113 µm/mm. Sendo esta uma redução percentual de apenas 4%, não se consegue retirar conclusões concretas. Foram observadas, tal como anteriormente, pequenas expansões iniciais que podem ser explicadas pela oxidação do alumínio, mas são necessários estudos mais

aprofundados que o possam comprovar.

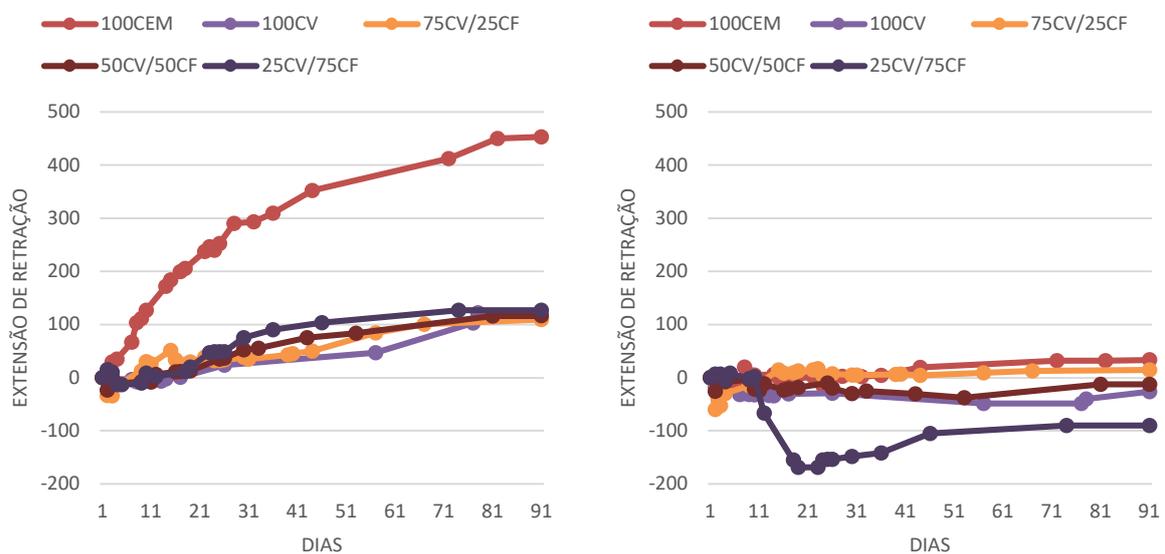


Figura 32 - Retração (esquerda) e retração autogénea (direita) dos provetes produzidos com AR

Relativamente aos valores da retração autogénea presentes na Figura 32, pode-se observar que, ao contrário do que se viu em todas as anteriores, estes seguem uma tendência diferente, tendo até, no fim do ensaio, havido provetes a exibir uma ligeira expansão, ao invés de retrain. O betão 100CEM apresentou, mais uma vez, a maior retração aos 91 dias ( $33 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) seguido do betão 75CV/25CF, que apresentou uma retração de  $14 \mu\text{m}/\text{mm}$ . As restantes misturas, 50CV/50CF, 100CV e 25CV/75CF, apresentaram expansões ( $13$ ,  $27$  e  $90 \mu\text{m}/\text{mm}$ , respectivamente).

Usualmente, quando se compara os valores de retração de betões produzidos com AN com os de betões produzidos com AR, estes últimos apresentam maiores valores devido à alta porosidade e baixa densidade que este tipo de agregado possui e, por isso, com reduzida capacidade de restringir a retração. Adicionalmente, estas características permitem uma maior facilidade nas trocas de água entre o provete e o ambiente exterior, levando a uma maior evaporação de água e, por conseguinte, uma maior retração. No entanto, no caso em estudo, esse efeito não foi verificado, havendo uma menor retração para os betões cujos agregados eram reciclados. Este fenómeno foi observado por outros investigadores. Lee et al. (2018), ao estudarem a utilização de AR em betões produzidos com escória activada alcalinamente, também observaram uma diminuição da retração e da retração autogénea. Ao utilizarem 25% de AR na constituição do betão, e comparando os valores com os do betão de controlo (produzido com 100% AN),

observaram uma redução de 12,8% para a retracção e de 28,9% para a retracção autogénea. As reduções foram mais acentuadas quando utilizaram 50% de AR, onde obtiveram uma redução de 17% para a retracção e, para autogénea, de 37,8%. Este efeito é causado devido à cura interna do betão. Devido à grande porosidade e capacidade de absorção de água por parte dos AR, estes vão funcionar como um “reservatório de água”. Esta água vai hidratando internamente o betão evitando assim a auto-dessecação do mesmo, diminuindo a retracção. Outros autores, como Mao et al. (2021) e Li et al. (2020), observaram este fenómeno na retracção autogénea. Li et al. (2020) chegou até a obter um valor de retracção autogénea positivo (ou seja, ocorreu expansão), tal como foi obtido neste estudo.

#### 4.4.2 Absorção de água por capilaridade

A porosidade, indirectamente medida através da absorção de água por capilaridade, é um dos parâmetros que mais interfere com a durabilidade do material. Este ensaio foi realizado em todas as misturas produzidas seguindo a especificação LNEC E-393 (1993). Em anexo, nas Tabela A.4 e Tabela A.5, são apresentados os valores obtidos no decorrer dos ensaios bem como o seu respectivo coeficiente de absorção. Na Figura 33, apresenta-se os valores do coeficiente de absorção de água ao fim de 72 horas de ensaio.

Ao avaliar os resultados e considerando apenas a influência dos AR, a tendência observada está de acordo com as conclusões retiradas nas investigações de Nuaklong et al. (2018) e de Casanova et al. (2021). Nestes estudos, foi observado um aumento de absorção de água nas famílias com AR, comparando com as de AN. Este aumento deve-se à elevada porosidade deste tipo de agregado, influenciando na porosidade do betão, tornando-o mais susceptível a absorver água.

Tal como referido, Zhu et al. (2014) chegaram a valores de porosidade idênticos ao comparar argamassas produzidas com CP e CVAA utilizando AN (9,8% e 8,1-10.1%, respectivamente). Visto que a absorção de água está directamente relacionada com a porosidade, pode-se concluir que os valores da absorção também vão ser relativamente semelhantes, tendência essa observada nos resultados, havendo um incremento de 0,42 g/mm<sup>2</sup> para 0,51 g/mm<sup>2</sup>. Quanto à influência na substituição de CV por CFRSU, foram notadas diferentes variações. Para os betões produzidos com AN, observou-se um constante aumento do coeficiente de capilaridade com o aumento do conteúdo de CFRSU. Tanto Casanova et al. (2021) como Avila et al. (2022) observaram este

incremento, explicando-o devido à formação de uma matriz menos densa e mais porosa, causada pela reacção ocorrida entre o alumínio das CFRSU e o AA, formando  $H_2$ . Este fenómeno aumenta substancialmente a porosidade do betão, levando a um aumento de absorção de água. Porém, na presente investigação, este incremento só ocorre até ao betão 75CV/25CF:AN. Para os betões produzidos com 50% e 75% de CFRSU, o coeficiente de absorção de água foi muito menor do que os restantes, havendo uma queda de 53% (de 0,88 para 0,41  $g/mm^2$ ) no coeficiente do betão 75CV/25CF:AN para o coeficiente do 50CV/50CF:AN, voltando a subir para o 25CV/75CF:AN, atingindo um valor de 0,46  $g/mm^2$ . Nas restantes horas de ensaio (3, 6 e 24 horas), esta tendência foi igualmente observada.

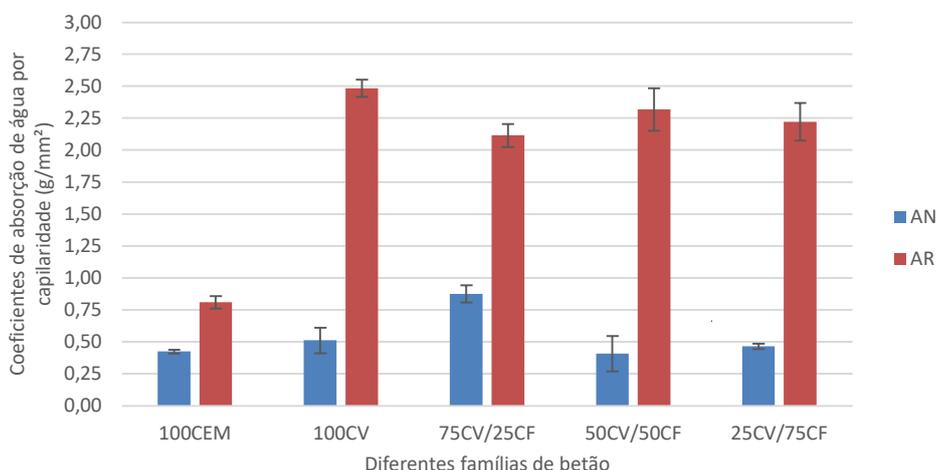


Figura 33 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade dos provetes produzidos

Para os betões produzidos com AR, estas tendências já não foram verificadas. Observou-se um grande aumento de absorção de água entre a mistura de referência e a produzida com 100% CV (aumento de 206%). Era de esperar que, tal como nas misturas com AN, esta propriedade apresentasse pior desempenho no betão produzido com CV ao comparar com o produzido com CP, mas não era prevista uma diferença tão grande. Esta perda, para além de se dever ao esperado aumento da porosidade dos AR relativamente aos AN, pode ter sido devida a uma migração parcial dos iões  $Na^+$  e  $OH^-$  para dentro dos próprios agregados, estabelecendo assim um equilíbrio iónico na solução dos poros. Visto que os AR apresentam uma grande porosidade e fraca carga iónica no seu interior, quando a mistura é produzida, os iões são adsorvidos para dentro dos AR, balanceando a carga na solução dos poros. Esta migração vai provocar uma diminuição das reacções que ocorrem durante a activação alcalina fazendo com que as suas propriedades sejam piores

relativamente ao betão em que a mesma não ocorreu. Casanova et al. (2021) e Shi et al. (2012) referiram o mesmo nas suas investigações quando comparada a diferença da resistência à compressão nas argamassas produzidas com CP e AN com CP e AR e a diferença das produzidas com CV e AN com CV e AR, tendo esta apresentado valores muito superiores à anterior. Contudo, para as três amassaduras seguintes, ocorreu uma grande variação de resultados, diminuindo para  $2,12 \text{ g/mm}^2$  na mistura 75CV/25CF, aumentando para  $2,32 \text{ g/mm}^2$  no betão 50CV/50CF e voltando a diminuir para o 25CV/75CF, atingindo  $2,22 \text{ g/mm}^2$ .

Foi notado que, durante o ensaio, os provetes apresentaram uma perda de massa significativa, podendo ser este o aspecto causador das oscilações que ocorreram ao longo do ensaio. Visto que este é directamente relacionado com o peso do provete, estando o mesmo a perder massa ao mesmo tempo que absorve água vai levar a valores potencialmente inconclusivos. Como não foi possível quantificar a perda de massa por lixiviação durante este ensaio, os resultados mencionados são inconclusivos. Na Figura 34, este evento é perceptível, no qual a água apresenta uma cor acastanhada e são visíveis pequenos pedaços do provete destacados do mesmo.



Figura 34 - Fenómeno da perda de massa nos provetes durante ensaio da absorção de água por capilaridade

Esta perda de massa deve-se principalmente à instabilidade da matriz quando exposta à água; o sódio, proveniente do AA e, mais tarde, inserido na estrutura química que confere a ligação dos componentes do betão, fica localizado em diversos pontos internos, mas também nas fronteiras dos oligómeros formados. Esta localização permite que haja uma fácil dissolução e consequente migração do sódio em entrar em contacto com a água (Davidovits, 2020). Esta perda foi observada na maior parte dos provetes activados alcalinamente, sendo mais acentuada nas misturas com AR pelo facto de estes apresentarem uma maior porosidade, facilitando assim o contacto

da água com os iões de  $\text{Na}^+$ .

#### 4.4.3 Absorção de água por imersão

Assim como a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão permite tirar conclusões significativas acerca da durabilidade do betão. O ensaio referente a esta propriedade decorreu como descrito na especificação LNEC E-394 (1993), sendo realizado aos 28 dias de idade de cada betão produzido. Na Figura 35, encontram-se os resultados obtidos após a realização do ensaio para todas as famílias produzidas e em anexo encontram-se todas as variações ocorridas (Tabela A.6). Pela revisão da literatura, seria esperado que houvesse um aumento contínuo desta com uma maior substituição de CV por CFRSU. No entanto, tal como na absorção por capilaridade, isso não ocorreu. De facto, a tendência observada foi igual à da absorção por capilaridade, havendo um incremento de absorção quando se utilizou AR, devido à maior porosidade do provete aquando da utilização deste tipo de agregado, e uma diminuição desta propriedade nos betões produzidos com AN com quantidades de CFRSU acima dos 50%.

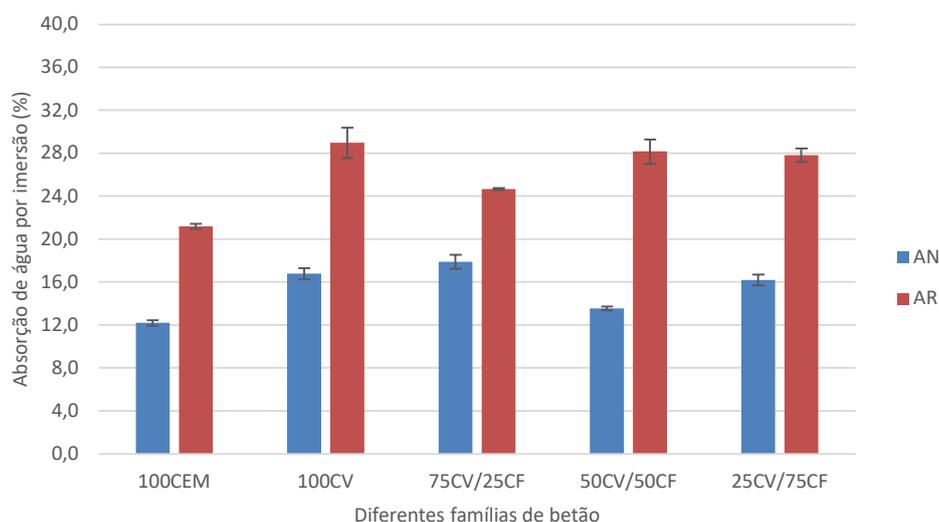


Figura 35 - Absorção de água por imersão dos provetes produzidos (%)

Nos provetes produzidos com AN, o aumento foi contínuo até à mistura 75CV/25CF, sendo a absorção de água por imersão de 12.2% para a mistura 100CEM, 16.8% para a mistura 100CV e 17.9% para a 75CV/25CF. Na mistura 50CV/50CF, houve, tal como na absorção de capilaridade, um decréscimo, sendo a percentagem igual a 13.5%, voltando a subir para a mistura 25CV/75CF com 16.2%.

Para as misturas produzidas com 100% de AR, a tendência também foi a mesma da absorção por capilaridade havendo um incremento de absorção de água de 21.2% para 29% quando se substituiu CP por CV. Comparando mais uma vez este aumento (de 7.8%) com o aumento entre o CP e as CV produzidos com AN (de 4.6%), é de evidenciar que foi muito maior quando se utilizou os AR. Este aumento pode ser explicado da mesma forma como o foi o aumento na absorção por capilaridade nas mesmas misturas. Pode ter ocorrido o equilíbrio iónico e a migração dos iões para dentro dos poros do AR, havendo assim uma menor quantidade de reações durante o endurecimento do betão, contribuindo para piores resultados nos ensaios produzidos. Para as três restantes misturas, os valores percentuais de absorção de água tiveram o mesmo comportamento do que o verificado na absorção por capilaridade, diminuindo para 24.7% na mistura 75CV/25CF, aumentando na mistura 50CV/50CF para 28.2% e voltando a diminuir na mistura 25CV/75CF, perfazendo um valor de 27.8%.

Durante este ensaio, o fenómeno de perda de massa referido também foi notado, tendo sido mais predominante nas misturas produzidas com AR e maior quantidade de CFRSU. Esta perda é a principal razão para a reduzida absorção em alguns dos casos referentes neste ensaio. Alguns destes resultados são então inconclusivos, visto que muitos dos valores que se apresentam mais baixos, relativamente ao esperado; não são mais baixos devido à menor absorção, pois simplesmente perderam massa à medida que o provete ia absorvendo água.

#### **4.4.4 Penetração de cloretos**

O ensaio da penetração de cloretos permite determinar a resistência do betão perante a migração dos iões cloretos e foi realizado como especificado na norma NT BUILD 492 (1999). Este ensaio vai facultar os resultados do coeficiente de migração não estável. No entanto, neste estudo, foi utilizado o valor médio das profundidades de penetração dos iões para comparar os resultados obtidos.

Os ensaios realizados nas misturas produzidas com AR foram inconclusivos, não sendo possível retirar valores viáveis para comparação, tanto devido a problemas relacionados com provetes perdidos na máquina indutora de corrente eléctrica (foram realizadas as 24 h em vácuo mas, quando os provetes foram colocados na máquina indutora de corrente, não havia transmissão da mesma devido a avaria dos cabos), como problemas na estabilidade da matriz do betão, que

cedeu quando se colocou os provetes dentro das mangas de borracha (Figura 36). Esta instabilidade da matriz foi causada, de novo, pelo fenómeno da perda de massa do betão. Depois de os provetes serem colocados dentro da máquina de vácuo e na solução aquosa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , estes apresentavam perda de massa considerável, havendo uma maior facilidade para desagregação da matriz (Figura 36).



Figura 36 - Problemas de estabilidade da matriz do betão produzido com AR e CFRSU (esquerda) e perda de massa dos provetes (assente no fundo) após 24 h na máquina de vácuo (direita)

Pelo facto de o tema em estudo ser muito recente, existe um leque reduzido de investigações acerca deste assunto, sendo difícil encontrar uma explicação para os resultados obtidos. Este é um ensaio que tira partido da passagem da corrente eléctrica pelo provete e da quantidade de cloretos livres que se vão encontrar na matriz. Se se atender apenas à passagem de corrente, Shi (2004) referiu que o ensaio é essencialmente uma medida da condutividade eléctrica do betão, sendo esta dependente não só das características da estrutura dos poros como da sua composição química. Atendendo a estes aspectos, o autor acrescentou que este não é um teste válido para avaliar e comparar a permeabilidade de betões produzidos com diferentes materiais ou diferentes porções de mistura. Rajamane et al. (2011) referiu que alguns iões, como o  $\text{H}^+$  e o  $\text{OH}^-$ , se movem muito rapidamente e, portanto, são muito bons portadores de carga, enquanto outros iões, como o  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e o  $\text{Cl}^-$ , se movem a um ritmo mais lento e, portanto, conduzem menos electricidade. Uma vez que os BAA usam soluções alcalinas altamente condutoras (visto que são ricas em  $\text{OH}^-$ ), o remanescente não reagido do AA pode dar um falso alarme, levando a concluir que os BAA são altamente permeáveis aos cloretos.

No entanto, a norma NT BUILD 492 não se limita à medição da condutividade eléctrica. Após os provetes serem retirados de dentro da máquina indutora de corrente, foram partidos e aspergidos

com uma solução de nitrato de prata. Desta aplicação decorre uma reacção fotoquímica, aparecendo um precipitado branco na presença de cloretos livres e um precipitado castanho na região sem cloretos ou com cloretos combinados. Com isto, os resultados da penetração dos iões cloretos, para as misturas produzidas com AN, encontram-se na Figura 37 (e na **Error! Reference source not found.** dos anexos).

Foi então observada a mesma tendência ocorrida tanto na absorção de água por capilaridade como na absorção de água por imersão, em que houve um aumento constante da profundidade até à mistura 75CV/25CF:AN (20,9 mm para 100CEM, 21,4 mm para 100CV e 22,2 mm para 75CV/25CF), seguido de uma diminuição para a mistura 50CV/50CF:AN, chegando ao valor de 20,1 mm e voltando a subir para 21,4 mm quando se utilizou uma percentagem de 75% de CFRSU.

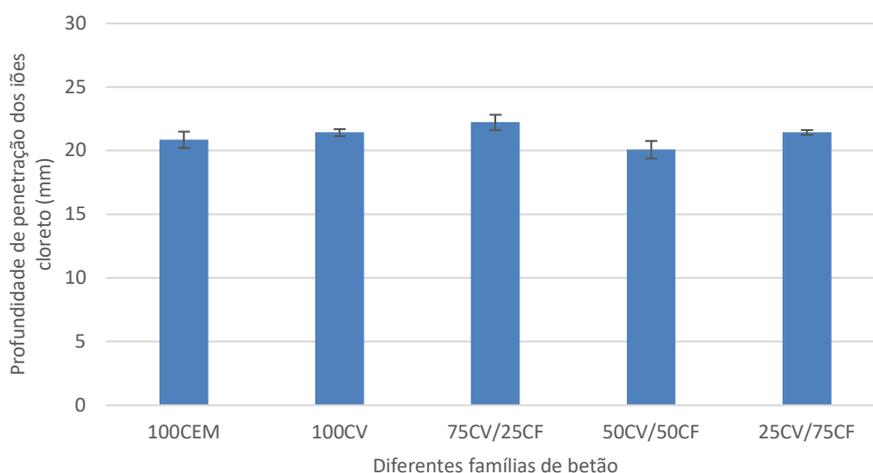


Figura 37 - Profundidade de penetração dos iões cloreto

#### 4.4.5 Carbonatação

A carbonatação é uma das principais causas de perda de durabilidade do betão armado, visto que promove a despassivação das armaduras. A frente de carbonatação foi assim avaliada para compreender a influência dos diferentes ligantes activados alcalinamente utilizados, bem como a influência da utilização de AR ao invés de AN. Este foi realizado como definido na especificação LNEC E-391 (1993).

Este ensaio, tal como o da penetração dos cloretos, embora seja muito dependente da porosidade das amostras, é apenas um indicador do pH da mistura. A profundidade de penetração é avaliada

através de um indicador ácido-base (fenolftaleína). Este indicador apresenta um intervalo aproximado de pH de mudança de cor entre 8,2 e 10, sendo que ocorre uma cor carmim/roxa quando o pH da matriz do betão se encontra acima do mesmo e incolor quando o mesmo se encontra abaixo. Quando o CO<sub>2</sub> entra na matriz do betão, ocorre uma dissolução do mesmo na solução dos poros que promove a diminuição de pH devido à dissociação dos iões de bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) em iões hidrogénio (2H<sup>+</sup>) e iões carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Com isto, consegue-se avaliar a profundidade atingida pelo CO<sub>2</sub> que será a área correspondente à parte incolor quando aplicada a fenolftaleína.

Na Figura 38, apresenta-se os resultados obtidos para as misturas produzidas com AN aos 7, 21 e 28 dias de ensaio. Relativamente ao 100CEM, notou-se, ao longo do tempo, uma profundidade muito reduzida quando comparada com a das restantes misturas. Se este ensaio apenas dependesse da porosidade dos provetes, os resultados seriam controversos visto serem muito diferentes aos apresentados pelo 100CV (aos 7 dias apresentam uma diferença de 9,7 mm mas aos 28 dias já é de 24,5 mm). Estes valores advêm do referido na secção anterior. Este ensaio apenas identifica o pH da mistura e é muito dependente da composição química da matriz dos betões. Sendo o betão 100CEM rico em Ca(OH)<sub>2</sub>, o seu pH tende a ser mais alcalino e estável do que o das restantes misturas, sendo assim mais difícil, após as reações com o CO<sub>2</sub>, baixar o mesmo pH para 8 tão rapidamente.

Para os BAA, através da literatura, seria de esperar que, quanto maior o conteúdo de CFRSU, maior seria a porosidade do material e, assim, maior seria a penetração de CO<sub>2</sub> no provete. No entanto, tal fenómeno não ocorre. É de evidenciar que, aos 7 dias de ensaio, os resultados seguem a tendência observada, sendo a profundidade de penetração de CO<sub>2</sub> cada vez maior até ao betão 75CV/25CF, diminuindo para o 50CV/50CF e voltando a aumentar para o betão 25CV/75CF. No entanto, tanto para 21 como para 28 dias esta tendência não é verificada. Se for analisado betão a betão, nota-se um aumento gradual em praticamente todas as misturas. Quanto maior for o tempo dentro da câmara de CO<sub>2</sub>, maior será a difusão deste para dentro do provete levando a uma maior penetração. Contudo, para a mistura 25CV/75CF, este aumento só ocorre até a 21 dias havendo uma queda a 28 dias (de 19,86 para 13,48 mm). Este fenómeno pode ter ocorrido devido a um problema na câmara de CO<sub>2</sub> que foi utilizada. Para uma boa condição de cura, é necessário que todos os provetes ensaiados recebam a mesma percentagem de CO<sub>2</sub>. No entanto, a câmara, além de ter estado desligada durante algum tempo por razões de

avaria, pode ter distribuído o CO<sub>2</sub> de forma deficiente, fazendo com que os valores do mesmo provete fossem muito distintos (visíveis em anexo, Tabela A.8) e alguns deles inconclusivos. Foi também notado que, ao longo do tempo, os provetes produzidos apenas com CV tiveram valores superiores aos dos restantes BAA (excepto a 7 dias). Este fenómeno deve-se ao facto de, enquanto as CV possuem um elevado grau de polimerização, as CFRSU, tendo partículas grandes e porosas, apresentam reactividade reduzida (Chindaprasirt et al., 2009). Por outras palavras, tendo as CV uma maior reactividade, é de esperar que, durante as reações de polimerização contínuas que ocorrem na matriz do betão, uma maior quantidade de OH<sup>-</sup> seja consumida. Estas reações provocam uma redução do pH da mistura que leva a um decréscimo mais rápido aquando das reações do CO<sub>2</sub>. Nos betões produzidos com CFRSU, visto haver um menor consumo contínuo do OH<sup>-</sup>, a sua matriz vai-se apresentar mais alcalina (pH mais elevado) sendo mais difícil de atingir pH abaixo de 8.

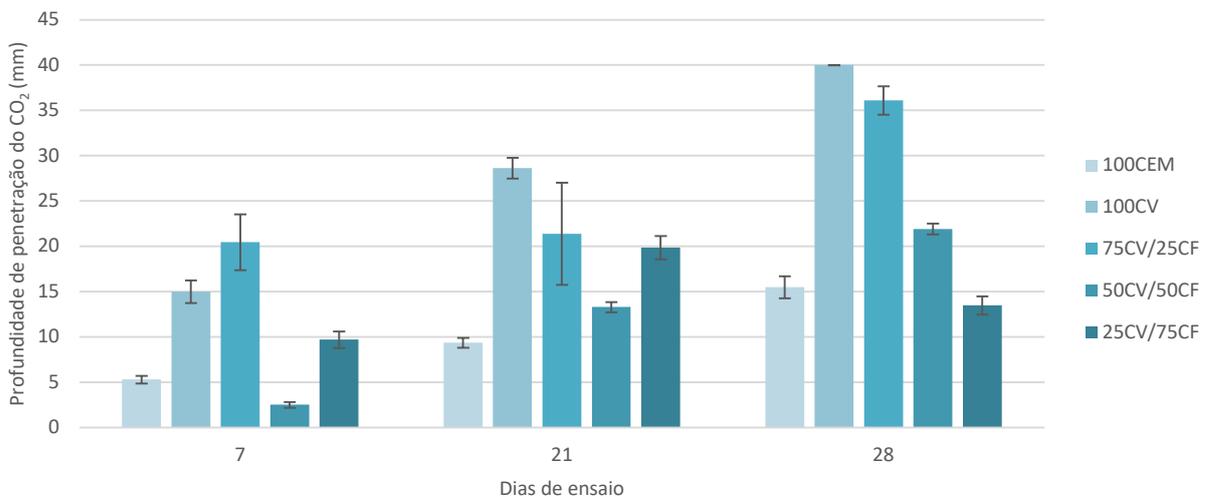


Figura 38 - Profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> nos provetes produzidos com AN

Na Figura 39 (e em anexo, Tabela A.9), são apresentados os valores resultantes da profundidade de penetração de CO<sub>2</sub> para as misturas produzidas com AR. Para todas as misturas ensaiadas, os valores obtidos foram inconclusivos, visto que se apresentavam carbonatados na sua totalidade, excepto na mistura de referência, produzida com 100% CP. Como seria de esperar, com a substituição de AN por AR, a penetração de CO<sub>2</sub> aumentou, visto que a sua porosidade também aumentou, havendo, para os 7, 21 e 28 dias do betão 100CP, um aumento de 136%, 75% e 78%, respectivamente.

No entanto, e como observado em investigações passadas, a entrada de CO<sub>2</sub> na matriz das misturas leva a um incremento da resistência do mesmo. Foi então realizado o ensaio da resistência à compressão para entender este efeito. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011) e foram testados cubos submetidos a uma cura em câmara de CO<sub>2</sub> durante 28 dias. Estes resultados foram assim comparados com os obtidos em cubos cujas condições de cura permaneceram as mesmas desde a produção do betão.

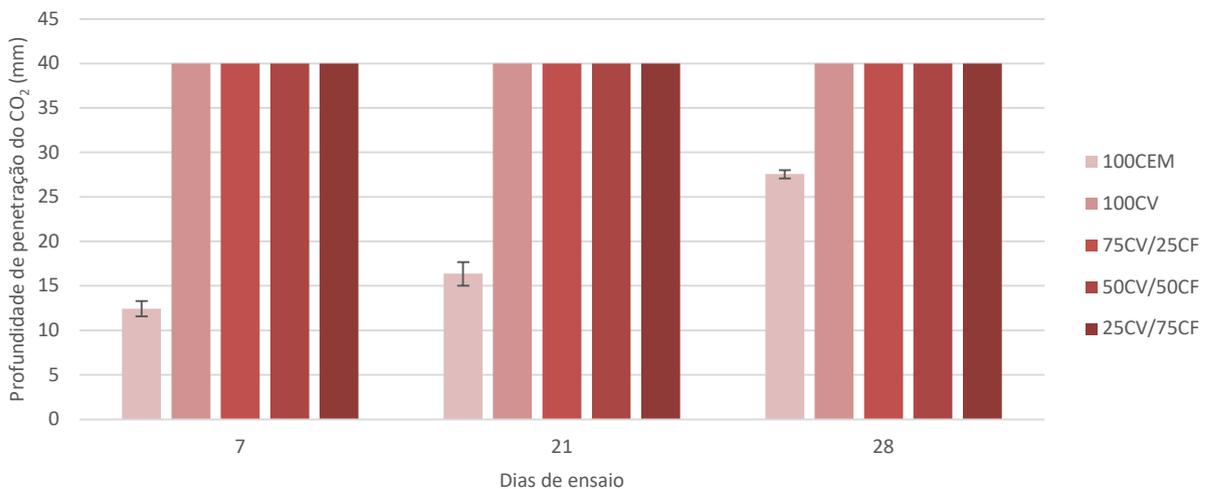


Figura 39 - Profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> nos provetes produzidos com AR

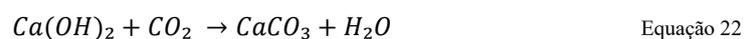
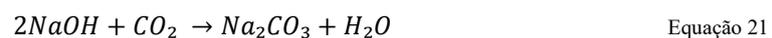
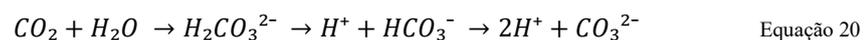
Os valores obtidos estão sumarizados na Tabela 17 e encontram-se na sua totalidade em anexo (Tabela A.10). Para os cubos submetidos a 56 dias de cura (28 dias em câmara seca + 28 dias em câmara de CO<sub>2</sub>), as compressões demonstraram valores superiores aos medidos em cubos que permaneceram apenas 28 dias em câmara seca. Este aumento significativo é explicado pelas reações químicas que se desenvolvem com a entrada do CO<sub>2</sub> na matriz da mistura. O processo inicia-se com a dissolução do CO<sub>2</sub> (Equação 20). Tal como referido, esta dissolução promove a diminuição de pH do betão devido à dissociação dos iões de bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) em iões hidrogénio (2H<sup>+</sup>) e iões carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Posteriormente, ocorre a reacção do CO<sub>2</sub> com os hidróxidos de metais alcalinos do ligante, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), silicatos e aluminatos. Assim, os iões carbonato formados, na presença de iões de cálcio da matriz do betão, formam os cristais de carbonato de cálcio (Equações 21 e 22).

Com o processo de dissolução do Ca(OH)<sub>2</sub>, ocorre uma difusão dos iões cálcio (Ca<sup>2+</sup>) para a superfície. Esta migração conduz à precipitação do CaCO<sub>3</sub> em cristais que vão preencher os

vazios da mistura, tornando-a mais densa e impermeável. Este efeito só ocorre enquanto existir  $\text{Ca(OH)}_2$  na matriz do betão. Quando este reagente deixa de existir, a formação de cristais deixa de acontecer, deixando de haver desenvolvimentos de resistência, havendo uma diminuição gradual da mesma. A presença de sílica na matriz do betão pode proporcionar outra reacção, ocorrendo assim a formação do gel de dióxido de silício, mais conhecido como sílica-gel ( $\text{SiO}_2$  (gel)), melhorando também as suas propriedades microestruturais (Equação 23).

Tabela 17 - Resistência à compressão antes e após cura em câmara de  $\text{CO}_2$

Misturas	Antes $\text{CO}_2$ (MPa)	Após $\text{CO}_2$ (MPa)	Aumento (MPa)
100 CEM:AN	48,5	64,9	+16,4
100CV:AN	27,6	38,4	+10,8
75CV/25CF:AN	12,1	21,1	+9
50CV/50CF:AN	11,0	24,5	+13,5
25CV/75CF:AN	6,8	21,7	+14,9
100 CEM:AR	26,3	34,8	+8,5
100CV:AR	3,4	7,3	+3,9
75CV/25CF:AR	4,4	11,8	+7,4
50CV/50CF:AR	1,4	4,3	+2,9
25CV/75CF:AR	1,0	5,5	+4,5



O maior aumento relativo deu-se em misturas cuja constituição apresentava um maior teor de CFRSU, uma vez que este é um ligante com um teor relativamente elevado de cálcio, chegando a atingir, para a mistura produzida com AN, um aumento de 14,9 MPa. Comparando os dois grupos, nota-se um maior incremento nas famílias produzidas com AN, tendo os BAA produzidos com CFRSU apresentado um aumento médio de 12,5 MPa, três vezes maior do que os produzidos com AR (aumento médio de 4,9 MPa).

## 5 Conclusão

### 5.1 Considerações finais

A sustentabilidade na indústria da construção tem vindo a ser um tema cada vez mais falado em Portugal. Após a crise que o sector da construção enfrentou, este tem vindo a mostrar um crescimento contínuo, levando a um aumento não só das emissões de poluentes para a atmosfera como do consumo de matérias-primas não renováveis. Por este motivo, é cada vez mais importante a questão ambiental no sector, sendo a necessidade de encontrar novas alternativas um aspecto importante para reduzir essa “pegada ecológica”.

Uma alternativa passa pelo aproveitamento de resíduos que, não sendo utilizados, iriam ser colocados em aterro. Tanto as CFRSU como os AR, ao serem reciclados, proporcionam vantagens ambientais, permitindo assim a diminuição das extracções de recursos naturais e a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O estudo de betões produzidos com este tipo de materiais permitiu compreender os efeitos que os mesmos têm sobre as propriedades estudadas, possibilitando perceber quais as suas vantagens e desvantagens. Sendo o estudo de BAA produzidos com CFRSU um tema muito recente na actualidade, estes resultados são um bom alicerce para investigações futuras.

### 5.2 Conclusões gerais

Durante a primeira fase (secção 2), foi realizada a revisão da literatura acerca de BAA produzidos à base de CV e CFRSU, tanto com AN como com AR. Esta fase teve o intuito de compreender não só o papel da activação alcalina em betões produzidos com CV e CFRSU, bem como o comportamento dos mesmos aquando da utilização de AR na sua totalidade. Na segunda fase (secção 3), foram definidos todos os detalhes do plano experimental, começando pela definição das misturas e quantidades referentes, passando por todos os ensaios realizados aos mesmos, onde foram definidas as normas utilizadas e executados os ensaios. A última fase (secções 4 e 5) deste estudo passou pela análise destes resultados e referentes conclusões, sempre comparando estes com a informação obtida durante a primeira fase. Os valores dos ensaios e respectivas conclusões apresentadas na secção 4, relativamente ao betão no seu estado fresco e endurecido, estão sumarizadas na presente secção.

### 5.2.1 Betões no estado fresco

Foram realizados dois ensaios sendo eles a trabalhabilidade, medida através do abaixamento do cone de Abrams, e a massa volúmica. Para todas as misturas, utilizou-se uma relação de a/l igual a 0,5.

Concluiu-se que apenas os betões produzidos com CP cumpriram os requisitos inicialmente definidos. Todas as misturas activadas alcalinamente apresentaram valores de abaixamento maiores do que 220 mm. De referir que este estudo foi o primeiro no âmbito do projecto de investigação RINOPOLYCRETE a produzir e ensaiar betões activados alcalinamente e que as proporções escolhidas para as misturas foram provenientes de misturas óptimas para argamassas com trabalhabilidade equiparável a misturas de referência. Apesar de se ter identificado a discrepância entre os betões de referência e os activados alcalinamente quanto à trabalhabilidade, para manter esta propriedade como constante entre as diversas misturas, seria necessária uma etapa de acerto da trabalhabilidade. Para além da falta de tempo para concretizar a mesma, seria expectável que as misturas resultantes necessitassem de uma alteração significativa na formulação, como por exemplo a diminuição da relação a/l para diminuir a plasticidade das misturas activadas alcalinamente.

### 5.2.2 Betões no estado endurecido

Durante o estado endurecido do betão, foram realizados seis ensaios de durabilidade distintos sendo eles retracção normal, retracção autogénea, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, penetração dos iões cloreto e carbonatação. O estudo foi ainda complementado por um ensaio à compressão, antes e após cura em câmara de CO<sub>2</sub>.

Todos os resultados destes ensaios são resumidos nas Tabelas 19 e 20, sendo que a Tabela 19 apresenta os valores correspondentes aos betões produzidos com AN e a Tabela 20 os valores que correspondem aos betões produzidos com AR. Em ambas as tabelas, são apresentadas as variações verificadas após uma comparação dos betões produzidos com o betão de referência (produzido com CP). Para a resistência à compressão, é feita uma comparação antes e após o processo de carbonatação.

Os BAA, em comparação com os seus congéneres cimentícios, apresentaram um pior desempenho de uma forma geral apesar de terem exibido melhores resultados nalgumas propriedades.

Atendendo às retracções, concluiu-se que os BAA apresentam muito menores valores do que o betão de referência. Estes resultados mostram-se como os esperados de acordo com os reportados na literatura. Com o aumento da percentagem de substituição das CFRSU, o esperado aumento da retracção com maiores quantidades de CFRSU apenas se diferenciou no betão produzido com 50% deste ligante, apresentando este os valores mais baixos de retracção.

Tabela 18 - Comparação dos resultados entre os betões produzidos com AN no estado endurecido

	100CEM:AN (REF)	100CV:AN	75CV/25CF:AN	50CV/50CF:AN	25CV/75CF:AN
Retracção (µm/mm)	528	157 ↓	192 ↓	104 ↓	199 ↓
Retracção autógena (µm/mm)	384	178 ↓	76 ↓	42 ↓	252 ↓
Absorção por capilaridade 72 horas (g/mm <sup>2</sup> )	0,42	0,51 (+21%) ↑	0,88 (+109%) ↑	0,41 (-2%) ↓	0,46 (+10%) ↑
Absorção por imersão (%)	12,2	16,8 (+4.6%) ↑	17,9 (+5.7%) ↑	13,5 (+1.3%) ↑	16,2 (+4%) ↑
Cloretos (mm)	20,9	21,4 (+2%) ↑	22,2 (+6%) ↑	20,1 (-4%) ↓	21,4 (+2%) ↑
Carbonatação 7 dias (mm)	5,28	14,98 (+183%) ↑	20,46 (+288%) ↑	2,51 (-52%) ↓	9,69 (+84%) ↑
Carbonatação 21 dias (mm)	9,35	28,62 (+206%) ↑	21,38 (+129%) ↑	13,28 (+42%) ↑	19,86 (+112%) ↑
Carbonatação 28 dias (mm)	15,48	40 (+158%) ↑	36,09 (+133%) ↑	21,91 (+42%) ↑	13,48 (-13%) ↓
Compressão antes CO <sub>2</sub> (MPa)	48,5	27,6	12,1	11,0	6,8
Compressão após CO <sub>2</sub> (MPa)	64,9 (+16,4) ↑	38,4 (+10,8) ↑	21,1 (+9) ↑	24,5 (+13,5) ↑	21,7 (+14,9) ↑

Legenda:



Valor superior ao de referência apresentando melhores resultado



Valor superior ao de referência apresentando piores resultado



Valor inferior ao de referência apresentando melhores resultado

Nos restantes ensaios de durabilidade realizados, a maior parte dos BAA mostrou uma perda de desempenho considerável. Apenas o betão produzido com 50% de CV e 50% de CFRSU apresentou melhorias quando comparado com o betão de referência. Contudo, estes valores não eram os esperados uma vez que deveria haver uma perda de desempenho contínua nas propriedades com o aumento do conteúdo de CFRSU. Verifica-se esta tendência para os betões 75CV/25CF e 25CV/75CF, mas a mistura intermédia 50CV/50CF mostra resultados fora da linha de progressão. Tendo em conta os resultados anormais, assume-se que possa ter ocorrido e.g. uma pesagem deficiente dos constituintes do betão. Deste modo, foi realizada uma nova

betonagem da mistura 50CV/50CF. Os resultados da mesma ainda não foram obtidos aquando da escrita do presente documento.

No ensaio de resistência mecânica, a cura de BAA em câmara de CO<sub>2</sub> apresentou valores muito positivos. Sendo esta propriedade uma das mais preocupantes para BAA produzidos com CFRSU (todos os provetes apresentaram valores abaixo de 15 MPa antes da cura referida), após serem submetidos durante 28 dias a um ambiente rico em CO<sub>2</sub>, as suas resistências à compressão aumentaram substancialmente. Estes valores chegaram a atingir aumentos acima dos 10 MPa (14,9 MPa para o betão produzido com maior quantidade de CFRSU). O único que não atingiu aumento acima de 10 MPa foi o betão com 75% de CV, que apresentou um aumento de 9 MPa.

Tabela 19 - Comparação dos resultados entre os betões produzidos com AR no estado endurecido

	100CEM:AN (REF)	100CV:AN	75CV/25CF:AN	50CV/50CF:AN	25CV/75CF:AN
Retracção (µm/mm)	453	113	109	116	127
Retracção autogénea (µm/mm)	33	-27	14	-13	-90
Absorção por capilaridade 72 horas (g/mm <sup>2</sup> )	0,81	2,48 (+206%)	2,12 (+162%)	2,32 (+186%)	2,22 (+174%)
Absorção por imersão (%)	21,2	29 (+7.8%)	24,7 (+3.5%)	28,2 (+7%)	27,8 (+6.6%)
Carbonatação 7 dias (mm)	12,45				
Carbonatação 21 dias (mm)	16,36		Provetes totalmente carbonatados		
Carbonatação 28 dias (mm)	27,57				
Compressão antes CO <sub>2</sub> (MPa)	26,3	3,4	4,4	1,4	1,0
Compressão após CO <sub>2</sub> (MPa)	34,8 (+8,5)	7,3 (+3,9)	11,8 (+7,4)	4,3 (+2,9)	5,5 (+4,5)

Legenda:

-  Valor superior ao de referência apresentando melhores resultado
-  Valor superior ao de referência apresentando piores resultado
-  Valor inferior ao de referência apresentando piores resultado
-  Valor inferior ao de referência apresentando melhores resultado

Os betões produzidos com AR apresentaram uma tendência semelhantes aos referidos acima, mas com um declive de perda de desempenho mais acentuado. Para a retracção, voltaram a apresentar valores mais baixos relativamente aos que ocorreram no betão de referência. No entanto, para a retracção autogénea, foi notado que alguns betões, nomeadamente o 100CV, 50CV/50CF e o 25CV/75CF, mantiveram-se estáveis dimensionalmente.

Nos restantes ensaios de durabilidade, foi observado, tal como para os produzidos com AN, uma grande perda nas propriedades dos BAA. Comparando os BAA entre si, foi também notado que ocorreram diversas oscilações tendo havido ensaios em que os melhores resultados foram apresentados nos betões com maior quantidade de CFRSU. Este fenómeno vai contra o que era esperado uma vez que, quanto maior o conteúdo de CFRSU, piores deveriam ser as propriedades. Nos ensaios de absorção de água, devido às grandes perdas de massa quando os provetes eram colocados dentro de água, a massa total do provete depois do ensaio não aumentou tanto quanto esperado. Tal fenómeno torna grande parte dos valores (nos ensaios dependentes de água) inconclusivos.

Para o ensaio de compressão após cura em câmara de CO<sub>2</sub>, os valores apresentaram-se de novo animadores visto que voltaram a apresentar um aumento, no entanto, este não foi tão grande como os observados nos produzidos com AN (os BAA produzidos com CFRSU apresentaram um aumento médio de 5 MPa).

Comparando os resultados dos betões produzidos com AN com os produzidos com AR (Tabela 21), os provetes produzidos com AR apresentam sempre um pior desempenho. Estes advêm das piores propriedades microscópicas que os AR possuem, tornando a mistura muito mais porosa e possibilitando também a migração de compostos reactivos do AA para dentro da microestrutura dos próprios AR. No entanto, para a retracção, os provetes com AR apresentaram menores valores. Devido à grande porosidade dos AR era esperado que estes apresentassem maiores retracções comparando com os betões com AN. Contudo, como explicado por Lee et al. (2018), os AR podem funcionar como um reservatório de água dentro do betão. Absorvem a água da amassadura e, com o decorrer do tempo, vão hidratando o betão impedindo assim que ele retraia.

Relativamente à compressão, são notados, em todas as famílias, maiores valores para os betões produzidos com AN. Este comportamento seria o esperado uma vez que os betões produzidos com AR apresentam piores características, sendo menos densos e mais porosos que os produzidos com AN.

Tabela 20 - Comparação dos resultados entre as famílias produzidas com AN e AR no estado endurecido

Propriedade	100CEM			100CV			75CV/25CF			50CV/50CF			25CV/75CF		
	AN	AR		AN	AR		AN	AR		AN	AR		AN	AR	
Retracção (µm/mm)	528	453	↓	157	113	↓	192	109	↓	104	116	↓	199	127	↓
Retracção autogénea (µm/mm)	384	33	↓	178	-27	↓	76	14	↓	42	-13	↓	252	-90	↓
Absorção por capilaridade <sup>72</sup> horas (g/mm <sup>2</sup> )	0,42	0,81	↑	0,51	2,48	↑	0,88	2,12	↑	0,41	2,32	↑	0,46	2,22	↑
Absorção por imersão (%)	12,2	21,2	↑	16,8	29	↑	17,9	24,7	↑	13,5	28,2	↑	16,2	27,8	↑
Carbonatação 7 dias (mm)	5,28	12,5	↑	15,0	Total (inc.)	↑	20,5	Total (inc.)	↑	2,51	Total (inc.)	↑	9,69	Total (inc.)	↑
Carbonatação 21 dias (mm)	9,35	16,4	↑	28,6	Total (inc.)	↑	21,4	Total (inc.)	↑	13,3	Total (inc.)	↑	19,9	Total (inc.)	↑
Carbonatação 28 dias (mm)	15,8	27,6	↑	Total (inc.)	Total (inc.)	⊞	36,1	Total (inc.)	↑	21,9	Total (inc.)	↑	13,5	Total (inc.)	↑
Compressão antes CO <sub>2</sub> (MPa)	48,5	26,3	↓	27,6	3,4	↓	12,1	4,4	↓	11,0	1,4	↓	6,8	1,0	↓
Compressão após CO <sub>2</sub> (MPa)	64,9	34,8	↓	38,4	7,3	↓	21,1	11,8	↓	24,5	4,3	↓	21,7	5,5	↓

Legenda

- Valor superior ao de referência apresentando melhores resultado
- Valor superior ao de referência apresentando piores resultado
- Valor inferior ao de referência apresentando piores resultado
- Valor inferior ao de referência apresentando melhores resultado

## Bibliografia

ABDOLLAHNEJAD, Z., MASTALI, M., FALAH, M., LUUKKONEN, T., MAZARI, M. & ILLIKAINEN, M. 2019a. Construction and Demolition Waste as Recycled Aggregates in Alkali-Activated Concretes. *Materials*, 12, 22.

ABDOLLAHNEJAD, Z., MASTALI, M., FALAH, M., LUUKKONEN, T., MAZARI, M. & ILLIKAINEN, M. 2019b. Construction and demolition waste as recycled aggregates in alkali-activated concretes. 12, 4016.

- AHMED, S. F. U. 2013. Properties of concrete containing construction and demolition wastes and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1864-1870.
- ASSI, L. N., EDDIE DEEVER, E. & ZIEHL, P. 2018. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380.
- ASTM C1585-13. 2013. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. American Society for Testing and Materials.
- ASTM C618. 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.
- ATIŞ, C. D., GÖRÜR, E. B., KARAHAN, O., BILIM, C., İLKENTAPAR, S. & LUGA, E. 2015. Very high strength (120MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials*, 96, 673-678.
- AVILA, Y., SILVA, R. V. & DE BRITO, J. 2022. Alkali-Activated Materials with Pre-Treated Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. 12, 3535.
- BENHELAL, E., ZAHEDI, G., SHAMSAEI, E. & BAHADORI, A. 2013. Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161.
- BS EN 933-11. 2009. Test for geometrical properties of aggregates: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate. British Standards Institution.
- CAI, H. Y., ZHANG, M. & DANG, L. B. 2012. Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete with Different Replacement Ratios. 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials (CEABM 2012), May 25-27 2012 Yantai. STAF A-ZURICH: Trans Tech Publications Ltd, 1277-1280.
- CASANOVA, S., SILVA, R. V., DE BRITO, J. & PEREIRA, M. F. C. 2021. Mortars with alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash and fine recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 289, 12.
- CHANG, F. Y. & WEY, M. Y. 2006. Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes. *J Hazard Mater*, 138, 594-603.
- CHI, M. & HUANG, R. 2013. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. 40, 291-298.
- CHIMENOS, J. M., SEGARRA, M., FERNANDEZ, M. & ESPIELL, F. 1999. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials*, 64, 211-222.
- CHINDAPRASIRT, P. & CHALEE, W. 2014. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. 63, 303-310.
- CHINDAPRASIRT, P., JATURAPITAKKUL, C., CHALEE, W. & RATTANASAK, U. 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29, 539-543.
- DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. First international conference on alkaline cements and concretes, 1994. Kiev State Technical University Kiev, Ukraine, 131-149.
- DAVIDOVITS, J. 2020. Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition.
- DHIR, R. K., BRITO, J., LYNN, C. J. & SILVA, R. V. 2018. 4 - Municipal Incinerated Bottom Ash Characteristics. In: DHIR, R. K., BRITO, J. D., LYNN, C. J. & SILVA, R. V. (eds.) *Sustainable Construction Materials*. Woodhead Publishing.
- EN 1015-11. 2011. Method of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- FAN, C. C., HUANG, R., HWANG, H. & CHAO, S. J. 2016. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708-715.

- FANG, G. H., HO, W. K., TU, W. L. & ZHANG, M. Z. 2018. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 172, 476-487.
- FARHAN, N. A., SHEIKH, M. N. & HADI, M. N. S. 2019. Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 26-42.
- FERNANDEZ-JIMENEZ, A. M., PALOMO, A. & LOPEZ-HOMBRADOS, C. 2006. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. 103, 106.
- HANJITSUWAN, S., PHOO-NGERNKHAM, T. & DAMRONGWIRIYANUPAP, N. 2017. Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 133, 128-134.
- HOORNWEG, D. & BHADA-TATA, P. 2012. What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. *Urban Development Series Knowledge Papers no. 15*.
- HUANG, J., ZOU, C., SUN, D., YANG, B. & YAN, J. Effect of recycled fine aggregates on alkali-activated slag concrete properties. *Structures*, 2021. Elsevier, 89-99.
- ISMAIL, I., BERNAL, S. A., PROVIS, J. L., SAN NICOLAS, R., BRICE, D. G., KILCULLEN, A. R., HAMDAN, S. & VAN DEVENTER, J. S. J. 2013. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48, 1187-1201.
- JATURAPITAKKUL, C. & CHEERAROT, R. 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material. 15, 48-53.
- JIN, L., HUANG, G., LI, Y., ZHANG, X., JI, Y. & XU, Z. 2021. Positive Influence of Liquid Sodium Silicate on the Setting Time, Polymerization, and Strength Development Mechanism of MSWI Bottom Ash Alkali-Activated Mortars. 14, 1927.
- KRIVENKO, P. 2017. Why Alkaline Activation-60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8, 323-334.
- LEDESMA, E. F., JIMENEZ, J. R., FERNANDEZ, J. M., GALVIN, A. P., AGRELA, F. & BARBUDO, A. 2014. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 71, 289-298.
- LEE, N. K., ABATE, S. Y. & KIM, H.-K. 2018. Use of recycled aggregates as internal curing agent for alkali-activated slag system. *Construction and Building Materials*, 159, 286-296.
- LI, Z., LIU, J., XIAO, J. & ZHONG, P. 2020. Internal curing effect of saturated recycled fine aggregates in early-age mortar. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103444.
- LIU, S., HAO, Y. & MA, G. 2021. Approaches to enhance the carbonation resistance of fly ash and slag based alkali-activated mortar- experimental evaluations. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124321.
- LNEC E-391. 1993. Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.
- LNEC E-393. 1993. Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.
- LNEC E-394. 1993. Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.
- LNEC E-398. 1993. Betões. Determinação da retracção e da expansão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal. AA
- MALHOTRA, V. M. & MEHTA, P. K. 1996. Pozzolanic and Cementitious Materials. 1st ed.
- MAO, Y., LIU, J. & SHI, C. 2021. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126435.

- MASTALI, M., ABDOLLAHNEJAD, Z. & PACHECO-TORGAL, F. 2018. Performance of waste based alkaline mortars submitted to accelerated carbon dioxide curing. *Resources Conservation and Recycling*, 129, 12-19.
- MORANDEAU, A., THIÉRY, M. & DANGLA, P. 2014. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. *Cement and Concrete Research*, 56, 153-170.
- NENO, C., DE BRITO, J. & VEIGA, R. 2014. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 17, 168-177.
- NORGAARD, K. P., HYKS, J., MULVAD, J. K., FREDERIKSEN, J. O. & HJELMAR, O. 2019. Optimizing large-scale ageing of municipal solid waste incinerator bottom ash prior to the advanced metal recovery: Phase I: Monitoring of temperature, moisture content, and CO<sub>2</sub> level. *Waste Management*, 85, 95-105.
- NP EN 1097-3. 2003. Ensaios para determinação física e mecânica de agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volumica e vazios. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 1097-6. 2003. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 12350-2. 2002. Ensaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 12350-6. 2002. Ensaios do betão fresco. Parte 6: massa volúmica. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 12390-3. 2011. Ensaios do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 206:2013+A1. 2017. Betão Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 933-1. 2000. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NP EN 933-2. 1999. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 2: determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- NT BUILD 492. 1999. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordic Innovation Centre: Oslo, Norway.
- NUAKLONG, P., SATA, V. & CHINDAPRASIRT, P. 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- NUAKLONG, P., SATA, V. & CHINDAPRASIRT, P. 2018. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. 161, 365-373.
- ODERJI, S. Y., CHEN, B., SHAKYA, C., AHMAD, M. R. & SHAH, S. F. A. 2019. Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 229, 116891.
- OLIVIA, M. & NIKRAZ, H. 2008. Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete.
- PARTHIBAN, K. & MOHAN, K. S. R. 2017. Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 65-72.
- PASUPATHY, K., BERNDT, M., SANJAYAN, J., RAJEEV, P. & CHEEMA, D. S. 2018. Durability performance of precast fly ash-based geopolymer concrete under atmospheric exposure conditions. 30, 04018007.
- RAJAMANE, N. P., NATARAJA, M., LAKSHMANAN, N. & DATTATREYA, J. 2011. Rapid chloride permeability test on geopolymer and Portland cement. 21-6.
- RANGAN, B. 2008. Fly ash-based geopolymer concrete. Curtin University of Technology., 1-44.

- RODRIGUES, F., EVANGELISTA, L. & DE BRITO, J. 2013. A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 16, 1045-1051.
- RUENGSIAPPANUN, K., UDTARANAKRON, T., PULNGERN, T., TANGCHIRAPAT, W. & JATURAPITAKKUL, C. 2021. Mechanical properties, shrinkage, and heat evolution of alkali activated fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 123954.
- SAIKIA, N., MERTENS, G., VAN BALEN, K., ELSSEN, J., VAN GERVEN, T. & VANDECASTEELE, C. 2015. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 96, 76-85.
- SEVERO, C., COSTA, D., BEZERRA, I., MENEZES, R. & NEVES, G. 2013. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. 8, 55-67.
- SHAIKH, F. U. A. 2016. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5, 277-287.
- SHI, C. 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 34, 537-545.
- SHI, X. S., COLLINS, E. G., ZHAO, X. L. & WANG, Q. Y. 2012. Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 237, 20-29.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J. & DHIR, R. K. 2014. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J. & DHIR, R. K. 2015. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 77, 327-339.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J. & DHIR, R. K. 2016. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171-2186.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J., LYNN, C. J. & DHIR, R. K. 2017. Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali activated materials, ceramics and granular applications: A review. *Waste Management*, 68, 207-220.
- THOMAS, R. J., LEZAMA, D. & PEETHAMPARAN, S. 2017. On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing. *Cement and Concrete Research*, 91, 13-23.
- TORGAL, F. P. & JALALI, S. 2010. *A sustentabilidade dos materiais de construção*.
- XIAO, J. 2018. Recycled Aggregates. In: XIAO, J. (ed.) *Recycled Aggregate Concrete Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- XU, G. & SHI, X. M. 2018. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources Conservation and Recycling*, 136, 95-109.
- YANG, K.-H., CHUNG, H.-S. & ASHOUR, A. F. 2008. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.
- ZHANG, L., JI, Y., LI, J., GAO, F. & HUANG, G. 2019. Effect of retarders on the early hydration and mechanical properties of reactivated cementitious material. *Construction and Building Materials*, 212, 192-201.
- ZHU, H., ZHANG, Z., ZHU, Y. & TIAN, L. 2014. Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars. 65, 51-59.
- ZHUANG, X. Y., CHEN, L., KOMARNENI, S., ZHOU, C. H., TONG, D. S., YANG, H. M., YU, W. H. & WANG, H. 2016. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. 125, 253-267.

## Anexos

Tabela A1 - Distribuição granulométrica dos AN utilizados

D (mm)	D <sup>1/5</sup>	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Bago de arroz (%)	Brita 1 (%)	Brita 2 (%)
22,4	1,86	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	1,82	100,00	100,00	100,00	100,00	87,10
16	1,74	100,00	100,00	100,00	100,00	45,29
14	1,70	100,00	100,00	100,00	100,00	26,81
12,5	1,66	100,00	100,00	100,00	99,78	13,89
11,2	1,62	100,00	100,00	100,00	96,14	5,66
10	1,58	100,00	100,00	100,00	84,00	1,68
8	1,52	100,00	99,69	100,00	50,83	0,00
6,3	1,45	100,00	99,35	99,67	16,42	0,00
5,6	1,41	100,00	98,87	94,43	6,76	0,00
4	1,32	99,97	96,82	26,29	1,47	0,00
2	1,15	99,87	83,47	3,31	0,00	0,00
1	1,00	98,89	46,71	1,12	0,00	0,00
0,5	0,87	80,21	16,22	0,00	0,00	0,00
0,25	0,76	28,89	8,48	0,00	0,00	0,00
0,125	0,66	0,35	0,93	0,00	0,00	0,00
0,0625	0,57	0,06	0,26	0,00	0,00	0,00

Tabela A2 - Resultados do ensaio de retracção nas famílias de betão produzido com AN ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

		100 CEM:AN		100 CV:AN		75CV/25CF:AN		50CV/50CF:AN		25CV/75CF:AN	
		Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea
Idade (dias)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2					-55,1	-47,6	0,0	1,7	-23,4	0,0
	3					-104,3	-47,6			-26,7	-5,0
	4			-22,5	-15,9						
	5	-181,9	-60,0	-36,7	-17,5			-3,3	11,7	-60,1	-34,2
	6	-205,3	-61,3					-11,7	18,4		
	7	-218,7	-63,5	-34,2	-19,2	-139,4	-53,4	-13,4	25,0		
	8			-41,7	-23,4	-139,4	-65,1				
	9					-142,7	-66,8	-25,0	16,7	-88,5	-44,2
	10					-146,9	-67,6			-88,5	
	11	-278,8	-103,5								
	12	-302,1	-110,2	-50,1	-28,4						
	13	-302,1						-20,0	20,0		
	14	-328,8	-110,2			-148,6	-83,5				
	15	-338,9	-110,2			-153,6	-88,5				
	16					-149,4	-80,1				
	17					-148,6	-89,3				
	18			-76,0	-47,6						
	19	-388,9	-130,2								
	20	-398,9	-131,9			-158,6	-79,3				
	21	-412,3	-140,2			-161,9	-83,5				
	22	-424,0	-148,6			-161,9	-84,3				
	23					-168,6	-84,3				
	24					-167,8	-82,6			-156,9	-131,8
	25			-98,5	-77,6						
	26	-459,0	-190,3								
	27	-460,7	-202,0			-171,1	-86,8				
	28	-455,7	-203,6			-180,3	-87,6	-100,1	-16,7		
	29	-462,4	-217,0			-175,3	-86,8				
	30										
	31										
	32	-482,4	-243,7	-124,4	-105,2						
	33	-492,4	-258,7								
	34	-495,8	-268,7								
	35					-176,1	-87,6				
	36					-175,3	-77,6				
	37					-178,6	-81,8				
	38										
	39	-509,1	-320,5	-124,4	-110,2						
	40	-509,1	-323,8								
	41	-519,1									
	42										
	43										
	44									-158,6	-186,1
	45										
	46										
	47										
	48					-183,6	-78,4	-80,1	-48,4		

Tabela A2 - Resultados do ensaio de retração nas famílias de betão produzido com AN ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) (continuação)

49										
50										
51										
52										
53										
54										
55										
56										
57										
58										
59	-522,5	-365,5								
60										
61										
62										
63										
64										
65										
66										
67										
68										
69										
70					-192,0	-75,1				
71										
72										
73										
74										
75			-156,9	-177,8					-195,3	-238,6
76										
77										
78										
79							-93,5	-3,3		
80										
81										
82	-527,5	-383,9								
83										
84										
85										
86										
87									-198,7	-252,0
88										
89										
90										
91	-528,0	-384,0	-157,0	-177,9	-192,0	-76,2	-103,5	-41,7	-199,1	-252,0

Tabela A3 - Resultados do ensaio de retracção nas famílias de betão produzido com AR ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

	100 CEM:AN		100 CV:AN		75CV/25CF:AN		50CV/50CF:AN		25CV/75CF:AN	
	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea	Normal	Autogénea
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	4,2	5,0	16,7	33,4	60,1	23,4	25,9	-15,0	-6,7
3	-29,2	3,3	2,5	23,4	34,2	52,6	0,0	0,0	-10,0	-6,7
4	-35,1	10,0			14,2	30,0	11,7	7,5	13,4	5,0
5									13,4	-8,3
6										
7	-66,8	20,0	3,3	31,7						
8	-103,5	-20,0	7,5	30,0						
9	-111,0	-5,8	3,3	31,7	-12,5	15,0	7,5	4,2	10,0	1,7
10	-126,9	-5,0	2,5	32,5	-30,1	-0,8	3,3	21,7	-8,3	-1,7
11					-25,9	11,7	8,3	24,2		
12							-5,8	11,7	-1,7	66,7
13			6,7	33,4						
14	-171,9	-5,8	2,5	34,2						
15	-183,6	0,0			-50,9	-14,2				
16					-33,4	-8,3	-10,9	23,4		
17	-199,5	5,0	-0,8	30,9			-11,7	20,9		
18	-205,3	3,3			-25,0	-9,2			-11,7	155,2
19					-29,2	-12,5	-12,5	18,4	-20,0	168,5
20										
21										
22	-237,1	-2,5			-38,4	-14,2				
23	-246,2	-1,7			-45,9	-16,7			-46,7	168,5
24	-239,6	14,2			-31,7	-4,2			-48,4	155,2
25	-252,1	9,2			-31,7	-1,7	-35,1	10,0	-48,4	153,5
26			-23,4	29,2	-33,4	-7,5	-36,7	20,0	-48,4	153,5
27										
28	-290,5	-2,5								
29										
30					-38,4	-5,0	-52,6	30,0	-75,1	148,5
31					-35,1	-5,0				
32	-293,0	-1,7								
33							-55,1	25,0		
34										
35										
36	-309,7	-4,2							-90,2	141,8
37										
38										
39					-42,6	-5,8				
40					-45,1	-6,7				
41										
42										
43							-75,1	30,9		
44	-352,2	-19,2			-50,1	-4,2				
45										
46									-103,5	105,1
47										
48										
49										
50										
51										
52										
53							-83,5	37,6		
54										
55										
56										

Tabela A3 - Resultados do ensaio de retracção nas famílias de betão produzido com AR ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) (continuação)

57			-46,7	48,4	-84,3	-9,2				
58										
59										
60										
61										
62										
63										
64										
65										
66										
67					-100,2	-12,5				
68										
69										
70										
71										
72	-412,3	-31,7								
73										
74								-126,9	90,1	
75										
76										
77			-102,7	48,4						
78			-121,8	40,1						
79										
80										
81							-116,0	12,5		
82	-449,8	-32,0								
83										
84										
85										
86										
87										
88										
89										
90										
91	-453,2	-33,4	-112,7	26,7	-109,4	-14,2	-116,3	12,9	-127,0	90,0

Tabela A4 - Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade nas famílias de betão produzido com AN

Misturas	Horas	Massa (g)	$\Delta$ Massa	C (g/mm <sup>2</sup> )	Média (C)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	0h	5064	0,0	0,00	0,00	0,00
		4954,3	0,0	0,00		
		4936,65	0,0	0,00		
		5024,45	0,0	0,00		
	3h	5080,3	16,3	0,16	0,16	0,00
		4969,7	15,4	0,15		
		4952,1	15,5	0,15		
		5040,4	15,9	0,16		
	6h	5083,9	19,9	0,20	0,19	0,01
		4973,1	18,8	0,19		
		4955,1	18,5	0,18		
		5044	19,6	0,20		
	24h	5094	30,0	0,30	0,29	0,01
		4983,8	29,5	0,30		
		4964,7	28,1	0,28		
5053,4		28,9	0,29			
72h	5108,2	44,2	0,44	0,42	0,02	
	4997,9	43,6	0,44			
	4977,1	40,5	0,40			
	5065,9	41,4	0,41			
100 CV:AN	0h	5189,85	0,0	0,00	0,00	0,00
		5121,5	0,0	0,00		
		5454,1	0,0	0,00		
		5171,85	0,0	0,00		
	3h	5205,1	15,3	0,15	0,13	0,02
		5136,6	15,1	0,15		
		5465,5	11,4	0,11		
		5182	10,1	0,10		
	6h	5209,5	19,6	0,20	0,17	0,03
		5142,1	20,6	0,21		
		5468,6	14,5	0,15		
		5184,8	12,9	0,13		
	24h	5223,3	33,4	0,33	0,29	0,05
		5156,7	35,2	0,35		
		5478,2	24,1	0,24		
5195,9		24,0	0,24			
72h	5246,3	56,4	0,56	0,51	0,10	
	5186,5	65,0	0,65			
	5495,7	41,6	0,42			
	5213,5	41,6	0,42			
75CV/25CF:AN	0h	5463,4	0,0	0,00	0,00	0,00
		5346,4	0,0	0,00		
		5561,5	0,0	0,00		
		5425,5	0,0	0,00		
	3h	5478,9	15,5	0,16	0,18	0,01
		5365,7	19,3	0,19		
		5578,3	16,8	0,17		
		5444,1	18,6	0,19		
	6h	5486,7	23,3	0,23	0,26	0,03
		5375,5	29,1	0,29		
		5584,5	23,0	0,23		
		5452,5	27,0	0,27		

Tabela A4 - Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade nas famílias de betão produzido com AN  
(continuação)

75CV/25CF:AN	24h	5513,5	50,1	0,50	0,51	0,06	
		5405,9	59,5	0,60			
		5605,6	44,1	0,44			
		5473,9	48,4	0,48			
	72h	5549,7	86,3	0,86	0,88	0,07	
		5444,8	98,4	0,98			
		5640,9	79,4	0,79			
		5511,7	86,2	0,86			
50CV/50CF:AN	0h	4258,6	0,0	0,00	0,00	0,00	
		3225,2	0,0	0,00			
		5612,6	0,0	0,00			
		5273,2	0,0	0,00			
	3h	4263,1	4,5	0,05	0,06	0,01	
		3230,7	5,5	0,06			
		5620,4	7,8	0,08			
		5280,5	7,3	0,07			
	6h	4265	6,4	0,06	0,10	0,03	
		3233	7,8	0,08			
		5626,2	13,6	0,14			
		5284,7	11,5	0,12			
	24h	4271,5	12,9	0,13	0,21	0,07	
		3241	15,8	0,16			
		5642,6	30,0	0,30			
		5298,8	25,6	0,26			
	72h	4281,9	23,3	0,23	0,41	0,14	
		3256	30,8	0,31			
		5667,9	55,3	0,55			
		5326,7	53,5	0,54			
	25CV/75CF:AN	0h	5589	0,0	0,00	0,00	0,00
			5618,2	0,0	0,00		
			5632,4	0,0	0,00		
			5507,5	0,0	0,00		
3h		5600,2	11,2	0,11	0,12	0,01	
		5632,1	13,9	0,14			
		5644,1	11,7	0,12			
		5520,5	13,0	0,13			
6h		5610	21,0	0,21	0,19	0,02	
		5638,1	19,9	0,20			
		5648,2	15,8	0,16			
		5528,3	20,8	0,21			
24h		5613	24,0	0,24	0,26	0,02	
		5646,4	28,2	0,28			
		5657,2	24,8	0,25			
		5534,6	27,1	0,27			
72h		5633,9	44,9	0,45	0,46	0,02	
		5668,1	49,9	0,50			
		5676,9	44,5	0,45			
		5553,9	46,4	0,46			

**Tabela A5 - Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade nas famílias de betão produzido com AR**

Misturas	Horas	Massa (g)	$\Delta$ Massa	C (g/mm <sup>2</sup> )	Média (C)	Desvio-padrão
100 CEM:AR	0h	5386,9	0,0	0,00	0,00	0,00
		5336,7	0,0	0,00		
		5322,2	0,0	0,00		
		5225,4	0,0	0,00		
	3h	5410,4	23,5	0,24	0,24	0,02
		5357,9	21,2	0,21		
		5346,9	24,7	0,25		
		5251,3	25,9	0,26		
	6h	5419,4	32,5	0,33	0,33	0,02
		5366	29,3	0,29		
		5355,8	33,6	0,34		
		5261,6	36,2	0,36		
	24h	5443,1	56,2	0,56	0,57	0,04
		5388,9	52,2	0,52		
		5381,4	59,2	0,59		
5287,1		61,7	0,62			
72h	5464,9	78,0	0,78	0,81	0,05	
	5411,4	74,7	0,75			
	5406,9	84,7	0,85			
	5312,2	86,8	0,87			
100 CV:AR	0h	4924,9	0,0	0,00	0,00	0,00
		4813,6	0,0	0,00		
		4925,5	0,0	0,00		
		5050,6	0,0	0,00		
	3h	4981,2	56,3	0,56	0,51	0,03
		4863,5	49,9	0,50		
		4975	49,5	0,50		
		5097,4	46,8	0,47		
	6h	5010,95	86,1	0,86	0,79	0,04
		4890,65	77,0	0,77		
		5003,05	77,6	0,78		
		5125,15	74,5	0,75		
	24h	5101,5	176,6	1,77	1,67	0,06
		4975,2	161,6	1,62		
		5094,2	168,7	1,69		
5211,6		161,0	1,61			
72h	5181	256,1	2,56	2,48	0,07	
	5067,7	254,1	2,54			
	5167,75	242,3	2,42			
	5291,75	241,2	2,41			
75CV/25CF:AR	0h	5060,5	0,0	0,00	0,00	0,00
		5064	0,0	0,00		
		4930,5	0,0	0,00		
		5115,8	0,0	0,00		
	3h	5103,8	43,3	0,43	0,45	0,03
		5103,9	39,9	0,40		
		4977,8	47,3	0,47		
	6h	5164	48,2	0,48	0,62	0,04
		5121,1	60,6	0,61		
5120,2		56,2	0,56			
4998		67,5	0,68			
		5180,4	64,6	0,65		

Tabela A5 - Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade nas famílias de betão produzido com AR  
(continuação)

75CV/25CF:AR	24h	5182	121,5	1,22	1,23	0,06
		5178	114,0	1,14		
		5061,7	131,2	1,31		
		5240,1	124,3	1,24		
	72h	5267,7	207,2	2,07	2,12	0,09
		5265	201,0	2,01		
		5156	225,5	2,26		
		5328,1	212,3	2,12		
50CV/50CF:AR	0h	5007,9	0,0	0,00	0,00	0,00
		5193,2	0,0	0,00		
		5216,9	0,0	0,00		
		4964,3	0,0	0,00		
	3h	5055,6	47,7	0,48	0,48	0,03
		5237,7	44,5	0,45		
		5269,1	52,2	0,52		
		5011,3	47,0	0,47		
	6h	5077,1	69,2	0,69	0,70	0,03
		5259,9	66,7	0,67		
		5292,4	75,5	0,76		
		5031,6	67,3	0,67		
	24h	5156	148,1	1,48	1,42	0,08
		5332	138,8	1,39		
		5366,8	149,9	1,50		
		5095,3	131,0	1,31		
72h	5239	231,1	2,31	2,32	0,17	
	5434,4	241,2	2,41			
	5466,6	249,7	2,50			
	5169,7	205,4	2,05			
25CV/75CF:AR	0h	4889,3	0,0	0,00	0,00	0,00
		4926,8	0,0	0,00		
		4853,3	0,0	0,00		
		4709,3	0,0	0,00		
	3h	4941,9	52,6	0,53	0,51	0,06
		4967,6	40,8	0,41		
		4912,1	58,8	0,59		
		4760,2	50,9	0,51		
	6h	4954,3	65,0	0,65	0,67	0,07
		4985,4	58,6	0,59		
		4930,8	77,5	0,78		
		4774,8	65,5	0,66		
	24h	5004,1	114,8	1,15	1,33	0,15
		5052,9	126,1	1,26		
		5007,8	154,5	1,55		
		4847,5	138,2	1,38		
72h	5091,3	202,0	2,02	2,22	0,15	
	5152,8	226,0	2,26			
	5096,3	243,0	2,43			
	4927	217,7	2,18			

Tabela A6- Resultados do ensaio da absorção de água por imersão

	Massas (g)			Absorção de água por imersão (%)	Média (Ai)	Desvio-padrão
	M1	M2	M3	Ai		
<b>100 CEM:AN</b>	2469,6	1573,1	2362,3	12,0	12,2	0,2
	2521,3	1622,0	2408,5	12,5		
	2465,7	1566,6	2356,9	12,1		
<b>100 CV:AN</b>	2200	1270	2039,8	17,2	16,8	0,5
	2203	1273	2044,35	17,1		
	2219	1265	2065,85	16,1		
<b>75CV/25CF:AN</b>	2398,2	1496,7	2238	17,8	17,9	0,7
	2339	1437,9	2184,52	17,1		
	2368,35	1466,9	2199,35	18,7		
<b>50CV/50CF:AN</b>	2278	1378,4	2157,6	13,4	13,5	0,2
	2290,65	1391,5	2169,7	13,5		
	2276,95	1377,8	2152,9	13,8		
<b>25CV/75CF:AN</b>	2317,5	1416,9	2178	15,5	16,2	0,5
	2323,3	1421,9	2173	16,7		
	2334,15	1432,9	2186	16,4		
<b>100 CEM:AR</b>	2247,6	1265,6	2050	20,1	21,2	0,8
	2251,3	1250,8	2031,5	22,0		
	2275,1	1260,8	2057,2	21,5		
<b>100 CV:AR</b>	2090,8	1190,3	1817,2	30,4	29,0	1,4
	2090,25	990,1	1836	23,1		
	1846,9	946,45	1598,8	27,6		
<b>75CV/25CF:AR</b>	2302,2	1401	2080,2	24,6	24,7	0,1
	2332	1430,8	2110,4	24,6		
	2305,8	1404,5	2082,3	24,8		
<b>50CV/50CF:AR</b>	2168,3	1167,4	1897,8	27,0	28,2	1,1
	2187	1285,9	1923,1	29,3		
<b>25CV/75CF:AR</b>	2093,1	1162,2	1842,2	27,0	27,8	0,6
	2119,5	1068	1823,8	28,1		
	2028,1	1028	1744,1	28,4		

(Considerados valores incongruentes ou inconclusivos)

Tabela A7- Resultados do ensaio da penetração de cloretos nas famílias de betão produzido com AN

Mistura	Provetes ensaiados	Profundidade de penetração (mm)	Média profundidade	Média	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	19,15 21,78	20,465	20,86	0,65
	P2	20,43 20,25	20,34		
	P3	21,8 21,75	21,775		
100 CV:AN	P1	20,12 22,2	21,16	21,43	0,28
	P2	21,13 21,52	21,325		
	P3	21,6 22,03	21,815		
75CV/25CF: AN	P1	21,15 21,74	21,445	22,23	0,60
	P2	22,82 21,88	22,35		
	P3	23,08 22,73	22,905		
50CV/50CF:AN	P1	19,8 19,23	19,515	20,08	0,69
	P2	20,2 19,16	19,68		
	P3	21,3 20,81	21,055		
25CV/75CF:AN	P1	21,47 21,85	21,66	21,44	0,18
	P2	21,53 21,32	21,425		
	P3	21 21,45	21,225		

Tabela A8 - Resultados do ensaio da carbonatação nas famílias de betão produzido com AN

Mistura	Dias	P1	P2	P3	P4	P5	Média total	Desvio-padrão
100 CEM: AN	7	5,87	3,85	5,47	4,46	9,43	5,28	1,18
		5,69	5,16	4,12	5,83	8,52		
		5,04	5,46	5,44	4,53	7,29		
		6,25	8,06	5,41	3,91	7,04		
	Média	5,71	5,63	5,11	4,68	8,07		
	21	10,8	9,11	10	10,02	8,42	9,35	0,55
		10,9	9,86	9,72	9,02	8,69		
		9,62	8,88	9,8	5,99	9,49		
		9,37	8,79	9,72	9,91	8,87		
	Média	10,17	9,16	9,81	8,74	8,87		
28	19,66	15,98	13,81	15,5		15,48	1,22	
	17,31	16,79	18,08	13,35				
	16,54	11,4	17,64	14,44				
	14,91	12,9	15,33	14,09				
Média	17,11	14,27	16,22	14,35				
100 CV: AN	7	10,8	15,27	15,02	14,85	17,12	14,98	1,25
		15,81	15,19	12,39	11	19,86		
		15,5	11,24	12,11	13,97	15,76		
		15,94	24,05	16,47	14,11	13,16		
	Média	14,51	16,44	14,00	13,48	16,48		
	21	24,98	22,71	37,09	34,29	40	28,62	1,14
		31,71	25,07	33,25	22,99	32,55		
		28,79	22,02	34,6	29,97	40		
		24,41	21,77	39,48	31,79	40		
	Média	27,47	22,89	36,11	29,76	38,14		
28		Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
Média								
75CV/25CF: AN	7	28,53	19,45	20,9	26	24,32	20,46	3,08
		28,54	25,32	20,56	14,54	13,85		
		21,09	14,6	11,04	21,19	14,12		
		26,9	23,23	18,17	16,29	20,51		
	Média	26,27	20,65	17,67	19,51	18,20		
	21	6,18	27,52	Inconclusivo	38,33	25,78	24,90	2,94
		5,55	24,49		39,08	11,53		
		9	32,6		37,71	27,41		
		8,38	26,74		35,7	23,11		
	Média	7,28	27,84		37,71	21,96		
28	Inconclusivo	39,89	Inconclusivo	Inconclusivo	Inconclusivo	36,09	0,00	
		33,22						
		31,79						
		39,44						
Média		36,09						
50CV/50CF: AN	7	0	0	0	4,32	1,9	2,51	2,24
		0	1,8	2,8	0	10,58		
		0	3,48	3,61	3,31	10,09		
		2,6	0	2,33	3,68	6,32		
	Média	0,65	1,32	2,19	2,83	7,22		
	21	8,18	5,74	23,57	5,72	12,49	13,28	0,56
		10,39	10,71	14,46	18,84	14,78		
		24,26	8,97	18,92	15,19	16,34		
		13,27	9,31	24,26	10,89	9,06		
	Média	14,03	8,68	20,30	12,66	13,17		

Tabela A8 - Resultados do ensaio da carbonatação nas famílias de betão produzido com AN (continuação)

50CV/50CF: AN	28	33,01	25,72	7,56	7,56	5,47	21,91	0,61
		7,89	21,43	8,4	23,03	9,6		
		27,09	14,74	1,89	8,12	6,02		
		22,07	23,33	2,82	12,75	6,37		
	Média	22,52	21,31	5,17	12,87	6,87		
25CV/75CF: AN	7	9,1	18,03	7,54	7,37	10,85	9,69	0,92
		9,89	8,54	7,47	7,97	9,83		
		9,59	9,91	13,46	10,87	10,05		
		7,27	6,85	8,1		12,37		
	Média	8,96	10,83	9,14	8,74	10,78		
	21	9,28	6,87	23,13	6,2	18,04	19,86	1,29
		7,81	7,3	22,26	2,83	19,69		
		7,94	5,44	20,12	8,35	18,4		
		8,12	10,25	19,09	3,09	18,17		
	Média	8,29	7,47	21,15	5,12	18,58		
28	12,5	14,18	7,85	8,67		13,48	1,00	
	12,52	11,64	7,32	7,68				
	15,09	11,45	8,06	7,07				
	17,81	12,67	6,68	6,25				
Média	14,48	12,49	7,48	7,42				

Tabela A9 - Resultados do ensaio da carbonatação nas famílias de betão produzido com AR

Mistura	Dias	P1	P2	P3	P4	P5	Média total	Desvio-padrão
100 CEM: AR	7	18,25	8,13	10,99	10,87	10,18	12,45	0,85
		12,56	13,49	9,31	12,7	12,14		
		9,8	13,74	8,38	15,11	10,78		
		9,81	14,08	6,32	15,73	11,76		
	Média	12,61	12,36	8,75	13,60	11,22		
	21	15,32	11,02	18,42	15,2	17,11	16,36	1,33
		14,13	22,49	18,48	16,82	18,01		
		15,32	16,85	17,87	12,04			
		13,35	16,5	16,88	16,36			
	Média	14,53	16,72	17,91	15,11	17,56		
28	32,27	30,08	31,63	28,82	24,74	27,57	2,32	
	32,1	28,87	24,31	26,17	28,13			
	32,46	25,06	27,83	26,63	22,24			
	27,96	25,42	29,1	26,94	20,69			
Média	31,20	27,36	28,22	27,14	23,95			
100 CV: AR	7	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	21	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
28		Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						

Tabela A9 - Resultados do ensaio da carbonatação nas famílias de betão produzido com AR (continuação)

75CV/25CF: AR	7	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	21	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
	28	Inconclusivo (totalmente carbonatados)						
Média	Inconclusivo (totalmente carbonatados)							

50CV/50CF: AR	7	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	
	21	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	
25CV/75CF: AR	28	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	
	7	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	
25CV/75CF: AR	21	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	
	28	Inconclusivo (totalmente carbonatados)
	Média	

Tabela A10 - Resultados do ensaio da compressão, antes e após carbonatação

Mistura	Provetes ensaiados	Antes Carbonatação					Após Carbonatação					
		Peso (g)	Fmax (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão	Peso (g)	Fmax (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão	
100 CEM:AN	P1	8257,65	1156,9	51,4	48,5	2,3	P1	2402,6	602,1	60,2	64,9	4,1
	P2	8080,95	1088	48,4			P2	2436,6	701,6	70,2		
	P3	8040,1	1030,2	45,8			P3	2421,8	641,5	64,2		
100 CV:AN	P1	7715	717,6	31,9	27,6	4,0	P1	2158,75	446,8	44,7	38,4	8,7
	P2	7523	643,1	28,6			P2	2132,2	262,3	26,2		
	P3	7109	502,4	22,3			P3	2200,75	443,9	44,4		
75CV/25 CF:AN	P1	7684	285,8	12,7	12,1	0,4	P1	2297	209,6	21	21,1	0,7
	P2	7527	262,3	11,7			P2	2265,6	221,3	22,1		
	P3	7492	268,1	11,9			P3	2230,3	203,1	20,3		
50CV/50 CF:AN	P1	7572,95	192,1	8,5	11,0	1,8	P1	2203,4	278,4	27,8	24,5	2,7
	P2	7504,9	280	12,4			P2	2286,6	212,5	21,3		
	P3	7613,05	274	12,2			P3	2219,9	243,3	24,3		
25CV/75 CF:AN	P1	7796,15	181,3	8,1	6,8	0,9	P1	2291,7	308,6	30,9	21,7	6,5
	P2	7765,2	145,3	6,5			P2	2331,1	169	16,9		
	P3	7619,2	133,4	5,9			P3	2312,4	174,4	17,4		
100 CEM:AR	P1	7096,55	602,4	26,8	26,3	0,8	P1	2167,75	312,1	31,2	34,8	2,6
	P2	6963,1	566,9	25,2			P2	2168,1	373,7	37,4		
	P3	6921,5	602,1	26,8			P3	2147,1	357,4	35,7		
100 CV:AR	P1	6831,7	69,1	3,1	3,4	0,7	P1	1978,75	80,8	8,1	7,3	0,6
	P2	6778,3	98,3	4,4			P2	1957,35	67,5	6,8		
	P3	6599,4	60,7	2,7			P3	1973,8	69,1	6,9		
75CV/25 CF:AR	P1	6839,65	98,6	4,4	4,4	0,2	P1	2162,7	133,4	13,3	11,8	1,1
	P2	7015,15	104,3	4,6			P2	2079,4	110,1	11		
	P3	6666,75	92,4	4,1			P3	2133,8	110,1	11		
50CV/50 CF:AR	P1	6961,55	33,9	1,5	1,4	0,1	P1	1958,3	51,4	5,1	4,3	0,8
	P2	6306,75	28,1	1,2			P2	1960,3	33,9	3,4		
	P3	7184,6	33,9	1,5			P3					
25CV/75 CF:AR	P1	6559,9	28,1	1,2	1,0	0,2	P1	1842,8	33,9	3,4	5,5	1,7
	P2	6888,3	28,1	1,2			P2	1908,9	74,9	7,5		
	P3	6511,7	16,4	0,7			P3	1889,8	57,4	5,7		

Lisboa, 19 de Setembro de 2022

Autores

---

Filipe Miguel Sequeira

Estudante de Mestrado

---

Rui Vasco Silva

Investigador Doutorado

---

Jorge de Brito

Professor Catedrático