Desempenho em termos de resistência mecânica de betões com cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos ativadas alcalinamente

Gonçalo da Cruz Cagica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Doutor Rui Vasco Pacheco Santos da Silva

Júri

Presidente: Professor Doutor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Vogal: Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Outubro 2022

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Com esta dissertação, dou por terminada mais uma fase da minha vida, abrindo assim novas portas para outras oportunidades igualmente desafiadoras ou ainda mais. Com isto, gostaria de agradecer a algumas pessoas que me acompanharam e contribuíram nesta jornada.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu Orientador Professor Jorge de Brito, por ter confiado em mim e na minha perseverança, e ter-me dado esta oportunidade de trabalhar com ele. Agradeço ainda pela disponibilidade que demonstrou e toda a ajuda que deu com o seu conhecimento científico.

Agradeço também ao meu Coorientador Doutor Rui Vasco Silva, que serviu como base, exemplo e como fonte de aprendizagem tanto teórica como prática. A sua presença assídua na campanha experimental foi crucial para ajudar na resolução das nossas dúvidas e ouvir as nossas ideias. Espero que tivesse gostado de trabalhar connosco, como nós gostámos de trabalhar consigo.

Ao professor Manuel Francisco, o meu muito obrigado pela paciência para triturar a cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos e agradeço também pela simpatia que sempre demonstrou e gosto pelo trabalho que faz.

No entanto, o meu maior agradecimento vai para o meu colega Filipe Miguel, que aceitou o meu convite de embarcar neste desafio em conjunto, mesmo sabendo que este seria difícil. Com a tua ajuda, tudo se tornou mais fácil, mesmo com o TOC a atrapalhar. O meu mais profundo obrigado vai para ti.

Aos colegas e técnicos de laboratório, agradeço toda a disponibilidade e todo o auxílio que nos prestaram durante a campanha experimental desde o início até ao fim.

Um agradecimento às pessoas que conheci no meu percurso do IST. Ao Lucas que tanto nos ajudou no início da nossa campanha experimental. Ao Rafael, ao Sebastião, ao André Coxixo, ao Diogo Craveiro e a todos os outros. São memórias que levarei para sempre.

Agradeço também à minha namorada Mariana, que foi o meu pilar durante estes anos na faculdade. Por todo o apoio demonstrado, os conselhos que me deste e por todo o amor e carinho e o mais importante, por me teres aturado durante este tempo todo.

Apesar de últimos, estes são os agradecimentos mais importantes. À minha família, em especial à minha mãe e ao meu pai. Agradeço o voto de confiança demonstrado nestes anos todos, todo o apoio dado, todos os conselhos e todo o amor e carinho. Sem eles isto seria impossível. O meu maior agradecimento é para vós.

Resumo

Na presente dissertação, apresenta-se um estudo relativamente ao desempenho mecânico de betões ativados alcalinamente, nos quais os ligantes utilizados foram a cinza volante e a cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos. De modo a criar um betão 100% reciclado foi feita a substituição a 100% de agregado natural por agregado reciclado. O objetivo principal desta dissertação é averiguar qual a influência da substituição de cinza volante por cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos e da substituição total de agregado natural por agregado reciclado. Para isso, foram realizadas duas famílias de betão: uma com 100% de agregado natural e outra com 100% de agregado reciclado. Dentro das duas famílias de betão, foram realizadas cinco misturas, sendo uma apenas com cimento Portland e as outras quatro ativadas alcalinamente com substituição por cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos a 0, 25, 50 e 75%.

Os provetes produzidos foram submetidos a uma cura em câmara seca e alguns tiveram uma cura adicional em câmara de CO_2, com o objetivo de verificar qual a influência no desempenho da capacidade resistente. Com os provetes com uma cura em câmara seca, foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração. Com os provetes submetidos a cura em câmara de CO_2, foram realizados apenas ensaios de resistência à compressão. Analisando os valores obtidos na campanha experimental para as misturas com agregado natural, foi verificado que, com o aumento da substituição de cinzas volantes, havia um pior desempenho a nível de resistência à compressão a 28 dias, apresentando valores de decréscimo de cerca de 80% em relação ao betão de referência. Este comportamento foi observado para os outros ensaios, porém com percentagens diferentes, existindo a exceção da mistura com 100% de cinzas volantes, que apresentou um aumento percentual na resistência à tração de ≈18% em relação ao betão de referência, Para os provetes com a substituição total de agregado natural por agregado reciclado, foi igualmente verificado que, com o aumento percentual da substituição de cinzas volantes, os betões demonstravam pior desempenho a nível de resistência à compressão a 28 dias, apresentando valores de decréscimo percentual de ≈83-96% em relação ao betão de referência, sendo o maior valor para a mistura com 75% de cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos. Contudo, para as misturas colocadas em câmara de carbonatação, foi observado que houve um aumento percentual bastante significativo dos valores de resistência à compressão para todas as misturas, em comparação com os valores obtidos para as misturas com uma cura em câmara seca. Estes resultados demonstram assim que esta cura acelerada por carbonatação foi bastante benéfica em termos de capacidade resistente dos betões produzidos.

Palavras-chave: cinzas volantes, cinzas de fundo, resíduos sólidos urbanos, ativação alcalina, agregados reciclados, resistência mecânica.

Abstract

This dissertation presents a study on the mechanical performance of alkali-activated concrete, in which the binders were fly ash and bottom ash from incinerated municipal solid waste. In order to create a 100% recycled concrete, the natural aggregate was replaced with 100% recycled aggregate. The main objective of this dissertation is to investigate the influence of the replacement of fly ash by bottom ash from municipal solid waste and the total replacement of natural aggregate with recycled aggregate. To do this, two families of concrete were produced: one with 100% natural aggregate and the other with 100% recycled aggregate. Within the two concrete families, five mixes were produced, one with only ordinary Portland cement and the other four alkali-activated, containing different replacement levels of fly ash with bottom ash from municipal solid waste at 0, 25, 50 and 75%.

The produced specimens were subjected to a dry chamber curing and some specimens had an additional curing in a CO_2 chamber, in order to verify the influence on the performance of the resistant capacity. On specimens cured in a dry chamber, compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength tests were carried out. On specimens subjected to curing in a CO_2 chamber, only compressive strength tests were performed. Analysing the values obtained in the experimental campaign for the mixes with natural aggregate, it was observed that, with increasing replacement of fly ash, there was a decline in performance: around 80% decrease in compressive strength in comparison with the reference concrete after 28 days. This trend was also observed for the other tests, but with different percentages, with the exception of the mix with 100% fly ash, which showed a percentage increase in tensile strength of ≈18% in relation to the reference concrete. For specimens replacing natural aggregate with recycled aggregate, it was also found that replacing the fly ash led to a worse performance in terms of compressive strength after 28 days (decreases of ≈83-96% when compared to the reference concrete), wherein the greatest decline was observed for the 75% of bottom ash mix. However, for the mixes placed in a carbonation chamber, there was a significant performance improvement for all mixes, when compared to the values obtained for the mixes submitted to dry chamber curing. These results thus demonstrate that this accelerated curing by carbonation was quite beneficial in terms of the resistant capacity of the concrete mixes produced.

Keywords: fly ash, bottom ash, municipal solid waste, alkali activation, recycled aggregates, mechanical performance.

Índice geral

1 Introdução ... 1
1.1 Considerações iniciais ... 1
1.2 Objetivo da dissertação ... 1
1.3 Estrutura e organização do trabalho ... 2
2 Estado da arte ... 3
2.1 Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos ... 3
2.2 Cinzas volantes ... 4
2.3 Agregado reciclado ... 5
2.4 Ativador alcalino ... 6
2.5 Propriedades de betões ativados alcalinamente com cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos ... 7
2.5.1 Resistência à compressão ... 8
2.5.2 Resistência à tração ... 9
2.5.3 Módulo de elasticidade ... 10
2.6 Propriedades de betões ativados alcalinamente com cinza volantes ... 11
2.6.1 Resistência à compressão ... 11
2.6.2 Resistência à tração ... 12
2.6.3 Módulo de elasticidade ... 12
2.7 Betões ativados alcalinamente com agregados reciclados ... 13
2.7.1 Resistência à compressão ... 14
2.7.2 Resistência à tração ... 16
2.7.3 Módulo de elasticidade ... 16
3 Campanha experimental ... 19
3.1 Elementos constituintes dos diferentes betões ... 19
3.1.1 Água ... 19
3.1.2 Hidróxido de sódio ... 19
3.1.3 Silicato de sódio ... 19
3.1.4 Adjuvantes ... 19
3.1.5 Agregados naturais ... 20
3.1.6 Agregados reciclados ... 20
3.1.7 Cimento ... 20
3.1.8 Cinzas volantes ... 20
3.1.9 Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos ... 20
3.2 Composição dos diferentes betões ... 21
3.2.1 Curva de referência de Faury ... 21
3.2.2 Composição e identificação dos betões ... 23
3.3 Produção ... 23
3.4 Preparação dos provetes e condições de cura ... 24

3.5 Ensaios realizados aos agregados 26
3.5.1 Análise granulométrica 26
3.5.2 Massa volúmica e absorção de água 26
3.5.3 Baridade 28
3.5.4 Caracterização dos agregados reciclados 28
3.6 Ensaios de betão no estado fresco 29
3.6.1 Abaixamento do cone de Abrams 29
3.6.2 Massa volúmica 29
3.7 Ensaios de betões no estado endurecido 30
3.7.1 Resistência à compressão 30
3.7.2 Resistência à tração 31
3.7.3 Compressão após carbonatação em câmara de CO_2 31
3.7.4 Módulo de elasticidade 31
4 Análise e discussão dos resultados 33
4.1 Introdução 33
4.2 Primeira fase - Propriedades dos materiais 33
4.2.1 Propriedades da CFRSU 33
4.2.2 Análise granulométrica dos agregados 35
4.2.3 Massa volúmica e absorção de água dos agregados naturais e reciclados 36
4.2.4 Caracterização dos agregados reciclados grossos 36
4.3 Segunda fase - Propriedades do betão no estado fresco 37
4.3.1 Trabalhabilidade 37
4.3.2 Massa volúmica 40
4.4 Terceira fase - Propriedades dos betões no estado endurecido 41
4.4.1 Resistência à compressão 41
4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral 46
4.4.3 Compressão após carbonatação em câmara de CO_2 48
4.4.4 Módulo de elasticidade 50
5 Conclusões e desenvolvimentos futuros 53
5.1 Considerações finais 53
5.2 Conclusões gerais 53
5.2.1 Betões no estado fresco 53
5.2.2 Betões no estado endurecido 54
5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros 57
Referências 59

Anexos

Tabela A1 - Distribuição granulométrica dos AN utilizados. A.1
Tabela A2 - Valores de resistência à compressão a 7 dias. A.2
Tabela A3 - Valores de resistência à compressão a 28 dias. A.3
Tabela A4 - Valores de resistência à compressão a 91 dias. A.4

Tabela A5 - Valores de resistência à compressão em cilindros a 28 dias.....A.5
Tabela A6 - Valores de resistência à tração por compressão diametral a 28 dias.....A.6
Tabela A7 - Valores de módulo de elasticidade a 28 dias.....A.7
Tabela A8 - Resultados do ensaio da compressão, antes e após carbonatação.....A.8
Tabela A1 – Tabela dos constituintes e respetivas quantidades das diversas misturas (Quantidades para 1 litro de betão)……..A.9

Índice de figuras

Figura 1 - Distribuição granulométrica das CFRSU para diferentes utilizações. 4
Figura 2: Quebra de ligações covalentes no ligante. 6
Figura 3 - Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família a) CV-AN e b) CV-AR.. 8
Figura 4 - Relação entre a resistência à flexão e as condições de cura nas argamassas CF AN e AR. 9
Figura 5 - Resistência à tração em argamassas a 7 e 28 dias. 10
Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família a) CV-AN e b) CV-AR..... 12
Figura 7 - Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CV..... 13
Figura 8 – Propagação de fendas em composições diferentes de agregados: (a) com resistência normal, (b) com alta resistência, (c) AR com resistência normal e diferentes ZIT na composição de AR. 15
Figura 9 - Processo de peneiração (esquerda) e moagem via máquina de Los Angeles (direita). 20
Figura 10 - "Big Bag" com CFRSU. 21
Figura 11 - Curvas de referência de Faury 22
Figura 12 - Provetes realizados para cada amassadura. 25
Figura 13 - Pormenor de CFRSU agarrada às paredes do moinho. 33
Figura 14 - DRX da CFRSU utilizada na presente investigação e da CFRSU comum. 34
Figura 15 - Pormenor de ensaio feito com HCl onde a) corresponde a amostra ensaiada, b) espuma provocada pela reação de HCl com a calcite e c) material sobrante da amostra ensaiada. 35
Figura 16 - DRX feito à CFRSU proveniente do segundo “Big Bag”. 35
Figura 17 - Análise granulométrica dos diferentes AN utilizados. 36
Figura 18 - Provetes após (a) e antes utilização de bórax (b). 39
Figura 19 - Diferença entre betonagens consecutivas: primeira betonagem (a) betão trabalhável; segunda betonagem (b) betão “mais seco” à saída da betoneira. 40
Figura 20 - Pormenor de ensaio de resistência à compressão num cubo. 41
Figura 21 - Resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias. 43
Figura 22 - Resistência à compressão em cilindros ativados alcalinamente a 28 dias. 43
Figura 23 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AR a 7, 28 e 91 dias. 44
Figura 24 - Resistência à compressão em cilindros ativados alcalinamente com 100% AR a 28 dias. 45
Figura 25 - Pormenor de provete ativado alcalinamente com AR ensaiado. 45
Figura 26 - Resistência à tração das misturas ativadas alcalinamente a 28 dias. 46
Figura 27 - Pormenor de provete ativado alcalinamente com AN ensaiados à tração a 28 dias. 47
Figura 28 - Resistência à tração a 28 dias das misturas ativadas alcalinamente com 100% de AR. .. 47
Figura 29 - Pormenor de provetes ativados alcalinamente com AR ensaiados à tração a 28 dias. 48
Figura 30 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AN a 28 dias após câmara de CO_2. 48
Figura 31 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AR a 28 dias após câmara de CO_2. 49

Figura 32 - Módulo de elasticidade de provetes cilíndricos ativados alcalinamente com 100% AN a 28 dias. 51
Figura 33 - Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade a 28 dias. 51
Figura 34 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente das várias misturas. 52

Índice de tabelas

Tabela 1 - Módulo de elasticidade de cada uma das famílias estudadas a 7,28 e 91 dias..... 11
Tabela 2 - Resistência à compressão realizados a 7, 28, 60 e 90 dias..... 12
Tabela 3 - Módulo de elasticidade de CV ativada alcalinamente a 28 e 90 dias..... 13
Tabela 4 - Propriedades mecânicas e de durabilidade de betões ativados alcalinamente contendo diversos teores de ARG em substituição parcial ao ANG..... 15
Tabela 5 - Módulo de elasticidade para as várias misturas 17
Tabela 6 - Valores de A e B sugeridos por Faury. 22
Tabela 7 - Misturas realizadas na presente campanha experimental. 23
Tabela 8 - Ensaios realizados para a campanha experimental e as dimensões dos vários provetes utilizados. 25
Tabela 9 - Variação da distribuição granulométrica das CFRSU entre o moinho pequeno e o moinho grande..... 34
Tabela 10 - Massas volúmicas e absorção de água dos agregados. 37
Tabela 11 - Proporções dos constituintes do ARG (% por massa). 37
Tabela 12 - Abaixamento do cone de Abrams referentes às diferentes misturas. 38
Tabela 13 - Massa volúmica dos betões no estado fresco. 40
Tabela 14 - Comparação entre valores de resistência à compressão em materiais com 100% AN antes e após câmara de CO_2. 49
Tabela 15 - Comparação entre valores de resistência à compressão de materiais com 100% AR antes e após câmara de CO_2 50
Tabela 16 - Resistência mecânica das MAA, com 100% AN, com o betão de referência. 54
Tabela 17 - Resistência à compressão antes e após câmara de carbonatação acelerada para as misturas com 100% AN. 55
Tabela 18 - Resistência mecânica das MAA, com 100% AR, com o betão de referência. 56
Tabela 19 - Resistência à compressão antes e após câmara de carbonatação acelerada para as misturas com 100% AR. 56
Tabela 20 - Resistência mecânica para misturas com AN e misturas com AR. 57

Índice de abreviaturas e siglas

BAA	Betões ativados alcalinamente
MAA	Materiais ativados alcalinamente
CV	Cinzas volantes
CFRSU	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos
CP	Cimento Portland
CF	Cinza de fundo
AN	Agregado natural
AR	Agregado reciclado
CO_2	Dióxido de carbono
AA	Ativador alcalino
CVAA	Cinzas volantes ativadas alcalinamente
CFAA	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos ativadas alcalinamente
RCD	Resíduos de construção e de demolição
RSU	Resíduos sólidos urbanos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
N-A-S-H	Aluminossilicato de sódio hidratado
NaOH	Hidróxido de sódio
SiO_2	Dióxido de silício
Na_2O	Óxido de sódio
Na_2SiO_3	Silicato de sódio
SP	Superplastificante
a/l	Relação água / ligante
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SA	Solução alcalina

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Um dos maiores problemas no Planeta neste momento é a emissão de CO_2 para a atmosfera e, sendo o setor da construção responsável por cerca de 10% das emissões globais de CO_2 (*United Nations Environment Programme,* 2020), é necessário encontrar formas para diminuir esse nível de emissão. Dentro do setor da construção, a produção de cimento Portland (CP) tem o maior impacte, apresentando um valor de 5% a 7% das emissões de CO_2 (Benhelal et al., 2013). Por este motivo, é fundamental a procura por novos ligantes com uma pegada ecológica menor. Tem-se vindo a dar uma maior importância à investigação de materiais ativados alcalinamente (MAA) utilizando subprodutos da indústria como ligante, um dos quais oriundos dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Silva et al. (2017) indicaram que, em 2025, é possível que a produção mundial destes resíduos chegue a 2,2 mil milhões de kg. Este produto é ainda incinerado, transformando-se em cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos (CFRSU). Ainda dentro do setor da construção, existem os resíduos de construção e demolição que são um produto da atividade de demolição e de construção. Cerca de 2,5 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) foram produzidas no ano de 2020 em Portugal (Agência Portuguesa do Ambiente, 2022).

Com o objetivo de responder a essa necessidade, na presente dissertação, o CP foi substituído na sua totalidade por cinzas volantes (CV) e por cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos (CFRSU), sendo ambas ativadas alcalinamente. Também para contribuir para a diminuição da pegada ecológica, foi ainda feita uma substituição total de agregado natural (AN) por agregado reciclado (AR).

1.2 Objetivo da dissertação

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar a influência das CV e CFRSU no desempenho de betões ativados alcalinamente (BAA). Adicionalmente, como referido, pretende-se analisar a influência a nível da resistência mecânica da incorporação de AR como substituto integral dos AN. Para além dos ensaios habituais de resistência mecânica, na presente dissertação, planeou-se avaliar a influência de uma cura acelerada de CO_2 no desempenho mecânico dos betões.

De referir que a presente dissertação foi realizada em conjunto com a dissertação de Mestrado da autoria de Filipe Sequeira Alves Miguel, na qual se estudou as propriedades do betão com cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos a nível de durabilidade.

Dividiu-se a dissertação em 3 fases, com vista a cumprir todos os objetivos propostos. Na primeira, foi feita uma revisão da literatura com o objetivo de entender o que já foi investigado que incidisse dentro do tema desta dissertação e quais as conclusões a que os investigadores chegaram. A análise de informação foi feita em documentos internacionais, bem como em documentos nacionais, onde foi avaliada a sua fiabilidade antes de se tomar como caso de interesse.

A segunda fase incide sobre o planeamento e execução da campanha experimental. Aqui, foram analisados os ensaios a realizar e as respetivas normas. Após esta recolha de informação, seguiu-se

a execução dos mesmos. Esta fase ficou dividida em três partes, sendo que a primeira recaiu sobre os ensaios a agregados e ligantes, a segunda sobre os ensaios ao betão no estado fresco e por último sobre os ensaios ao betão no estado endurecido.

Como última fase, tem-se a análise e discussão dos resultados obtidos na segunda fase. A informação recolhida na primeira fase foi utilizada como termo de comparação e também justificativo dos valores obtidos na segunda fase.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

De modo a melhor estruturar a dissertação, fez-se a sua divisão em cinco capítulos.

- **Introdução -** onde é feita uma breve introdução à temática e se apresenta o motivo da realização da dissertação, bem como os objetivos, a metodologia e o planeamento do trabalho;
- **Estado da arte -** neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura, com objetivo de ajudar na interpretação dos valores obtidos na presente dissertação. Contudo, é importante referir que ainda existe pouca literatura relacionada com BAA com CFRSU e CV, o que tornou difícil a pesquisa de informação;
- **Campanha experimental -** aqui, explica-se o plano experimental, quais os ensaios a serem realizados e as normas referentes a cada ensaio. É ainda explicada a forma de execução dos vários betões e os seus constituintes;
- **Análise e discussão de resultados -** são apresentados os valores obtidos na campanha experimental, fazendo-se uma análise e discussão dos mesmos, comparando os mesmo com as conclusões observadas na revisão da literatura;
- **Conclusões -** apresenta-se uma breve conclusão sobres os resultados obtidos, fazendo-se uma análise geral do desempenho do betão, com ênfase nos BAA com CV e CFRSU. Faz-se ainda uma análise da influência da substituição de AN por AR e o impacte da colocação de provetes numa cura em câmara de carbonatação de CO_2.

2 Estado da arte

Este capítulo pretende fazer referência a investigações realizadas, por outros investigadores, relacionadas com o tema abordado na dissertação. Primeiramente, fez-se uma breve descrição dos diferentes materiais relativamente às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas em particular: CFRSU, CV e AR. As características analisadas foram a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração e resistência à compressão após câmara de carbonatação. De referir que existem pouco estudos que tivessem utilizado CFRSU ativadas alcalinamente como ligante na produção de betões. A utilização desta como substituto parcial, tanto do cimento como de ligantes ativados alcalinamente, permite identificar algumas das tendências e características e inferir possíveis comportamentos.

2.1 Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos

Um dos grandes problemas mundiais é a produção excessiva de resíduos sólidos urbanos (RSU) que, após a sua incineração e alguns tratamentos, tem CFRSU como subproduto. Estima-se que, a nível mundial, em 2012, a produção era equivalente a 1,3 mil milhões de toneladas e que, em 2025, a sua produção aumente para 2,2 mil milhões de toneladas, o que equivale a um acréscimo gravoso na produção deste resíduo (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012). Na Europa, a CFRSU tem uma produção que ronda 20 milhões de toneladas anualmente (Nørgaard et al., 2019).

No processo de incineração de RSU, é possível ter uma redução de massa de 70% e de volume de 90%, em que a CFRSU corresponde a 80 a 90% dos resíduos. A restante percentagem é constituída por CV e gases de combustão, que passam em sistemas de recuperação de energia e de controlo de poluição de ar. É possível produzir cerca de ¼ de tonelada de CFRSU por tonelada de RSU (Dhir et al., 2018).

A CFRSU é constituída por vidros, metais ferrosos e não ferrosos, matéria orgânica não queimada, minerais, plásticos, têxteis, cartão e papel. As proporções ou a existência destes componentes dependem da diversidade de cultura, legislações, políticas de gestão de resíduos e atividades económicas das diferentes regiões (Burnley, 2007; Liu et al., 2006). Estas partículas podem apresentar dimensões até 100 mm e, dependendo das zonas de produção, faz-se uma peneiração e as partículas acima de 20 a 50 mm são removidas. Dependendo da sua utilização final, estas vão passar por outro processo de peneiração, para serem utilizadas como agregado fino, ou por um processo de moagem, caso sejam utilizadas como um componente cimentício, que irão apresentar uma dimensão de partículas semelhantes ao CP (Dhir et al., 2018). Na Figura 1, apresenta-se a distribuição granulométrica das CFRSU para as diferentes utilizações.

Morfologicamente, as CFRSU têm partículas de textura rugosa, angular e irregular. Este material, durante o processo de incineração de aquecimento e arrefecimento, forma bolhas de gás que provocam uma microestrutura porosa (Dhir et al., 2018). A densidade das CFRSU apresenta um valor de 2630 kg/m^3 que, comparativamente à densidade do cimento de 3159 kg/m^3, é bastante inferior. Isto deve-se principalmente à porosidade acima referida. Dada a porosidade, a capacidade de absorção de água apresenta um valor médio de 9.3% (Dhir et al., 2018), sendo este um valor elevado relativamente ao de outros materiais, como por exemplo a areia que apresenta valores de absorção de água entre 0.5 e 1.5%.

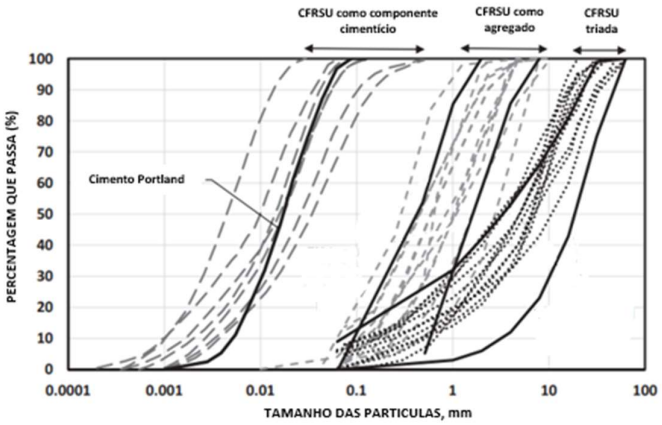

Figura 1 - Distribuição granulométrica das CFRSU para diferentes utilizações (adaptada de Dhir et al., 2018).

Na sua composição química, a CFRSU apresenta uma composição de óxidos semelhante à dos materiais suplementários cimentícios. Em maior quantidade, encontra-se o dióxido de silício (SiO_2), que apresenta um valor médio de 37,4%, o óxido de cálcio (CaO), com um valor médio de 22,2%, o óxido de alumínio (Al_2O_3), com valor médio de 10,2%, e o óxido de ferro (Fe_2O_3), com valor médio de 8,3%. É possível encontrar outros óxidos, mas em menores quantidades, tais como o óxido de sódio (2,8%), óxido sulfúrico (2,7%), o pentóxido de fosforo (2,3%), o óxido de magnésio (2,0%) e o óxido de potássio (1,4%) (Dhir et al., 2018b). As fases minerais principais das CFRSU são o quartzo, o carbonato de cálcio, a cal e o feldspato (Chimenos et al., 1999).

2.2 Cinzas volantes

A produção das CV através de centrais termoelétricas tem vindo a diminuir em Portugal desde 30 de novembro de 2021, dada a eliminação da produção de energia através da combustão do carvão, em cumprimento do Acordo de Paris de 12 de dezembro de 2015. Com este acordo, o Governo português decretou que, até 2030, se teria de terminar o uso de carvão para a produção de energia. As CV, sendo um material ligante mais económico e sustentável do que o CP, têm tido um maior reconhecimento na produção de BAA pois é uma alternativa válida dada a presença de silício e alumínio na sua composição (Fang et al., 2018).

Na sua constituição, as CV contêm aluminossilicatos que sozinhos não têm propriedades hidráulicas. Contudo, com o tratamento certo e reagindo com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), formam um gel resistente (Xu e Shi 2018). O CaO dos materiais ativados alcalinamente é o constituinte que possibilita uma resistência mecânica inicial (Farhan et al., 2019). As CV são caracterizadas como um pó fino constituído por partículas vítreas de forma esférica, que resultam da queima de carvão pulverizado com ou sem matérias de co-combustão. Estas apresentam geralmente propriedades pozolânicas e, na sua constituição, contêm essencialmente óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A "*American Society for Testing and Materials*" (ASTM C618 2019) classifica as CV como classe F se estas apresentarem um teor de SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 superior a 70% e um teor de CaO inferior a 10%. No caso de apresentarem um teor entre 50% e 70% e possuírem um teor de cálcio superior a 10%, são classificadas como classe C.

Ao nível microestrutural, o SiO_2 pode ser encontrado em duas formas estruturais distintas, cristalina e amorfa, sendo que, na segunda, tem a capacidade de se dissolver pela ação do ativador alcalino (AA). Esta dissolução é ajudada, no início da polimerização, pelo Al_2O_3 resultando num gel de aluminossilicatos.

Morfologicamente, as suas partículas apresentam uma densidade de 2300-2600 kg/m^3, tendo ainda partículas com formas irregulares que provêm de carvão não incinerado. A densidade é controlada pela temperatura de combustão, taxa de arrefecimento e composição das partículas. A distribuição granulométrica, que depende do método de combustão, está na gama de valores de diâmetro de 1 µm até mais de 200 µm (Xu e Shi. 2018). A elevada finura da CV implica uma maior superfície especifica, traduzindo-se assim numa maior reatividade, ou seja, a dissolução das partículas por ação do AA vai ser mais eficaz, o que resulta numa matriz mais densa e uma melhor resistência mecânica (Farhan et al., 2019; Mo et al., 2018).

2.3 Agregado reciclado

Um dos grandes produtos da demolição de construções existentes são os RCD. Estes podem ser reciclados para serem utilizados como AR, em substituição dos AN, sendo esta considerada a maneira mais eficaz para a reciclagem de RCD. As vantagens resultantes da reciclagem destes resíduos a nível ambiental são a diminuição da pegada de CO_2, a diminuição do consumo de energia consequente da produção de AN e redução da quantidade de resíduos depositados em aterros. Adicionalmente, esta alternativa mais sustentável permite também criar oportunidades de mercado (Silva et al., 2016).

Na constituição dos AR, pode-se encontrar fragmentos de betão, tijolo, pedra, vários tipos de cerâmica (azulejo e cerâmica sanitária), vidros, metais, silicone, entre outros elementos. Dada a variabilidade de elementos, existem limitações para a utilização deste material ao nível normativo para o volume máximo de AR em betão (Abdollahnejad et al., 2019). Deste modo, torna-se importante conhecer as características dos elementos originais, de onde o agregado foi britado (Shi et al., 2016).

Relativamente à distribuição granulométrica, pode-se obter qualquer tipo de gradação. A aquisição de qualquer tipo de gradação irá requerer uma britagem e crivagem dos RCD, que irá afetar a forma e a quantidade de finos. O esmagamento que ocorre durante a britagem deixa uma camada de finos residual nas superfícies, que possivelmente requer uma pré-lavagem do material antes da utilização (Brito e Evangelista, 2013).

As partículas dos AR, em geral, apresentam uma menor densidade em comparação com os AN. Isto advém de os agregados reciclados conterem uma pasta cimentícia agregada (Brito e Evangelista, 2013). A variação desta propriedade deve-se a três fatores: o processo de reciclagem; a qualidade do material original (quanto menor for a relação a/l do betão original, maior a densidade dos AR) e o tamanho dos agregados (Silva et al., 2015). Em relação à absorção de água, os AR diferenciam-se dos AN, tendo uma absorção de água superior. Os valores de absorção de água dos AN rondam 0,5 a 1,5%, enquanto os valores de absorção de água para os agregados reciclados finos (ARF) variam entre 4 e 13% e, para os agregados reciclados grossos (ARG), variam entre 2 e 7%. (Silva et al., 2014; Xiao 2018).

Para uma mistura de betão de resistência baixa, a resistência à compressão depende intrinsecamente

da resistência da pasta de cimento. No entanto, para betões de resistência média a alta, a resistência à compressão torna-se dependente da resistência dos seus agregados (Silva et al., 2014). Consequentemente, será importante determinar a qualidade dos materiais originais dos RCD de modo a melhor perceber o potencial impacte sobre as propriedades do betão. Adicionalmente, num betão produzido com AR, existem três zonas de transição: a zona entre o agregado e a pasta de ligante original aderida; entre essa pasta e a nova pasta de ligante; e ainda entre o AN original e a nova pasta de cimento. Assim sendo, a resistência mecânica da pasta de ligante é fortemente influenciada pela resistência mecânica do betão original e da qualidade das zonas de transição.

2.4 Ativador alcalino

O processo de ativação alcalina tem três fases fulcrais identificadas por Krivenko (2017). Na primeira, dá-se uma destruição das ligações covalentes (i.e., Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si), esta destruição deve-se ao aumento do pH da mistura, para valores entre 9 e 12, com introdução de metais alcalinos. Nesta destruição das ligações, origina-se uma solução com catiões e aniões numa fase coloidal (Figura 2). A segunda etapa é a ligação desses catiões dos metais alcalinos com os aniões ≡Si-O$^-$, neutralizando-os nos processos de policondensação (reações de polimerização). A última e terceira etapa é a formação da estrutura.

$$\equiv\text{Si-O-Si}\equiv \leftrightarrow [\equiv\text{Si-O-Si}\equiv]\text{-} \leftrightarrow \equiv\text{Si-OH} + \equiv\text{Si-O-}$$

Figura 2: Quebra de ligações covalentes no ligante (Krivenko 2017).

O processo da ativação alcalina começa pela dissolução de partículas sólidas de aluminossilicatos em solução alcalina, como a sílica e a alumina. Esta dissolução está muito relacionada com a alcalinidade da mistura, dado esta influenciar a taxa de dissolução das partículas sólidas. Dado a sílica precisar de um meio alcalino para ter uma boa dissolução, é importante garantir que esta reação ocorra num meio fortemente alcalino (Severo et al., 2013). As reações referentes a esta primeira fase, fase da dissolução, estão esquematizadas na Equação 1, Equação 2 e Equação 3.

$$Al_2O_3 + 3H_2O + 2OH^- \rightarrow 2\,[Al(OH)_4]^- \qquad \textit{Equação 1}$$

$$SiO_2 + H_2O + OH^- \rightarrow [SiO(OH)_3]^- \qquad \textit{Equação 2}$$

$$SiO_2 + 2OH^- \rightarrow [SiO_2(OH)_2]^{2-} \qquad \textit{Equação 3}$$

Contrariamente ao CP, que, ao misturar apenas com água, consegue produzir produtos de hidratação, e.g. silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), capazes de conferir uma resistência mecânica elevada, as CV e a CFRSU apresentam uma reatividade quase inexistente. Logo, foi proposta a utilização de um AA que reagisse com o silício e o alumínio para dar início ao seu processo de dissolução e, eventualmente, à sua polimerização. Desta polimerização, resulta uma cadeia tridimensional com a estrutura Si-O-Al-O, ou seja, de modo a atingir uma resistência mecânica adequada, este processo recorre à policondensação do Al e do Si, em meio alcalino. Estas reações podem ser observadas nas seguintes equações:

$$(Si_2O_5Al_2O_2)_n + H_2O + OH^- \rightarrow Si(OH)_4 + Al(OH)^{4-} \qquad \textit{Equação 4}$$

$$Si(OH)_4 + Al(OH)^{4-} \rightarrow (Si - O - Al - O)_n$$ *Equação 5*

Com o término da dissolução da alumina e da sílica, segue-se a condensação, onde se dá a ligação dos produtos das reações através da força de atração de um dos grupos de OH^- do $[SiO(OH)_3]^-$ com os iões Al do $[Al(OH)_4]^-$, que leva à formação de uma estrutura intermédia. Com esta reação, dá-se a formação de um aluminossilicato (Si-O-Al-O) e a libertação de uma molécula de água da matriz polimérica (Equação 4). Consequentemente, existe a criação de ligações e redução das descontinuidades na sua porosidade, levando a um aumento do desempenho. Assumindo o acima referido, concluiu-se que a água não é essencial para que ocorram as reações químicas, mas é uma garantia de boa trabalhabilidade das misturas produzidas (Rangan, 2008). Por fim, o endurecimento e formação do betão com CV é resultado dessa condensação de aluminatos e silicatos (Severo et al., 2013).

Devido à presença de matéria orgânica na constituição das CF e á presença de alumínio, poderão existir problemas no comportamento e na resistência mecânica do material. O alumínio, quando colocado em meio alcalino, vai provocar a formação de bolhas de hidrogénio (Equação 6). A estabilização irá demorar um período indeterminado e se, coincidir com o tempo de presa, poderá causar perdas futuras ao nível do comportamento mecânico (Dhir et al., 2018). Aplicando um tratamento às CFRSU com uma mistura de água e NaOH, existirá uma conversão do alumínio em aluminatos, o que implica melhores propriedades do material.

$$2NaOH + 2\,Al + 2H_2O \rightarrow 2NaAlO\,2 + 3H_2$$ *Equação 6*

Comparando as CV e as CFRSU, as CFRSU apresentam uma menor resistência em misturas ativadas alcalinamente pois apresentam partículas grandes e porosas, o que leva a uma reatividade reduzida (Chindaprasirt et al., 2009). Porem, as CV como possuem um elevado grau de polimerização leva a uma maior resistência. Jaturapitakkul e Cheerarot (2003) testaram a reatividade das CFRSU com uma granulometria mais fina e obtiveram maiores resistências, porem não se igualam às das CV (Hanjitsuwan et al., 2017).

A dosagem de AA é um fator que irá influenciar a eficácia da polimerização. A dosagem ótima do Na_2O pode ser superior a 14% da massa do ligante. Contudo, uma dosagem excessiva pode provocar efeitos adversos, formando uma solução alcalina demasiado forte, reduzindo a conectividade entre os iões de silicato e acelerando a dissolução do gel tornando-a superior à criação do mesmo.

2.5 Propriedades de betões ativados alcalinamente com cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos

Nesta secção, apresenta-se estudos realizados por diferentes investigadores, relativamente às propriedades de betões ativados alcalinamente com CFRSU. Para além de existirem muito poucas investigações relevantes, quase todas são referentes à utilização de CFRSU como precursor de argamassas e não de betão. Dentro dos materiais pozolânicos, a CFRSU tem recebido menos atenção na produção de MAA. Numa comparação com as CV, CFRSU apresenta menor resistência. Foi reportado por Chindaprasirt et al. (2009) que as CV desenvolvem maior resistência, devido ao seu elevado grau de polimerização e forma, e que a forma das partículas de CFRSU, sendo grandes e

porosas, conduz a menor reatividade. Jaturapitakkul e Cheerarot (2003) analisaram a reação pozolânica com a granulometria adequada. Foi concluído que, se a CFRSU for suficientemente fina, consegue obter resistências elevadas, mas sempre inferiores às das CV (Hanjitsuwan et al., 2017).

2.5.1 Resistência à compressão

Casanova et al. (2021) investigaram a influência de CFRSU em argamassas com e sem AR. Através dos valores observados na Figura 3, os autores concluíram que, para as amassaduras com a mesma condição de cura, há uma redução da capacidade resistente, confirmando as fracas propriedades intrínsecas do AR. Com a substituição de AN por AR, em cada uma das condições de cura, houve uma redução de 50-70% dos valores de resistência à compressão. Torna-se importante referir que, nas argamassas ativadas alcalinamente com AR, a compensação de água foi feita de maneira diferente em comparação com as misturas de betão corrente (2/3 de água no início da amassadura + 1/3 adicionado mais tarde), o que leva uma dinâmica de absorção de água interna ainda desconhecida. Complementarmente, os AR podem absorver o AA em vez da água de compensação ou poderá haver migração de OH^- para o seu interior, diminuindo a alcalinidade da solução envolvendo as partículas do percursor. Adicionalmente, o formato irregular dos AR por oposição ao arredondado da areia criou uma maior fricção entre partículas e, consequentemente, uma menor compacidade dos provetes.

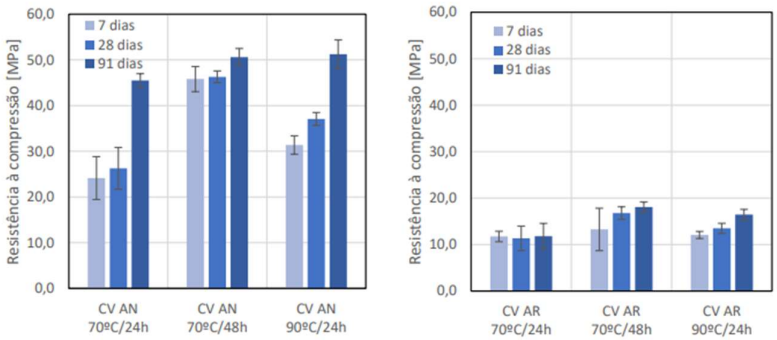

Figura 3 - Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família a) CV-AN e b) CV-AR (Casanova et al. 2021).

Avila et al. (2022) produziram famílias de argamassas substituindo CV por CFRSU em percentagens de 0% (0.0 M), 25% (0,25 M), 50% (0,5 M), 75% (0,75 M) e 100% (1,0 M). As famílias foram divididas em dois grupos, uma em que o AA era constante (AAC) e outra em que o AA era o ótimo para a composição definida (AAO). No entanto, serão apenas considerados os valores de AAC na presente revisão. De referir que os rácios utilizados foram: ligante / agregado (l/ag) igual a 0,33 e água / ligante (a/l) de 0,4 (quantidade total de água que corresponde à da solução de silicato de sódio e da água adicionada). Após moldados, os provetes estiveram durante 24 horas em condições de temperatura ambiente, cobertos por uma película plástica, e posteriormente colocados num forno a 80 ºC durante 24 horas. Depois, as amostras foram seladas com uma película plástica até ao dia do teste. A partir dos valores da resistência à compressão, Avila et. al. (2022) verificaram que os valores de resistência à compressão das misturas com CFRSU foram bastante baixos e que, quanto maior a quantidade de CFRSU adicionada, menor foi a resistência. No entanto, estas amostras foram também colocadas numa câmara de carbonatação

acelerada durante 7, 14 e 28 dias, ou seja, idade total do provete igual a 35, 42 e 56 dias, respetivamente, após a produção da mistura. A resistência à compressão aumentou consideravelmente em relação aos valores antes da carbonatação. A resistência à compressão da mistura 1.0 M foi de 19.1 MPa, demonstrando um aumento percentual de 140% comparativamente com a mistura não carbonatada (8.08 MPa). Para a mistura 0.5 M, o aumento percentual foi de 40%. Para a mistura 0.0 M, a resistência à compressão teve um aumento percentual de 30% depois de 28 dias de carbonatação. Esta melhoria de desempenho deve-se à descalcificação de fases contendo cálcio, que, reagindo com o CO_2 dissolvido na solução dos poros, levou a uma precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) nos poros capilares da matriz. Isto levou a um aumento da densificação e coesão microestrutural, que, consequentemente, aumenta a resistência à compressão.

2.5.2 Resistência à tração

Casanova et al. (2021), nos provetes com cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos ativada alcalinamente (CFRSUAA) produzidos, realizaram ensaios de resistência à flexão. Os valores podem ser observados na Figura 4. Os autores concluíram que, para a resistência à flexão, há uma progressão linear nas argamassas produzidas com AN, mas tal não se verificou nas argamassas com AR. Nas misturas com CFRSU e AN, existiu um desenvolvimento constante ao longo do tempo da resistência à flexão, enquanto, para as misturas com AR, foi verificada uma reduzida progressão da mesma. A justificação dada pelos investigadores foi que estes valores advêm das propriedades intrínsecas dos AR, especialmente a absorção de água. Esta elevada absorção de água não permite garantir que a água de compensação seja completamente absorvida pelos AR, pelo que pode existir absorção do AA pelos AR ao longo do processo de mistura.

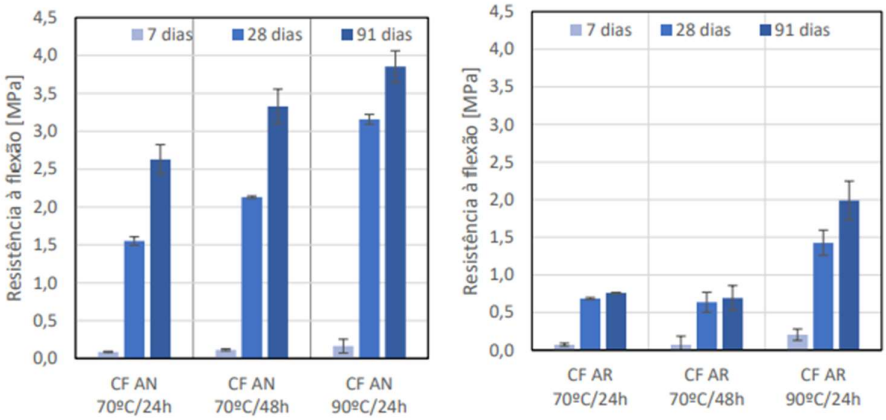

Figura 4 - Relação entre a resistência à flexão e as condições de cura nas argamassas CF AN e AR (Casanova et al., 2021).

Carvalho et al. (2021) produziram MAA baseados em CV e CFRSU, com variação das proporções do AA, e compararam com argamassas de cimento não ativado alcalinamente. Nas misturas produzidas com uma relação de líquido / ligante de 0,5, foram executados ensaios de resistência à flexão a 7 e 28 dias (Figura 5).Os investigadores observaram que, para as misturas com CV e CF, a resistência à tração aumentou em cerca de 100% entre os 7 e os 28 dias, comparado com menos de 30 % para as misturas com CP. Dentro deste aumento, as misturas que se destacam são as com CV. Uma conclusão relevante desta campanha foi a lentidão do processo de polimerização, fazendo com que o

desenvolvimento da resistência se prolongasse no tempo, mesmo depois da cura térmica.

Avila et al. (2022) produziram argamassas ativadas alcalinamente com CV e CFRSU. As argamassas produzidas foram submetidas a uma cura em câmara seca e a uma cura em câmara de carbonatação acelerada. Nos ensaios de flexão realizados para as argamassas com uma cura em câmara seca, foi observado que, com a substituição de CV por CFRSU, os valores de resistência à flexão foram decrescendo, sendo o valor mais baixo na mistura com 100% CFRSU. Quando submetidas a uma cura de 28 dias em câmara de carbonatação acelerada, os valores tiveram um aumento substancial. Na mistura 1,0 M, após 28 dias de carbonatação acelerada, a resistência à tração foi de 4,4 MPa (~185% superior ao valor máximo obtido na mistura não carbonatada - 1,58 MPa). Para a mistura de 0,5 M, foi obtido um aumento percentual de 28%. Isto deve-se ao facto de esta conter uma quantidade de cálcio superior, onde o CO_2 vai reagir diretamente com C-A-S-H gel produzindo $CaCO_3$ (Zhang et al., 2020).

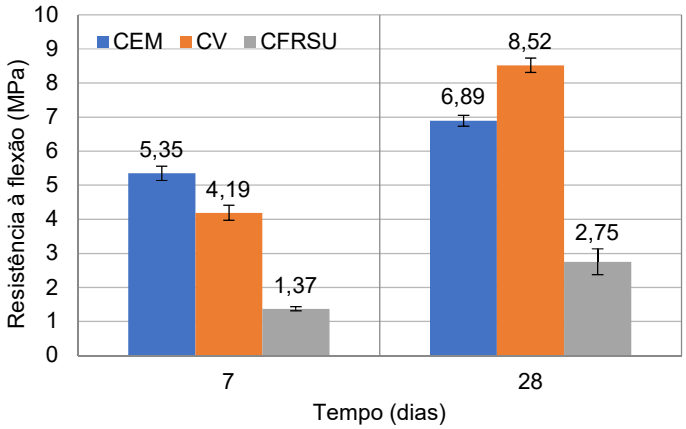

Figura 5 - Resistência à tração em argamassas a 7 e 28 dias (adaptado de Carvalho et al., 2021).

2.5.3 Módulo de elasticidade

No estudo de Casanova et al. (2021), foram realizados ensaios ao módulo de elasticidade. Como este corresponde à rigidez do material, foi realizada uma comparação entre os valores do módulo de elasticidade e as respetivas densidades aparentes. Verificou-se que, quanto maior a densidade aparente, maior será o módulo de elasticidade (Tabela 1). A inclusão de AR nas misturas provocou uma diminuição de 70% do módulo de elasticidade das amassaduras. Este comportamento pode ser justificado visto que os AR têm um grande volume de vazios devido à porosidade das argamassas presentes na sua constituição. O módulo de elasticidade para as misturas com CFRSU revela uma melhor nitidez quanto ao seu crescimento gradual nas amassaduras com AN. O módulo de elasticidade revela consequências de cura inicial, apesar de a densidade aparente das misturas se manter constante entre condições de cura. Foi visto por Casanova et al. (2021) que, quando se submete os provetes a uma cura de 90 ºC durante 24 h, estes desenvolvem uma melhor capacidade resistente. No entanto, a longo prazo e com temperaturas menores, os valores tornam-se semelhantes. Através dos resultados da Tabela 1, foi concluído que existiu um decréscimo nos valores de módulo de elasticidade para as misturas com CFRSU com AN e AR de cerca de 70 e 88%, respetivamente, em comparação com a argamassa de referência.

Avila et al. (2022) executaram um ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, a 7, 28, 91 e 182 dias. Concluiu-se que o valor máximo do ensaio a 28 dias corresponde à mistura com 100% de CV. Os valores mínimos corresponderam às misturas com 75% de CFRSU (i.e. 4,96 GPa) usando um AA ótimo e 100% de CFRSU (i.e. 4,44 GPa) com AA constante. Esta tendência manteve-se para tempos de cura mais longos. O módulo de elasticidade correlaciona-se com a densidade aparente, e é afetado pela coesão das partículas e a presença de microfissuração no material no estado endurecido. Dadas as características da CFRSU, seria expectável que os provetes prismáticos com uma maior quantidade deste percursor apresentassem um valor de módulo de elasticidade menor.

Tabela 1 - Módulo de elasticidade de cada uma das famílias estudadas a 7, 28 e 91 dias (adaptado de Casanova et al., 2021).

Famílias	7 dias		28 dias		91 dias	
	Valor médio [GPa]	σ	Valor médio [GPa]	σ	Valor médio [GPa]	σ
CV AN 70/24	19,5	0,63	25,5	0,47	27,1	0,26
CV AN 70/48	24,7	0,42	24,5	3,11	32,5	5,18
CV AN 90/24	6,2	0,7	25,1	2,56	28,5	0,39
CV AR 70/24	6,8	1,95	6,6	1,15	7,3	0,4
CV AR 70/48	9,7	0,27	9,5	0,08	10,3	0,29
CV AR 90/24	7,8	0,16	8	0,00	9,3	1,03
CF AN 70/24	6,3	0,29	8,8	0,56	10,6	0,43
CF AN 70/48	6,7	0,43	10,6	0,37	12,6	0,3
CF AN 90/24	6,7	0,1	9,8	2,31	12,7	2,26
CF AR 70/24	3,7	0,39	3,2	0,33	3,1	0,00
CF AR 70/48	3,5	0,49	2,1	1,22	2,7	0,31
CF AR 90/24	4,3	0,91	3,7	0,11	4,6	0,27

2.6 Propriedades de betões ativados alcalinamente com cinza volantes

2.6.1 Resistência à compressão

Casanova et al. (2021) investigaram a influência da quantidade de CV e a diferença entre conter AN e AR. Através dos valores observados na Figura 6, os autores concluíram que, para a maioria das famílias de amassaduras, existiu um crescimento entre todas as idades. Contudo, existiram exceções tal como para a mistura CV-AR 70/24 em que os valores não diferiram entre idades. Os autores explicaram que isto resultou da dificuldade de desmoldagem de alguns provetes devido à ineficácia do óleo descofrante, que deixou falhas na pasta e tornou-as irregulares. Os autores concluíram ainda que, para as CV, a condição de cura ideal é durante 48 horas a 70 ºC. Isto deve-se ao processo de ativação alcalino ter como base uma reação endotérmica. Contudo, foi referido que existe a possibilidade de obter valores semelhantes aos obtidos, submetendo as amassaduras a uma cura de 90 ºC durante 24 horas.

Shi et al. (2012) investigaram as propriedades mecânicas de betões com CV ativada alcalinamente com AR e AN. Foram produzidas três misturas com CP e outras três com CV ativada. Na Tabela 2, encontram-se alguns dos valores da resistência à compressão obtidos pelas famílias produzidas. Analisando os valores, denota-se um melhor desempenho dos betões com CV em relação aos produzidos com CP. Contudo, com o aumento do tempo de cura, houve um aumento mais rápido da resistência à compressão dos betões com CP. Isto deve-se ao facto de as reações de polimerização

serem dependentes da temperatura. A temperatura do forno acelerou a polimerização, verificando-se um aumento reduzido da resistência depois desse processo.

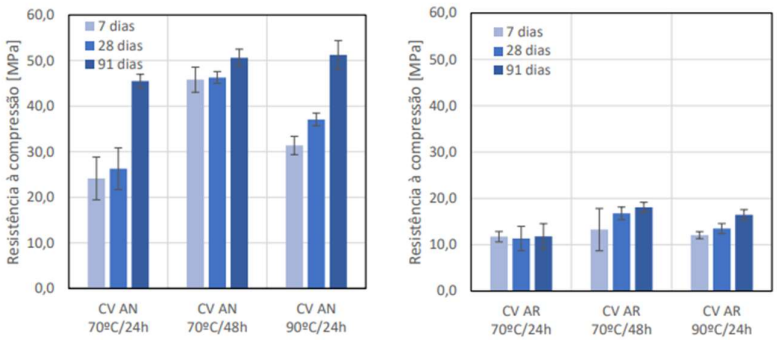

Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família a) CV-AN e b) CV-AR

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

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

2.6.2 Resistência à tração

Fang et al. (2018) produziram várias misturas com CV ativada alcalinamente, nas quais fizeram ensaios de resistência à tração. Verificou-se que os valores de resistência a tração eram menores do que os previstos pelas normas CI 318-08 (2005) e Eurocódigo 2 (2004) (Sofi et al., 2007; Lee e Lee, 2013). Os investigadores referiram que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dependem muito das propriedades químicas e físicas dos materiais e o tipo de AA. A resistência à tração aumentou com o aumento do tempo de cura das misturas. Foi visto também que, com o aumento da molaridade de hidróxido de sódio, houve um aumento da resistência à tração.

Casanova et al. (2021) observaram as mesmas tendências do que as da resistência à compressão. Nas misturas feitas com CV ativada, verificou-se que a melhor solução de cura inicial era a 70 ºC durante 48 horas. Contudo, é importante referir que foi também observado que, ao comparar os valores da cura de 70 ºC/48 h com os valores da cura a 90 ºC/24 h, não ocorreu uma variação significativa, chegando a ter melhores resultados com esta última.

2.6.3 Módulo de elasticidade

Casanova et al. (2021) avaliaram o módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com CV ativadas alcalinamente (Figura 7). Os autores verificaram um decréscimo de 12% na densidade aparente nas amassaduras CV-AR correspondente a uma diminuição de quase 70% no valor de módulo de elasticidade. Tal deve-se às propriedades dos AR resultarem numa microestrutura enfraquecida devido

ao grande volume de vazios. Comparativamente com a resistência à compressão referida em 2.6.1, estes valores coincidem com o comportamento indicado, ou seja, revelaram uma melhor resposta para as amassaduras submetidas a 70 ºC durante 48 horas, tanto para AN como para AR. Foi também observado um aumento desproporcional do módulo de elasticidade de cada uma das misturas de 28 para 91 dias e uma diminuição da densidade aparente, devido à perda de água intersticial ao longo do tempo. De referir que as misturas com CV-AN foram as que mais se aproximaram dos valores da mistura de referência (os valores obtidos para 7, 28 e 91 dias foram 35,6 GPa, 38,4 GPa e 40,7 GPa, respetivamente).

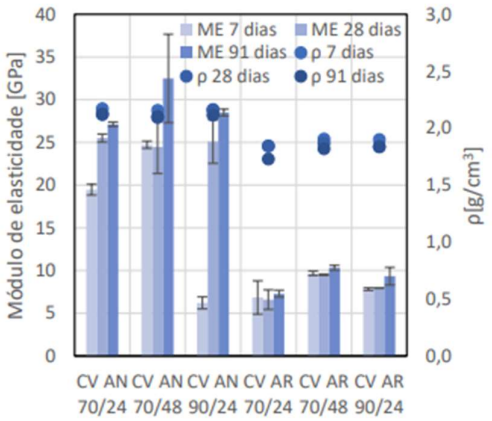

Figura 7 - Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CV (Casanova et al., 2021).

Ruengsillapanun et al. (2021) produziram provetes ativados alcalinamente e posteriormente ensaiaram ao módulo de elasticidade a 28 e 90 dias (Tabela 3). Para o betão produzido com CP, o módulo de elasticidade tende a aumentar com a resistência à compressão (Hama, 2017; Siddique, 2003; Huang et al., 2013). No entanto, o módulo de elasticidade para BAA com CV diminuiu em comparação com a aproximação da equação de ACI 318 (2008). Foi possível observar que, para as misturas em que a molaridade é de 2, quanto maior o rácio de Na_2SiO_3/NaOH, maior foi o módulo de elasticidade. Alterando a molaridade e deixando constante o rácio de Na_2SiO_3/NaOH de 0.3, o módulo de elasticidade aumenta. No entanto quando a molaridade chega a 8, o valor da propriedade diminuiu.

Tabela 3 - Módulo de elasticidade de CV ativada alcalinamente a 28 e 90 dias (adaptado de Ruengsillapanun et al., 2021).

Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)	
	28 dias	90 dias
NS0M2	7,8	8,9
NS03M2	12,8	13,2
NS04M2	13,7	15,3
NS05M2	18,9	22,2
NS03M4	15,3	17,5
NS03M6	16,1	21,9
NS03M8	15,8	18,6
NS04M4	16,7	17,8

2.7 Betões ativados alcalinamente com agregados reciclados

Na presente secção, são apresentados estudos realizados acerca das propriedades de betões ativados

alcalinamente com agregados reciclados. As propriedades estudadas são as referidas acima nos outros tipos de betões. São também apresentados betões produzidos com AN, com e sem ativação alcalina.

2.7.1 Resistência à compressão

Abdollahnejad et al. (2019) concluíram que a substituição de AN por AR tende a reduzir a resistência mecânica das misturas ativadas alcalinamente (Parthiban et al., 2016, Shaikh et al., 2016, Lee et al., 2018, Ahmari et al., 2012, Shi et al., 2012, Tang et al., 2019). Observaram que, na substituição total de AN por AR, há perdas de resistência de mais de 50% e que, na substituição até 50%, as perdas são menos significativas (menos do que 20%). Aquando da adição de AR em betões ativados alcalinamente e noutros materiais cimentícios, há três grandes preocupações:

- os AR têm uma estrutura porosa e fissurada / fendilhada e esta estrutura interfere com a resistência mecânica do betão (Pacheco-Torgal et al., 2013). Estas propriedades estão associadas com as propriedades dos ligantes antigos e britagem (Behera et al., 2014);
- em geral, quando uma fenda / fissura se encontra com um agregado, esta passa pelo agregado ou propaga-se pela zona interfacial de transição (ZIT) entre o agregado e o ligante, sendo que tal depende de qual dos intervenientes é o menos resistente. No betão de alta resistência, as fendas propagam-se pelos AN, devido à capacidade resistente da ligação na ZIT ser muito forte, mas em betões de baixa resistência estas fendas propagam-se pelas ZIT (Rahal et al., 2018). Quando se junta AR à equação, tudo se torna mais complexo. Existem quatro áreas possíveis em que pode haver efeitos, três das quais envolvem as propriedades de ligação na ZIT:
    - a força do AN;
    - as propriedades de ligação da argamassa antiga e AN na ZIT;
    - as propriedades de ligação da argamassa antiga e da nova matriz na ZIT;
    - e as propriedades de ligação da nova matriz e AN na ZIT (Xiao et al., 2012).

Isto pode ser observado em detalhe na Figura 8. Uma ZIT mais densa e forte pode ser formada com a contribuição do cálcio não reagido proveniente das argamassas cimentícias ao AR e dá-se a formação de C-A-S-H, que modifica a microestrutura da matriz (Nuaklong et al., 2016 e Ren et al., 2019). Xie et al. (2019) concluíram que o teor de cálcio não reagido de argamassas cimentícias aderidas aos AR em escória granulada de alto-forno de materiais ativados alcalinamente carbonatados à base de metacaulino e fornece o cristal de calcite ($CaCO_3$).

Shaikh et al. (2016) realizaram ensaios em quatro séries de betões produzidos com CV ativadas com substituição parcial de ANG por ARG. Como termo de comparação, foi usada uma primeira mistura (GPC0), uma série de controlo com 100% ANG. As substituições feitas foram de 15% (GPC15), 30% (GPC30) e 50% (GPC50) do peso dos ANG considerados no GPC0. Após a produção dos vários betões, estes foram colocados numa cura térmica de 60 ºC, durante 24 h e, posteriormente, desmoldados e mantidos à temperatura ambiente até à data dos ensaios, a 7 e 28 dias após a betonagem. Na Tabela 4, é possível observar que os valores obtidos a 7 dias vão decrescendo à medida que a percentagem de ARG aumenta e, que de 7 dias para 28 dias, o aumento de resistência é residual para as misturas ativadas alcalinamente.

Isto demonstra que o ganho de resistência à compressão ocorre nos primeiros dias de idade.

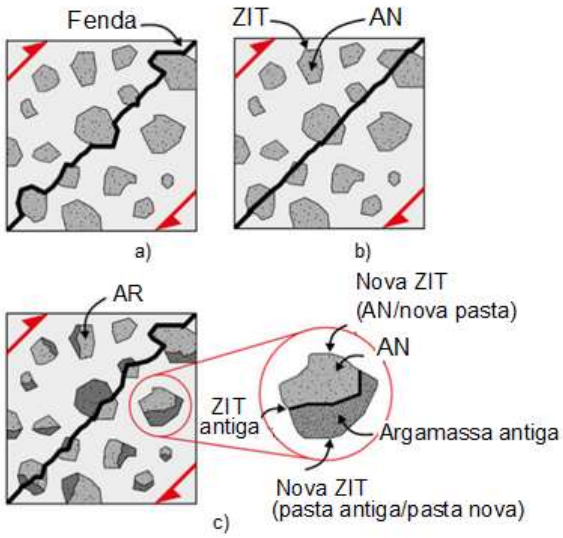

Figura 8 – Propagação de fendas em composições diferentes de agregados: (a) com resistência normal, (b) com alta resistência, (c) AR com resistência normal e diferentes ZIT na composição de AR (adaptado de Parthiban et al. (2016) e Abdollahnejad et al. (2019)).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas e de durabilidade de betões ativados alcalinamente contendo diversos teores de ARG em substituição parcial ao ANG (adaptado de Shaikh et al., 2016).

Misturas	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
GPC0	41,1	45,3
GPC15	40,6	41,8
GPC30	37,4	37,6
GPC50	35,0	36,8

Damrongwiriyanupap et al. (2022) fizeram um estudo onde se produziu 18 misturas diferentes, seis delas o ligante com CP e com substituição gradual de AN por AR. As restantes 12 misturas foram ativadas alcalinamente, sendo seis delas com 100% CV com alto teor em cálcio e as outras seis com uma pequena percentagem de sílica de fumo (SF) adicionada. Houve substituição parcial dos AN por AR em 10 das 12 MAA. Nas MAA, os rácios utilizados foram de 1.0 para $\frac{(Na_2SiO_3)}{(solução\ de\ NaOH)}$ e de 0,5 de água / ligante e, como abaixamento, foi admitido que seria de 200 ± 25 mm de modo a obter uma boa trabalhabilidade. Após a produção de cada mistura, os provetes foram deixados a curar por 24 horas. A 28 dias, para as misturas com CV, a resistência à compressão aumentou com a substituição de ANG por ARG. Verificou-se também um aumento com a substituição parcial de CV por SF, chegando a valores entre 46,0-51,3 MPa. Este aumento deve-se ao óxido de silício reativo da SF ter reagido com CaO das CV, tendo formado C-S-H, que coexiste com o N-A-S-H (Hanjitsuwan et al., 2020, Sukontasukkul et al., 2020). Foi demonstrado por Hanjitsuwan et al. (2020) e Phoo-Ngernkham et al. (2020) que a coexistência de C-S-H e N-A-S-H contribui para a resistência. Esta formação de C-S-H adicional foi obtida através da reação do $Ca(OH)_2$ presente nos ARG ter reagido com o SiO_2 e Al_2O_3 dos percursores tornando-se assim os produtos da reação pozolânica (Rattanachu et al., 2019). Isto está também de acordo com o estudo de Li et al. (2017),

que indicou que, quanto maior o teor de CaO presente na mistura, maior será a resistência da ligação da ativação alcalina. No entanto, é visível que não acontece o mesmo para o betão com CP. Existe uma redução de resistência do betão corrente com o aumento da quantidade de ARG. Essa redução deve-se à ZIT ter enfraquecido (Sata et al., 2013). Kroehong et al. (2011) observaram que a existência de $Ca(OH)_2$ no CP leva a muitas reações químicas, que criam expansões e fissuras no betão. Adicionalmente, foi demonstrado que um alto teor de humidade e elevado valor de absorção de água dos ARG pode levar a uma redução do rácio a/l (Rattanachu et al., 2019). Damrongwiriyanupap et al. (2022) concluíram que a substituição de ANG por ARG é uma mais-valia para a produção de BAA.

2.7.2 Resistência à tração

Parthiban et al. (2017) fizeram duas tipologias de betão, em que uma é feita com CP e a outra com escória ativada alcalinamente. Nesta última, fez-se uma substituição parcial de AN por AR. Os investigadores concluíram que a resistência à tração no betão com 100% de substituição de AN por AR é maior do que a de um betão com 0% de substituição, o que demonstra que resistência à compressão não é muito influenciada pela adição de AR.

Gunasekara et al. (2020) produziram três misturas, uma de CP como referência e duas ativadas alcalinamente. Nestas últimas, uma foi feita com 100% de AN e a outra com 50% de ARG. As misturas foram ensaiadas à resistência à tração a 28, 90 e 365 dias. A 28 dias, o valor da MAA com AR é superior ao da mistura com 100% AN. Gunasekara et al. (2020) referem que a resistência à tração depende da resistência da ligação dos agregados desenvolvida na zona interfacial de transição. Os autores observaram que o plano de fratura nas duas misturas passava na zona em volta dos agregados, referindo também que a ligação entre a gel da matriz e a pasta de cimento antiga proveniente dos agregados reciclados aumentou com o tempo e compensou em parte o efeito negativo da utilização de agregados reciclados mais fracos.

2.7.3 Módulo de elasticidade

Damrongwiriyanupap et al. (2022) averiguaram o módulo de elasticidade, como descrito no ASTM C469 (2014). Uma tensão maior foi observada com o aumento da substituição de ARG, como observado na Tabela 5. O módulo de elasticidade nas misturas com CP aumentou com o aumento da substituição de ARG, o que vai contra a tendência da literatura (Evangelista e Brito, 2007). Isto deve-se, provavelmente, ao facto de os autores terem comparado betões com composições diferentes. Contudo, nas misturas ativadas alcalinamente, quanto maior a reposição de ANG por ARG, mais o valor do módulo de elasticidade tende a diminuir (Damrongwiriyanupap et al. 2022). Os investigadores referem que, para o módulo de elasticidade, os agregados e a pasta ligante têm um papel importante (Tangchirapat et al. 2012), daí a incorporação de ARG ter resultado numa diminuição do módulo de elasticidade nas misturas ativadas alcalinamente com CV. No entanto, as MAA com CV e sílica fumo (SF) tiveram um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da substituição de ANG por ARG. Damrongwiriyanupap et al. (2022) justificam isto dizendo que o aumento se deve provavelmente ao $Ca(OH)_2$ nas superfícies dos ARG terem reagido com SiO_2 das CV e da SF e também devido à reação de hidratação das partículas de cimento que não reagiram. Os resultados destes autores são semelhantes aos de outros estudos passados (Phoo-Ngernkham et al., 2018, Shariq et al., (2013), Nath

e Sarker 2017). Os valores foram entre 17 e 25 GPa para o BAA e 25 e 35 GPa para o betão corrente.

O módulo de elasticidade está muito relacionado com a rigidez dos agregados grossos, da argamassa, com a porosidade e também com a ligação entre eles (Neville 1995; Coutinho e Gonçalves 1994). Para pequenas proporções de substituição, é possível que a rigidez global não seja muito influenciada, porque a rigidez da argamassa é apenas um de vários fatores. No entanto, para uma substituição total, a argamassa perde uma grande parte da sua rigidez, que faz com haja um grande efeito adverso no módulo de elasticidade.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade para as várias misturas (adaptado de Damrongwiriyanupap et al., 2022).

Símbolo da mistura	E (GPa)	Símbolo da mistura	E (GPa)
AAHFAC-0RCA	16,3	**AAHFAC-SF-60RCA**	19,5
AAHFAC20RCA	17,3	**AAHFAC-SF-800RCA**	18,1
AAHFAC-40RCA	13,9	**AAHFAC-SF-100RCA**	18,5
AAHFAC-60RCA	14,5	**NC-0RCA**	29
AAHFAC-80RCA	14	**NC-20RCA**	32,2
AAHFAC-100RCA	11,1	**NC-40RCA**	30,3
AAHFAC-SF-0RCA	18,3	**NC-60RCA**	31,1
AAHFAC-SF-20RCA	20,2	**NC-80RCA**	32,9
AAHFAC-SF-40RCA	22	**NC-100RCA**	33,8
AAHFAC-SF-60RCA	19,5		

3 Campanha experimental

A campanha experimental foi executada em três fases distintas de modo a obter os melhores resultados e ultrapassando eventuais problemas experimentais. Na primeira, foi feita a caracterização completa dos materiais utilizados na produção do betão. Aos agregados, foram feitos ensaios de análise granulométrica, de massa volúmica, baridade e absorção de água. Aos AR, foi ainda efetuado um ensaio de caracterização. Na segunda fase, foram feitos ensaios ao betão no estado fresco, sendo estes: ensaio de consistência e massa volúmica do betão. Na fase final, foram executados ensaios de resistência mecânica ao betão no estado endurecido. Para isso, recorreu-se à realização de ensaios de resistência à compressão (antes e após carbonatação), resistência à tração e módulo de elasticidade.

3.1 Elementos constituintes dos diferentes betões

Tradicionalmente, o betão é produzido usando apenas água, CP (ligante) e agregados. Contudo, na presente dissertação, analisou-se betões ativados alcalinamente com 100% de AR com dois tipos de ligantes reciclados. Na ativação alcalina, foram utilizados hidróxido de sódio e silicato de sódio, e recorreu-se à utilização de um redutor de água e retardador de presa.

3.1.1 Água

A água utilizada na produção dos betões é proveniente da rede pública. A quantidade necessária para os betões com CP tem em conta a relação a/l efetiva de 0,5. Nos betões ativados alcalinamente, a água depende da concentração do silicato de sódio. Teve de ser feita uma redução da água adicionada visto que a solução de silicato de sódio já tem na sua constituição. É importante referir que a relação a/l efetiva de 0,5 manteve-se igual em todas as misturas.

3.1.2 Hidróxido de sódio

Na produção do AA, o hidróxido de sódio (ou soda cáustica) utilizado tinha uma pureza de > 99%. Este produto encontrava-se no estado sólido na forma de pequenas pérolas, tendo sido fornecido pela empresa “Crimolara”.

3.1.3 Silicato de sódio

Nesta investigação, optou-se por ter a solução alcalina de silicato de sódio, produzida previamente pela empresa “Crimolara”. O rácio do AA (SiO_2/Na_2O) utilizado na presente dissertação foi de 0,5.

3.1.4 Adjuvantes

Para evitar a presa rápida das amassaduras ativadas alcalinamente, foi utilizado tetraborato de sódio ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$). Este adjuvante foi fornecido pela empresa “Crimolara” e apresenta, na sua constituição, B_2O_3 (36,47-38,50%), Na_2O (16,24-17,14%), SO_4 (máx 135 ppm), Cl (máx 70 ppm) e ainda Fe (máx 10 ppm).

Foi também utilizado o redutor de água Sikaplast-717, da empresa “Sika Portugal”, com uma combinação de dispersantes orgânicos sintéticos de naftaleno em base aquosa.

3.1.5 Agregados naturais

Como AN fino, foi utilizada areia de natureza siliciosa, sendo que esta tem duas granulometrias, areia fina e grossa. As dimensões das partículas constituintes da areia fina variam entre 0 e 1 mm, enquanto a areia grossa varia entre 0 e 4 mm. Os agregados naturais grossos de natureza calcária utilizados foram: “Bago de Arroz”, “Brita 1” e “Brita 2”, que apresentaram granulometria entre 1 e 5,6 mm, 5,6 e 11,2 mm, e 11,2 e 22,4 mm, respetivamente.

3.1.6 Agregados reciclados

Nesta investigação, foi utilizada uma combinação de agregados finos e grossos, provenientes da empresa de Vimajas. Na divisão granulométrica destes agregados, foram utilizadas dez frações granulométricas com o objetivo de manter a curva dos AN. Para o agregado reciclado fino (ARF), foram utilizadas cinco dessas frações: 0-0,25mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm, e 2-4 mm. As cinco restantes frações foram utlizadas para a divisão do ARG: 4-5,6 mm, 5,6-8 mm, 8-11,2 mm, 11,2-16 mm, e 16-22,4 mm. Para facilitar a obtenção das menores granulometrias, foi utilizado um processo de moagem do AR com auxílio da máquina de Los Angeles (Figura 9) e posteriormente uma peneiração.

Figura 9 - Processo de peneiração (esquerda) e moagem via máquina de Los Angeles (direita).

3.1.7 Cimento

Na produção do betão, foi utilizado CEM I 42,5R, proveniente da empresa “Secil”.

3.1.8 Cinzas volantes

As CV utilizadas na produção dos betões foram aprovisionadas pela empresa “EDP”. Pertencem à classe F de pozolanicidade de acordo com a norma ASTM C618 (2019) que identifica os requisitos químicos necessários para as CV serem utilizadas em betão (soma de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 superior a 70%).

3.1.9 Cinza de fundo de resíduos sólidos urbanos

A CFRSU (Figura 10) foi produzida na Central de Tratamento de RSU da empresa “Valorsul”. Este ligante é composto por: metais, vidros, plásticos, tecidos e porcelanas. Devido à dimensão dos constituintes da CFRSU, foi necessária uma moagem da mesma, com o objetivo de obter uma granulometria semelhante à de um ligante tradicional, ou seja, partículas abaixo de 0,125 mm e com um tamanho médio de 45 µm.

Figura 10 - "Big Bag" com CFRSU.

3.2 Composição dos diferentes betões

Na presente investigação, foi aplicado o método das curvas de referência de Faury, com o objetivo de ajudar na determinação da composição do betão produzido durante a campanha experimental. Para o betão de referência, foram adotados os seguintes pressupostos de acordo com a NP EN 206:2013+A1 (2017):

- **classe de resistência:** C30/37;
- **classe de exposição ambiental:** XC3 + XS1;
- **classe de consistência:** S3;
- **máxima dimensão dos agregados:** 22,4 mm.

3.2.1 Curva de referência de Faury

A compacidade do betão e, consequentemente, as suas propriedades no estado fresco e endurecido, são influenciadas diretamente pela composição granulométrica do betão. No âmbito da investigação, foi utilizada a curva de referência de Faury, com o intuito de se determinar a quantidade ponderada de cada um dos agregados na composição final do betão.

Esta curva de referência de Faury é definida por três pontos, que formam dois segmentos de reta. Estes são representados num diagrama no qual o eixo das ordenadas corresponde à percentagem de material que passa pelas várias malhas dos peneiros e o eixo das abcissas refere-se às dimensões das aberturas das malhas dos peneiros. No eixo das abcissas, os valores variam entre 0,0065 mm, que corresponde à menor dimensão das partículas, e 22,4 mm que corresponde à maior dimensão de partículas ($D_{Máx}$). No caso das ordenadas, os valores variam de 0 a 100% da percentagem passada de material.

Para terminar o processo de construção da curva de referência de Faury, foi necessário determinar o ponto intermédio, que corresponde à abcissa igual a $D_{Máx}/2$. De modo a obter o valor correspondente no eixo das ordenadas, recorreu-se à Equação 7.

$$Y_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D_{Máx}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{Máx}} - 0{,}75} \qquad \text{Equação 7}$$

Na Equação 7, os parâmetros A e B, que dependem tanto da natureza dos agregados como da trabalhabilidade do betão, são valores sugeridos por Faury e podem ser consultados na Tabela 6.

Tabela 6 - 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

Tendo os valores de A e B, foi definido o ponto intermédio:

$$x = {D_{Máx}}/{2} = \frac{22{,}4}{2} = 11{,}2 \text{ mm} \qquad \textit{Equação 8}$$

$$Y_{D/2} = 30 + 17\sqrt[5]{22{,}4} + \frac{2}{\frac{22{,}4}{22{,}4} - 0{,}75} \qquad \textit{Equação 9}$$

Com a determinação deste ponto intermédio, finalizou-se o traçado da curva de referência de Faury, sabendo-se assim a percentagem de cimento, em relação ao volume sólido total. É possível ainda determinar a curva de Faury sem cimento. Na Figura 11, apresenta-se as curvas de referência de Faury que foram utilizadas para a produção do betão, considerando e ignorando o conteúdo de cimento.

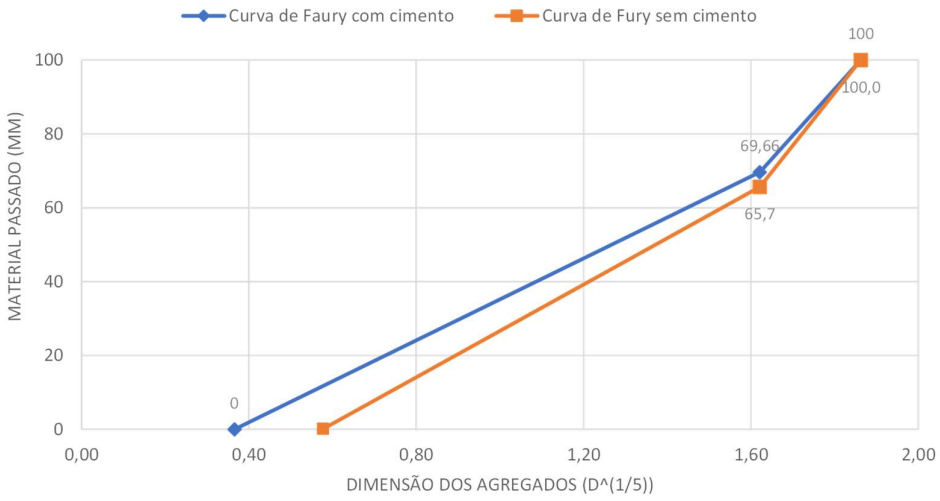

Figura 11 - Curvas de referência de Faury

De modo a calcular as percentagens e quantidades de agregados finos e grossos, utilizou-se o método da intersecção das curvas granulométricas dos agregados com a curva de referência de Faury. Para se fazer estes cálculos, ajustou-se a curva granulométrica dos agregados tanto quanto possível à curva de Faury,

sendo este processo realizado analiticamente via Excel com a menor soma dos quadrados das diferenças.

3.2.2 Composição e identificação dos betões

No âmbito da presente investigação, foram produzidos dez betões com composições diferentes em que, cinco serão produzidos com AN e os restantes cinco serão produzidos com apenas AR. Entre os dez tipos de betão, oito foram produzidos com diferentes percentagens de CV e CFRSU e as remanescentes com CP (

Tabela 7). As notações tomadas para as várias misturas, tiveram em conta a percentagem de cada ligante e o seu acrónimo e ainda o tipo de agregado utilizado na mistura. Analisando a notação 75CV:25CF:AR, tem-se 75% de CV mais 25% de cinza de fundo (CF) (equivalente a CFRSU) e 100% AR. Para as várias misturas, foi utilizado um rácio de água/ligante de 0,5, um rácio de superplastificante/ligante de 1, que equivale a 1% do peso total de ligante da mistura, um rácio de bórax/ligante de 4, que equivale a 4% do valor total de ligante, para o AA (SiO_2/Na_2O) foi utilizado um rácio de 0,5 e por fim foi utilizado um rácio de 15% para Na_2O/ligante. Os valores dos rácios utilizados foram escolhidos de acordo com valores já utilizados anteriormente dentro do projeto RinoPolyCrete, que tinham sido verificados como valores ótimos.

Mistura	Composição (kg/m3)			Agregado
	Ligante			
	CP	CV	CFRSU	
100CEM:AN	300	-	-	100% Natural
100CV:AN	-	300	-	
75CV/25CF:AN	-	225	75	
50CV/50CF:AN	-	150	150	
25CV/75CF:AN	-	75	225	
100CEM:AR	300	-	-	100% Reciclado
100CV:AR	-	300	-	
75CV/25CF:AR	-	225	75	
50CV/50CF:AR	-	150	150	
25CV/75CF:AR	-	75	225	

Tabela 7 - Misturas realizadas na presente campanha experimental.

Mistura	Composição (kg/m³)			Agregado
	Ligante			
	CP	CV	CFRSU	
100CEM:AN	300	-	-	100% Natural
100CV:AN	-	300	-	
75CV/25CF:AN	-	225	75	
50CV/50CF:AN	-	150	150	
25CV/75CF:AN	-	75	225	
100CEM:AR	300	-	-	100% Reciclado
100CV:AR	-	300	-	
75CV/25CF:AR	-	225	75	
50CV/50CF:AR	-	150	150	
25CV/75CF:AR	-	75	225	

Adicionalmente a esta tabela, nos anexos, é possível encontrar uma tabela (Tabela A10) com todos os constituintes e respetivas quantidades discriminadas.

3.3 Produção

Na produção dos diferentes betões, foram utilizados dois métodos de produção distintos, um para o betão apenas com CP, e outro para o betão que foi produzido com ligantes ativados alcalinamente, sendo estes CV e CFRSU. Dada a introdução de um AA na mistura, houve a necessidade de se

executar dois métodos de betonagem diferentes.

Para o betão apenas com cimento, o método de produção consistiu em:

- após o processo de humidificação da betoneira, colocou-se os agregados grossos, juntamente com 2/3 da quantidade de água prevista para a betonagem completa;
- concluídos 4 minutos, adicionou-se os agregados finos à mistura;
- após a junção dos agregados finos e passados 2 minutos de homogeneização, adicionou-se o cimento e introduziu-se o 1/3 da água que faltava;
- deixou-se homogeneizar a mistura durante mais 4 minutos, completando os 10 minutos previstos.

Relativamente ao betão ativado alcalinamente, o processo de produção é diferente do anterior, pois o ligante agora utilizado é AA. Para a execução da betonagem, foi necessária a mistura prévia de NaOH com CFRSU que será explicado abaixo.

No betão produzido com CV:

- fez-se uma mistura do total da água a utilizar na amassadura, com o hidróxido de sódio até se atingir uma solução homogénea, momentos antes da betonagem.

Para o betão com CV e CFRSU:

- 24 horas antes de se realizar a betonagem, misturou-se o total da água da amassadura com o NaOH e as CFRSU. Este pré-tratamento antes da betonagem deve-se ao fenómeno de expansão que advém da reação entre a água, o alumínio presente nas CFRSU e o NaOH que, ao reagirem produzem H_2, o que se torna prejudicial para o betão, aumentando a sua porosidade. Na mistura, fez-se também a adição de 1% do superplastificante como surfactante de modo a ajudar na homogeneização da mistura dada a propriedade hidrofóbica das CFRSU.

O método de produção para ambos os betões foi o seguinte:

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

3.4 Preparação dos provetes e condições de cura

Finalizadas as amassaduras, estas foram colocadas em moldes, sendo submetidas a uma cura térmica de 70 °C durante 24 horas. Terminada a cura térmica, são desmoldados apresentando as dimensões previstas na norma. Na presente investigação, foram produzidos 19 provetes (Figura 12) para cada uma das amassaduras previstas. Todos estes se encontram descritos na Tabela 8, assim como os respetivos ensaios e dimensões.

Figura 12 - Provetes realizados para cada amassadura.

Uma vez que houve uma cura térmica para as MAA, os moldes plásticos foram retirados da equação pois iriam sofrer deformações. Com o intuito de prevenir este fenómeno, foram então utilizados moldes metálicos para as MAA. Para a amassadura com apenas CP, foram utilizados moldes plásticos pois não são sujeitos a uma cura térmica.

Tabela 8 - Ensaios realizados para a campanha experimental e as dimensões dos vários provetes utilizados.

Ensaio	Idade do ensaio (dias)	Provete	Dimensões (cm)	N.º provetes	Vol. total (l)
Resistência à compressão	7	Cubo	15 x 15 x 15	3	10
	28			3	10
	91			3	10
Resistência à compressão em cilindros	28	Cilindro	15 x 30	2	11
Resistência à tração por compressão diametral	28	Cilindro		2	11
Módulo de elasticidade	28	Cilindro		Mesmos da tração	-
Compressão pós carbonatação em câmara de CO_2	28	Cubo	10 x 10 x 10	3	3

Para a produção dos provetes, seguiu-se o seguinte procedimento:

- primeiramente, montou-se e limpou-se os moldes (com o auxílio de uma escova de aço ou de uma catrabucha e chaves para apertar os moldes), seguida da aplicação do óleo descofrante através de um pincel;
- com a ajuda de uma concha de pedreiro, a amassadura foi introduzida nos moldes;
- utilizando a agulha vibratória, iniciou-se o processo de vibração respetivo 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 em moldes plásticos foram deixados à temperatura ambiente com uma capa de plástico a cobri-los (para evitar evaporação de água e contaminação do betão), enquanto os provetes com ligantes ativados alcalinamente foram colocados num forno e submetidos a uma temperatura de 70 ± 2ºC;
- os provetes foram descofrados e mantidos na câmara seca (20ºC e 55% HR) até à data de ensaio.

Para os provetes submetidos à carbonatação acelerada, as condições de cura mudam após 28 dias em câmara seca, conforme a norma. Estes foram colocados a uma temperatura de 23 ± 3°C, humidade relativa entre 55 e 65% e concentração de CO_2 de 5,0 ± 0,1%.

3.5 Ensaios realizados aos agregados

3.5.1 Análise granulométrica

O propósito deste ensaio é quantificar, de forma estatística, a distribuição das partículas das diferentes frações granulométricas. Através desta, é possível fazer a caracterização geométrica das partículas dos agregados com o objetivo de desenvolver a curva granulométrica dos mesmos, sendo esta depois utilizada para determinar as quantidades de cada agregado na mistura. Foram seguidas as normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999) na realização dos ensaios. Dado os AR terem sido peneirados e separados pelas várias frações geométricas, não foi necessário recorrer a curvas granulométricas para os mesmos.

O processo utilizado foi:

- recolheu-se a amostra respeitando a massa mínima definida pela norma;
- secou-se a amostra numa estufa ventilada a 105 ºC 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;
- montou-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-se repetir o processo de peneiração.

A percentagem retida em cada peneiro foi determinada recorrendo à Equação 10.

$$Ri(\%) = \frac{Ri}{M1} \times 100\ (\%) \qquad \textit{Equação 10}$$

Onde:

R_i (%) - 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, fez-se o traçado da curva granulométrica.

3.5.2 Massa volúmica e absorção de água

Para a obtenção da massa volúmica e da absorção de água, foi seguida a norma NP EN 1097-6 (2003) através do método do picnómetro. Neste ensaio, são obtidas 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 irão influenciar diretamente a massa volúmica do betão. Neste ensaio, foi também possível obter a quantidade de água absorvida pelos agregados, sendo este valor importante para depois compensar o mesmo durante a amassadura. Neste ensaio, os agregados foram divididos em frações: areia fina; areia grossa, "bago de arroz", "brita 1"; "brita 2". No caso dos AR, estes foram divididos em duas frações: ARF com 0,063-4 mm; e ARG com 4-22,4 mm.

O método do ensaio apresenta algumas diferenças no modo de procedimento para os agregados grossos e agregados finos. No caso dos agregados grossos, de dimensão entre 4 e 22,4 mm, o procedimento tomado foi o seguinte:

- a amostra para análise foi obtida tendo em consideração 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 ± 3 °C;
- fez-se a agitação e inclinou-se o picnómetro de modo a libertar o ar ocluído e deixou-se repousar durante 24 ± 0,5 horas;
- após as 24 horas, encheu-se o picnómetro até transbordar;
- secou-se o exterior do picnómetro e procedeu-se à sua pesagem, registando a massa como M_2; adicionalmente fez-se a medição da temperatura da água;
- retirou-se os agregados do interior do picnómetro, e foi deixado a escorrer durante alguns minutos;
- voltou a encher-se o picnómetro com água e foi pesado, registando a massa como M_3 (foi preciso confirmar que a variação da temperatura da água nas pesagens de M_2 e M_3 é inferior a 2 °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 ± 5ºC até que a variação da massa entre leituras intervaladas de 24 h seja 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 0,063-4 mm, o procedimento foi:

- repetiu-se os primeiros 5 passos do procedimento relativo aos agregados grossos;
- 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 °C, desde a medição anterior)
- de maneira a evaporar a 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 efetuar-se a pesagem do provete (M_1);
- por fim, secou-se o agregado em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5°C até se obter

massa constante e registar como M_4.

Com os valores obtidos do ensaio, foi possível calcular as massas volúmicas e a absorção de água (em percentagem da massa seca) utilizando a Equação 11, Equação 12, Equação 13 e Equação 14.

$$\rho a = \frac{M4}{[M4 - (M2 - M3)]/\rho w} \ (kg/dm^3) \quad \textit{Equação 11}$$

$$\rho rd = \frac{M4}{[M1 - (M2 - M3)]/\rho w} \ (kg/dm^3) \quad \textit{Equação 12}$$

$$\rho ssd = \frac{M1}{[M1 - (M2 - M3)]/\rho w} \ (kg/dm^3) \quad \textit{Equação 13}$$

$$WA_{24} = \frac{M1 - M4}{M4} \times 100 \ (\%) \quad \textit{Equação 14}$$

Onde:

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd}- massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3);

ρ_{ssd}- massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm^3);

WA_{24}- massa volúmica da água (%).

3.5.3 Baridade

A baridade (ou massa volúmica aparente) consiste na massa por unidade de volume aparente de um determinado conjunto de agregados. Para este ensaio, foi seguida a norma NP EN 1097-3 (2003). O procedimento seguido foi:

- atingindo a massa constante através de uma estufa a 100 °C, retirou-se a amostra e deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente;
- pesou-se o recipiente metálico e registou-se a massa (M_A);
- encheu-se o recipiente de agregados até haver transbordo;
- alisou-se o topo do recipiente, removendo o excesso de agregados e pesou-se o conjunto, registando-se a sua massa (M_B).

Finalizando os procedimentos, a baridade dos agregados foi determinada através da Equação 15.

$$\rho b = \frac{MB - MA}{V} \times 100 \ (\%) \quad \textit{Equação 15}$$

Onde:

V - volume do recipiente metálico (dm^3);

M_A - massa do recipiente metálico vazio (kg);

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

3.5.4 Caracterização dos agregados reciclados

Na caracterização do AR, foi utilizada a norma BS EN 933-11 (2009). A norma descreve uma metodologia

simples de análise de ARG de modo a identificar e estimar as proporções relativas dos elementos constituintes. Esta caracterização visa a separação manual das partículas de uma porção de teste de ARG com o propósito de identificar e estimar as proporções relativas dos materiais constituintes.

3.6 Ensaios de betão no estado fresco

Na presente investigação, foram executados três ensaios para os betões no estado fresco, sendo estes: o ensaio de espalhamento; ensaio da massa volúmica; e ensaio do cone de Abrams. Estes ensaios são importantes pois irão ajudar a fazer uma previsão do desempenho do betão no estado endurecido e da facilidade de moldagem dos provetes, adequando a fluidez à aplicação pretendida.

3.6.1 Abaixamento do cone de Abrams

Este ensaio permite um controlo da consistência e da fluidez do betão fresco. O procedimento deste ensaio é encher com betão um molde metálico em forma de cone com 30 cm de altura, aberto nas duas extremidades, para depois se retirar o molde e medir o abaixamento. Para a realização deste ensaio, seguiu-se a norma NP EN 12350-2 (2002).

O procedimento adotado foi o seguinte:

- humidificou-se o equipamento a utilizar;
- colocou-se a placa onde vai decorrer o ensaio num local plano e bem nivelado horizontalmente;
- colocou-se o molde por cima da placa, fazendo-se pressão 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; convém que as pancadas sejam realizadas na periferia do molde, progredindo gradualmente para o centro;
- encheu-se mais 1/3 do molde e repetir o processo; novamente, enchendo-se o restante cone e realizar as 25 pancadas;
- nivelou-se a abertura superior do cone, utilizando 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 abaixou.

3.6.2 Massa volúmica

A obtenção da massa volúmica das diferentes amassaduras no estado fresco seguiu a norma NP EN 12350-6 (2002). Com o objetivo de verificar a influência dos diferentes constituintes na massa volúmica dos betões. Caso se verifique uma menor massa volúmica, utilizando as mesmas quantidades de ligantes e agregados, pode-se concluir que existe um maior número de vazios na sua composição, afetando diretamente a resistência e durabilidade do betão no estado endurecido. O procedimento do ensaio foi o seguinte:

- 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 16 o resultado do ensaio foi obtido.

$$D = \frac{M2 - M1}{V} \qquad \textit{Equação 16}$$

Onde:

D - massa volúmica do betão em estado fresco (kg/m^3);

V - volume do recipiente (m^3).

3.7 Ensaios de betões no estado endurecido

3.7.1 Resistência à compressão

Este ensaio tem o intuito de determinar a capacidade resistente dos diferentes betões sob tensão uniforme de compressão. A metodologia utilizada no referido ensaio seguiu as especificações da norma NP EN 12390-3 (2011). Relativamente à geometria e dimensões dos provetes de ensaio foram seguidos segundo a norma NP EN 12390-1 (2009). Relativamente à execução e cura dos provetes a ensaiar, a norma seguida foi a NP EN 12390-2 (2009).

Na presente investigação, foram efetuados ensaios à compressão em cubos e cilindros. Os provetes utilizados para estes ensaios foram 12 cubos e 2 cilindros por cada amassadura. Os cubos têm arestas de 15 cm e os cilindros têm 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Os provetes cúbicos foram submetidos a 7, 28 e 91 dias de cura e os cilindros foram submetidos a 28 dias de cura, ambos os tipos de provetes tiveram a sua cura em câmara seca.

Este ensaio inicia-se por centrar o provete na prensa, em relação ao prato inferior. Nos provetes cúbicos, a superfície de enchimento fica virada para fora, sem contacto com as superfícies da prensa a não ser arestas. Nos provetes cilíndricos, é necessário haver uma retificação de modo a que as duas superfícies estejam lisas e planas.

A resistência à compressão foi obtida através da Equação 17.

$$fc = \frac{F}{Ac} \qquad \textit{Equação 17}$$

Onde:

fc - resistência à compressão do provete (MPa);

F - carga máxima (N);

Ac - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²).

3.7.2 Compressão após carbonatação em câmara de CO_2

Na presente investigação, pretendeu-se determinar a capacidade resistente dos diferentes betões sob tensões uniformes de compressão depois de submetidos a uma cura acelerada de carbonatação. Neste ensaio, foram utilizados 3 provetes cúbicos de 10 × 10 × 10 cm. Estes foram submetidos a uma cura de 28 dias em câmara seca e mais 28 dias em câmara de CO_2. Nesta câmara, a humidade relativa é de 55 a 65% e a concentração de CO_2 de 5,0 ± 0,1%. Os provetes foram ensaiados numa prensa, depois de ambos os processos de cura, onde foram colocados centrados relativamente ao prato inferior com a superfície de enchimento virada para fora. A resistência à compressão foi obtida através da Equação 17.

3.7.3 Resistência à tração

Para se encontrar este valor, existem três ensaios possíveis: tração pura, flexão simples e compressão diametral. Para esta investigação, foi escolhida a compressão diametral. Para este ensaio, foram utilizados dois provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo que estes foram sujeitos a uma cura na câmara seca de 28 dias. A metodologia de ensaio está referenciada na norma NP EN 12390-6 (2011). A resistência à tração por compressão diametral de cada provete é dada pela seguinte Equação 18.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \qquad \textit{Equação 18}$$

Onde,

f_{ct} - resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F - carga máxima (N);

L - comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d - dimensão da secção transversal (mm).

3.7.4 Módulo de elasticidade

O propósito deste ensaio é determinar a deformabilidade do betão através de uma análise da relação tensão / extensão em regime de deformação elástica. O ensaio realizou-se segundo a metodologia descrita na norma LNEC E 397 (1993). Para este ensaio, foram utilizados dois provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura e com uma cura em câmara seca de 28 dias. Para realizar este ensaio, o provete cilíndrico foi previamente retificado, de modo que as faces em contacto com a prensa hidráulica ficassem lisas e paralelas. O procedimento deste ensaio foi o seguinte:

- aplicou-se dois extensómetros em posições opostas;
- no equipamento, introduziu-se o valor estimado para a resistência à compressão média em cilindros, estimado a partir do valor da resistência à compressão em cilindros. O posicionamento do provete foi verificado após cada ciclo de carga, através da diferença dos

dois extensómetros, sendo que esta diferença deve ser inferior a 10%;

- aplicou-se uma tensão inicial de 0,5 a 1,0 MPa, aumentando de forma contínua de 8,8 MPa até atingir 1/3 da tensão média de resistência à compressão;
- registou-se as tensões iniciais e finais obtidas nesse ciclo e efetuou-se um novo ciclo de carga;
- após cada ciclo, confirmou-se se a diferença entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos é inferior a 1 x 10^{-5}. No caso de esta condição não ser verificada, repetiu-se o ciclo de carga, realizando-se os ciclos necessários até que esta condição seja verificada.

O módulo de elasticidade em compressão é definido pela Equação 19.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \qquad \textit{Equação 19}$$

Onde:

E_c - módulo de elasticidade em compressão (GPa);

$\sigma_{i,\,n}$ - tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);

$\sigma_{f,\,n}$ - tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);

$\varepsilon_{i,\,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{i,\,n}$ registada no ciclo n;

$\varepsilon_{f,\,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{f,\,n}$ registada no ciclo n.

4 Análise e discussão dos resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se os resultados obtidos durante a campanha experimental e faz-se uma discussão dos mesmos, com o objetivo de avaliar a utilização de CV e CFRSU na produção de betões. A primeira fase corresponde aos resultados obtidos nos ensaios feitos aos constituintes do betão produzido. Após a primeira fase concluída, seguiu-se com a análise das propriedades do betão no estado fresco, permitindo assim a avaliação da trabalhabilidade do betão. Como fase final, são apresentados os resultados dos ensaios ao betão no estado endurecido, sendo este o foco principal da investigação, que irão permitir retirar conclusões relativamente ao desempenho do betão, em termos mecânicos.

4.2 Primeira fase - Propriedades dos materiais

4.2.1 Propriedades da CFRSU

A CFRSU apresenta uma grande variedade de constituintes que se apresentam em diversos tamanhos. Dada a discrepância de dimensões, foi necessário submetê-la a um processo de moagem, de modo a atingir uma granulometria semelhante à do cimento. Esta moagem, para além de tornar a granulometria semelhante à do cimento, aumenta a superfície específica e, consequentemente, a sua reatividade. Este processo de moagem foi realizado através de dois processos diferentes: inicialmente, foi feita uma moagem utilizando um moinho pequeno durante 1 hora com uma carga de aproximadamente 1 kg, com o objetivo de transformar as partículas em dimensões abaixo dos 4 mm; e em seguida com o material obtido da primeira moagem foi realizada uma segunda moagem utilizando um moinho grande durante 1 hora com uma carga de 20 kg de modo a se obter as dimensões das partículas necessárias. Na presente dissertação, foi utilizado o método do moinho grande, dada a necessidade de grandes quantidades de CFRSU para as misturas.

De referir que foi necessário utilizar duas amostras de CFRSU diferentes. Inicialmente, utilizou-se o restante conteúdo de um “Big Bag” e, quando este acabou, utilizou-se o de outro “Big Bag” com CFRSU. Isto resultou em resultados diferentes nas propriedades do material. Durante a moagem do material do primeiro “Big Bag”, foi observado que, no moinho, quando terminada a moagem, existia uma camada na superfície das paredes do moinho que dificultava a moagem do material (Figura 13). Isto fez com que algum do material fosse desperdiçado por apresentar uma dimensão acima do necessário.

Figura 13 - Pormenor de CFRSU agarrada às paredes do moinho.

As diferentes análises granulométricas referentes aos dois processos distintos estão apresentadas na Tabela 9. O moinho pequeno aparentou ser mais eficaz na cominuição da CFRSU.

Tabela 9 - 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

Para uma melhor caracterização da CFRSU, foi realizado uma difração de raio-X (DRX), que permitiu a identificação das principais fases cristalinas da cinza. Os resultados obtidos para o material proveniente do primeiro saco não foram ao encontro do que tinha sido observado em outras campanhas experimentais dentro do projeto RinoPolyCrete. Para uma melhor análise destas diferenças, na Figura 14, verifica-se que, nesta campanha, o principal constituinte foi a calcite ($CaCO_3$) e que havia apenas uma pequena quantidade de quartzo (SiO_2), ao contrário de análises anteriores. Com a baixa quantidade de quartzo e sendo o processo de polimerização iniciado com a reação do AA com silício (Si) e com o alumínio (Al), é provável que a CFRSU analisada tenha uma menor reatividade.

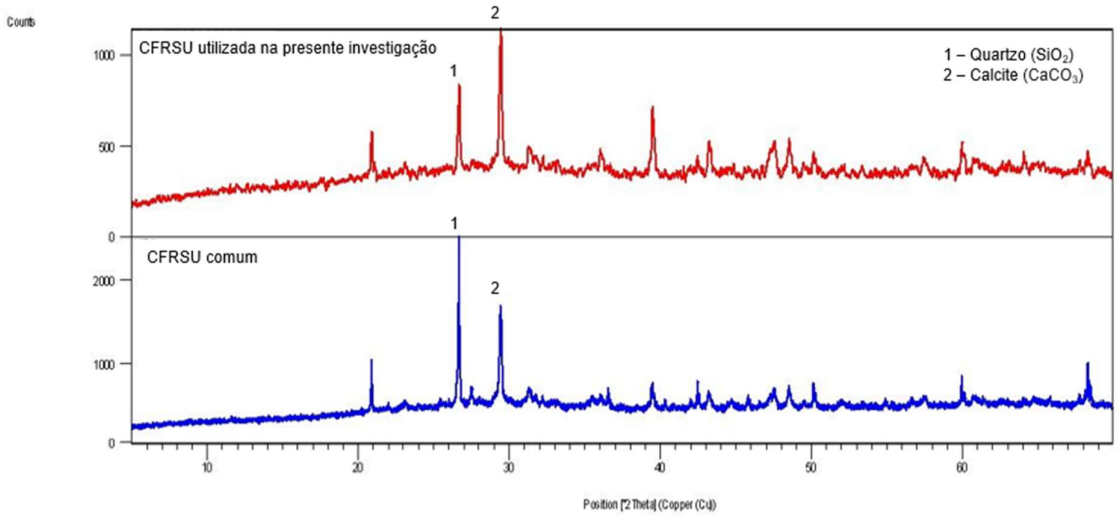

Figura 14 - DRX da CFRSU utilizada na presente investigação e da CFRSU comum.

Com o intuito de demonstrar a diferença de quantidade entre a calcite e o quartzo após a moagem, foi feito um ensaio, no qual se juntou ácido clorídrico (HCl) a uma porção de CFRSU moído (Figura 15 a). Esta solução reagiu com a calcite eliminando-a da mistura. Na Figura 15 b, observa-se que o produto da reação é uma pequena porção da amostra inicial, provando assim a existência de uma grande quantidade de calcite no ligante utilizado.

Contudo, uma vez que o conteúdo do "Big Bag" inicial acabou, foi realizada uma nova moagem e também um novo ensaio DRX com CFRSU de um novo "Big Bag". Os resultados obtidos no novo ensaio

podem ser observados na Figura 16. Fazendo uma análise aos mesmos, concluiu-se que esta já se apresentava mais parecida com os resultados provenientes do relatório de projeto. Contudo, mesmo apresentando agora uma maior quantidade de quartzo, apresenta também uma grande quantidade de calcite, que, como referido, não é benéfico para a reatividade do ligante. Foi decidido seria benéfico fazer uma mistura do material proveniente dos diferentes "Big Bags" de modo a equilibrar a presença de quartzo e de calcite no ligante.

a) b) c)

Figura 15 - Pormenor de ensaio feito com HCl onde a) corresponde a amostra ensaiada, b) espuma provocada pela reação de HCl com a calcite e c) material sobrante da amostra ensaiada.

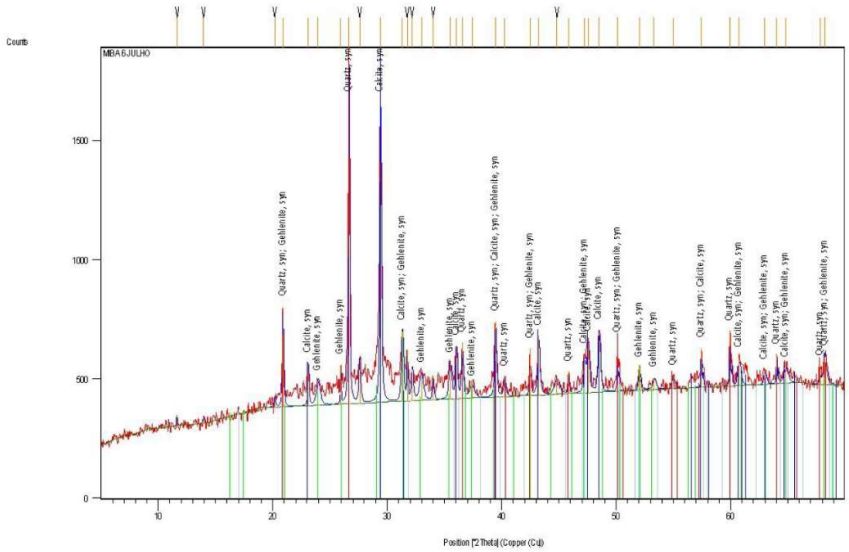

Figura 16 - DRX feito à CFRSU proveniente do segundo "Big Bag".

4.2.2 Análise granulométrica dos agregados

Os ensaios de análise granulométrica aos agregados foram realizados utilizando as normas referidas em 3.5.1. As curvas granulométricas das diferentes frações de AN estão representadas na Figura 17 e os resultados obtidos de cada uma estão apresentados na Tabela A1. A curva granulométrica total foi executada com o ajustamento das curvas de cada tipo de AN à curva de referência de Faury que, quando comparada a curva real com a de Faury, teve um erro médio percentual de 1,33%. Após análise e comparação dos valores obtidos, com os valores dados pela empresa, a diferença foi tomada como

residual. Contudo, para os AR, não foi executado o mesmo processo, pois foi levada a cabo uma peneiração de modo a obter todas as frações que foram depois combinadas de modo a equivalerem à curva granulométrica dos AN.

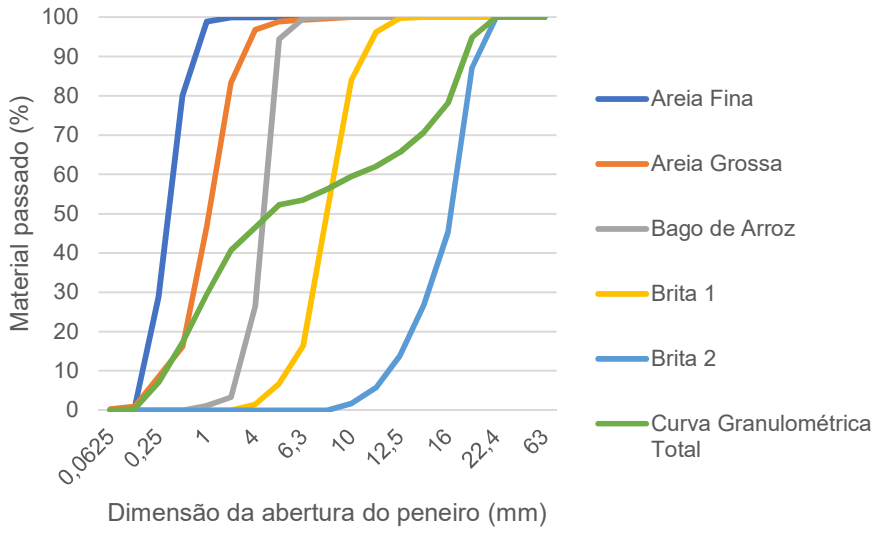

Figura 17 - Análise granulométrica dos diferentes AN utilizados.

4.2.3 Massa volúmica e absorção de água dos agregados naturais e reciclados

Para a obtenção destas propriedades, foi seguida a metodologia presente na norma referida em 3.6.2. Foram então medidos três tipos de massa volúmica diferentes: massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a); massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}); massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}). Na determinação da baridade (massa volúmica aparente, ρ_b), foi seguida a norma NP EN 1097-3 (2003). Na determinação da absorção de água dos agregados (WA_{24}), foi seguida a norma NP EN 1097-6 (2003). Esta propriedade é bastante importante devido a condicionar a quantidade de água a utilizar em cada mistura, sendo necessário ajustar a relação a/l total dos betões produzidos. Esta importância deve-se ao facto de esta propriedade afetar a massa volúmica final da mistura produzida e afetar também a quantidade de água a utilizar em cada amassadura, que, consequentemente, poderá provocar ajustes na relação a/l. Os resultados para cada propriedade encontram-se ilustrados na Tabela 10.

4.2.4 Caracterização dos agregados reciclados grossos

Para a caracterização dos ARG, foi feito o ensaio de caracterização seguindo a norma BS EN 933-11: 2009. Foram separados manualmente os constituintes dos ARG de uma porção de teste e os resultados estão representados na Tabela 11. Nesta caracterização, não foram encontradas partículas de vidro (Rg). Analisando os resultados, é possível observar que existe uma maior quantidade de cimento e betão (Rc), que, consequentemente, resultará num betão com uma menor densidade e num défice nas propriedades do betão. Sob outro ponto de vista, este fator pode ser benéfico, visto que pode apresentar alguma quantidade de $Ca(OH)_2$ e, por isso, formar produtos de reação resistentes, tanto

através da reação com a sílica proveniente do silicato de sódio como pela formação de carbonato de cálcio através da cura em câmara de CO_2. Ru é o componente mais importante na contribuição da resistência mecânica, visto que representa o AN. Observou-se também uma percentagem considerável de telhas e cerâmica (Rb). Geralmente, estas partículas poderão ser nefastas por apresentarem uma grande porosidade (exemplo do tijolo vermelho) e também superfícies lisas e suaves que irão dificultar a adesão do ligante ao agregado. O constituinte X é um fator residual, que se tomou como não prejudicial ou benéfico para a mistura devido à sua pequena quantidade.

Tabela 10 - Massas volúmicas e absorção de água dos agregados.

Propriedade	AN					AR	
	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	Fino	Grosso
ρ_a (kg/m3)	2689	2604	2733	2716	2673	2425	2533
ρ_{rd} (kg/m3)	2668	2582	2657	2658	2611	2112	2222
ρ_{ssd} (kg/m3)	2676	2590	2685	2679	2634	2241	2345
WA_{24} (%)	0,29	0,33	1,04	0,79	0,87	6,12	5,52
ρ_b (kg/m3)	1560	1614	1327	1451	1441	1328	1257

Tabela 11 - Proporções dos constituintes do ARG (% por massa).

Rc	Ru	Rb	Ra	X
Produtos de betão e argamassa	Pedra natural	Produtos cerâmicos de alvenaria e acabamento	Materiais betuminosos	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

Para determinar esta propriedade, foram efetuados ensaios de abaixamento do cone de Abrams, tendo estes seguido a metodologia apresentada na norma NP EN 12350-2 (2002). Tendo em consideração que a trabalhabilidade afeta o desempenho do betão no estado endurecido, é bastante importante ter esta propriedade em conta na produção. Ela é afetada por vários fatores, tais como o tipo de AA, a relação a/l e a adição de adjuvantes (redutores de água e retardadores de presa). Dado nesta investigação serem utilizados AR, foi necessário ter em consideração que estes afetam bastante a trabalhabilidade do betão, devido à absorção de água ser bastante elevada. Com a absorção da água livre pelos agregados, tem-se uma diminuição da plasticidade do betão. De modo a contrariar esta absorção de água, foi calculada a quantidade de água absorvida pelos agregados (Tabela 10) para compensar a mesma.

Na presente investigação, foi considerada uma classe de consistência S3, garantindo que os resultados do ensaio estavam entre 100 e 150 mm de abaixamento. A relação a/l foi de 0,5 para todas as misturas. Contudo, com os valores obtidos durante a produção (Tabela 12), foi possível verificar que apenas para

as misturas com CP se obteve a classe pretendida e que para as MAA o abaixamento foi superior a 220 mm (classe de consistência S5). Esta diferença de valores pode ser explicada por vários motivos. Dado esta ser a primeira campanha de betão feita no âmbito do projeto RinoPolyCrete, as considerações feitas sobre a trabalhabilidade foram adaptadas de investigações sobre argamassas. Nesses estudos, conseguiu-se obter misturas com trabalhabilidades equivalentes, mas concluiu-se que os rácios ótimos não eram extrapoláveis para o betão. Ainda olhando para experiências passadas com presa acelerada em MAA, de modo a evitar o mesmo fenómeno no betão, teve-se em conta uma quantidade de redutores de água adequada para evitar este fenómeno, mas isso apenas tornou a trabalhabilidade demasiado alta. De referir que, apesar da ocorrência do fenómeno, deu-se seguimento à campanha experimental pois não havia tempo e material para se fazer o acerto da trabalhabilidade.

Tabela 12 - Abaixamento do cone de Abrams referentes às diferentes misturas.

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

Contudo, apesar de se ter observado um abaixamento superior a 220 mm, nalguns casos, passados 3 a 5 minutos dava-se uma presa muito rápida, impossibilitando a moldagem e vibração do betão (Figura 18b). Esta presa rápida é reportada na revisão de literatura. Tendo em conta o fenómeno, houve a necessidade de se encontrar uma solução. Para tal, foi necessário entender a causa do efeito. Então foram produzidas várias argamassas teste com diferentes constituições:

- A1 - Com apenas NaOH;
- A2 - Com um rácio de 1 de SiO_2/Na_2O;
- A3 - Com um rácio de 0,5 de SiO_2/Na_2O;
- A4 - Com um rácio de 1 de SiO_2/Na_2O e 4% (do ligante) de borato de sódio (retardador de presa).

Após 30 minutos da produção das argamassas, estas foram ensaiadas numa mesa de espalhamento. Os valores para as amassaduras A1, A2, A3 e A4 foram: 247,7; 246,7; 255,3; 264,3 mm, respetivamente.

Analisando os valores obtidos, foi possível constatar que a argamassa com melhor espalhamento é a A4. Concluiu-se que o bórax retardou a presa do betão de maneira adequada à solução utilizada. Deste modo, juntou-se bórax em todas as misturas de betão desde então. Nestas misturas, o bórax irá sofrer uma hidrolisação, quebrando as suas ligações. Isto viabiliza a reação entre o borato e os iões de cálcio (Ca^{2+}) em fase desidratada. Na reação, é formada uma camada adicional de borato à base de cálcio sobre as

partículas do ligante, impossibilitando que estas sejam hidratadas na fase inicial (Zhang et al., 2019). Os estudos feitos indicam que, quanto maior a percentagem de bórax (em massa de ligante), maior será a sua trabalhabilidade. No entanto, quando se utiliza uma percentagem acima de 4%, este torna-se prejudicial à resistência mecânica dos betões com ele produzidos. Com 4%, foi observada uma grande fluidez 30 minutos após a produção (Oderji et al., 2019). Olhando para as reações que promovem a polimerização das substâncias e a condensação do BAA, Jin et al. (2021) referiram que o NaOH promove a dissolução e a polimerização das substâncias ativas nas cinzas, que leva à formação de um ambiente alcalino de forte excitação. Consequentemente, leva a condições favoráveis para a dissolução de componentes reativos e o desenvolvimento de resistência das misturas. Porém, o Na_2SiO_3 leva a um ambiente de excitação menos eficaz para aluminossilicatos, mas que favorece a dissolução do cálcio reativo. Com o silicato de sódio, não demonstrando este um pH tão elevado quanto o de uma solução de apenas NaOH com a mesma quantidade de Na_2O, não haverá uma dissolução considerável do precursor, e haverá principalmente a condensação do silicato de sódio. Isto resulta na coagulação rápida das amostras ativadas alcalinamente ou presa rápida. Deste modo, como referido e observado em investigações anteriores, para quantidades maiores de Na_2SiO_3, o tempo de presa diminuirá.

(a) (b)

Figura 18 - Provetes após (a) e antes utilização de bórax (b).

Com a adição de bórax na mistura, cria-se uma película de borato à base de cálcio em volta das partículas, assim como um aumento do pH da mistura. Isto leva, posteriormente, a uma maior dificuldade de auto-condensação do silicato de sódio, resultando num aumento da presa e, consequentemente, a um aumento da resistência.

Mesmo com o benefício visível do bórax na mistura, foi observado outro fenómeno. A produção de cada família foi dividida em duas betonagens. Na segunda betonagem, feita imediatamente a seguir à primeira, observou-se consistentemente uma presa muito mais rápida do que o que era expectável (Figura 19). Foi observado que a betoneira apresentava uma película “gordurosa” proveniente da solução de Na_2SiO_3 da primeira betonagem e que permanecia mesmo após uma limpeza com água. É possível que o material desta película tivesse contaminado a segunda betonagem com uma maior quantidade de SiO_2. Decidiu-se utilizar um desengordurante na limpeza da betoneira entre betonagens

consecutivas, tendo-se eliminado o problema por completo.

Figura 19 - Diferença entre betonagens consecutivas: primeira betonagem (a) betão trabalhável; segunda betonagem (b) betão "mais seco" à saída da betoneira.

4.3.2 Massa volúmica

Para obter a massa volúmica do betão no estado fresco, foi seguida a metodologia descrita na norma NP EN 12350-6 (2002). Os resultados são apresentados na Tabela 13, assim como as variações percentuais de massa volúmica das MAA com AN comparativamente à mistura de referência com AN (100CEM:AN) e também das MAA com AR comparativamente à mistura de referência com AR (100CEM:AR).

Tabela 13 - Massa volúmica dos betões no estado fresco.

Mistura	Massa volúmica (kg/dm^3)	Variação (%)
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

Fazendo uma análise dos valores obtidos, concluiu-se que existe um decréscimo da massa volúmica quando existe a substituição de AN por AR, que se encontra em concordância com outras investigações. Este efeito de diminuição é devido à baixa densidade do AR, causada pela presença argamassa de cimento na sua constituição que apresentam elevada porosidade (Brito e Evangelista 2013).

Ao substituir CV por CFRSU, observou-se também um decréscimo da massa volúmica. A CFRSU apresenta uma maior densidade em comparação com as CV. No entanto, as CV podem apresentar maior compacidade. Adicionalmente, embora foi feito um pré-tratamento à CFRSU 24 h antes das misturas, é possível que algumas partículas de alumínio tivessem "sobrevivido" ao tratamento, tendo

resultado na libertação de gás H_2 nas misturas de betão, resultando, por isso, numa menor densidade. Existe uma pequena oscilação não esperada nos valores da massa volúmica nas misturas com CFRSU; o valor da variação percentual das misturas 50CV/50CF:AN e 50CV/50CF:AR é menor do que as outras duas misturas com CFRSU. No entanto, esta oscilação é visível tanto nas misturas com AR como com AN. A libertação do gás H_2 pode servir de justificação na oscilação dos resultados nas misturas, pois o pré-tratamento pode não ter sido completamente eficaz durante as 24 horas.

4.4 Terceira fase - Propriedades dos betões no estado endurecido

4.4.1 Resistência à compressão

Foi seguida a norma NP EN 12390-3 (2011) na execução dos ensaios de resistência à compressão em cubos (Figura 20) e cilindros, sendo que estes foram efetuados para cubos a 7, 28 e 91 dias de idade e para cilindros apenas a 28 dias. Nesta investigação, foi avaliada a relação entre a variação da resistência e o aumento da substituição de CV por CFRSU ativadas alcalinamente com 100% de AN e também com 100% AR em substituição de AN. Na família com 100% AN, devido a problemas experimentais, existiu uma mistura diferente das misturas existentes na família com 100% AR, devido ao acréscimo de bórax na mistura, ou seja, nos 100% AN existe uma amostra de resultados a 7, 28 e 91 dias de 100 CV sem bórax. De modo a fazer-se uma apreciação de valores mais adequada, serão inicialmente discutidos os resultados obtidos da família com 100% AN e com 100% AR de cada idade ensaiada em cubos, e de seguida em cilindros, e por fim feita uma comparação entre as duas famílias.

Figura 20 - Pormenor de ensaio de resistência à compressão num cubo.

Para a análise dos resultados obtidos, torna-se importante entender as reações químicas envolvidas na polimerização. Para obter um MAA, os elementos principais são a alumina e a sílica amorfa. Inicialmente, no mecanismo de reação, dá-se a sua dissolução. Após a sua dissolução, passa-se à etapa de condensação, em que os produtos das reações se ligam através da força de atração de um dos grupos de OH^- do $[SiO(OH)_3]^-$ com os iões de Al do $[Al(OH)_4]^-$, que resulta na formação de uma estrutura intermediária. O processo inicial da reação de ativação alcalina reflete a dissolução de partículas sólidas de aluminossilicatos em solução alcalina e pode ser esquematizada segundo a

Equação 1, Equação 2 e Equação 3. Os dois grupos de OH^- desta estrutura condensam para formar um aluminossilicato libertando uma molécula de água. Na última etapa, dá-se a formação e endurecimento do polímero. Este tipo de reação também ocorre durante a síntese da zeolite, porém, a condensação entre estes elementos ocorre mais rápido (Severo et al., 2013). Presume-se que este mecanismo de reação das CVAA, se aplique também na reação das CFRSUAA.

Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AN, a nível de resistência à compressão em cubos, o valor médio obtido a 7, 28 e 91 dias foi de: 42,0 MPa; 48,5 MPa; e 51,1 MPa, respetivamente. Os valores obtidos demonstram uma evolução contínua de resistência à compressão. Para a resistência à compressão em cilindros a 28 dias, foi obtido um valor médio de 37,7 MPa. Analisando a Figura 21, os primeiros valores obtidos a 7 dias para a mistura de CV sem bórax foi de 23,9 MPa. Comparado este valor com o obtido para a mistura de CV com bórax, é possível verificar que existiu um aumento de resistência com a adição do retardador (aumento de 25%). Este aumento de resistência com a adição do bórax é também observado na investigação de Cheng-Young et al. (2022). Estes autores explicaram que isto resulta numa combinação de N-A-S-H, C-A-S-H (fases típicas dos MAA) com N-B-S-H e C-B-S-H (novas fases com a adição do bórax), em vez de apenas existirem as duas primeiras. Os iões de bórax substituíram alguma parte dos iões de alumínio, o que, consequentemente, criou uma nova matriz e um novo cristal, que levou posteriormente a uma melhoria do comportamento resistente do betão. Relativamente à evolução da resistência com o tempo, ambas as misturas apresentam um decréscimo a 28 dias, porém, a 91 dias, ambas as misturas voltam a aumentar a sua resistência, mas a mistura com bórax é sempre superior à sem bórax.

Em comparação com as misturas com CV, as com CFRSU apresentam valores significativamente inferiores. Na Figura 21, é possível observar que, a 7 dias, a maior resistência obtida é para a substituição de 50% de CV por CFRSU. A 28 dias, as misturas 75CV/25CF:AN e 50CV/50CF:AN aumentaram a sua resistência, mas para a mistura 25CV/75CF:AN a resistência diminuiu. Contudo, apesar de a 28 dias o maior valor de resistência continuar a ser para a mistura 50CV/50CF:AN, a longo prazo isso já não se verifica. A 91 dias, as resistências aumentaram para as misturas com 25% e 75% de CFRSU e, para a mistura com 50% de CFRSU, observou-se o contrário, ficando assim a mistura de 25% de CFRSU a ser a com melhor desempenho a longo prazo de entre as três misturas com CFRSU. Como se pode observar, os menores valores, para todas as idades, pertencem às misturas com a maior adição de CFRSU na mistura. Isto deve-se ao facto de este ligante apresentar uma muito menor reatividade do que a do cimento e a das CV. Isto resulta num betão com menos ligações entre os seus componentes e, consequentemente, numa microestrutura mais fraca. É possível que algumas partículas de alumínio não reagidas no processo de pré-tratamento, tivessem libertado H_2 , resultando numa matriz mais porosa.

Na Figura 22 (resistência à compressão a 28 dias para cilindros), para os provetes cilíndricos, também se verifica a mesma diferença entre a mistura com 100% CV sem bórax e a mistura de 100% CV com bórax. Por outras palavras, a adição de bórax foi benéfica no ganho de resistência à compressão. Relativamente aos valores quando se iniciou a substituição de CV por CFRSU, estes demonstram novamente um baixo desempenho, como se tinha observado nos provetes cúbicos. No entanto, é de

notar que não se verificou a diferença para os provetes cilíndricos residual existente entre as misturas com 25% e 50% de CFRSU a 28 dias para os cubos.

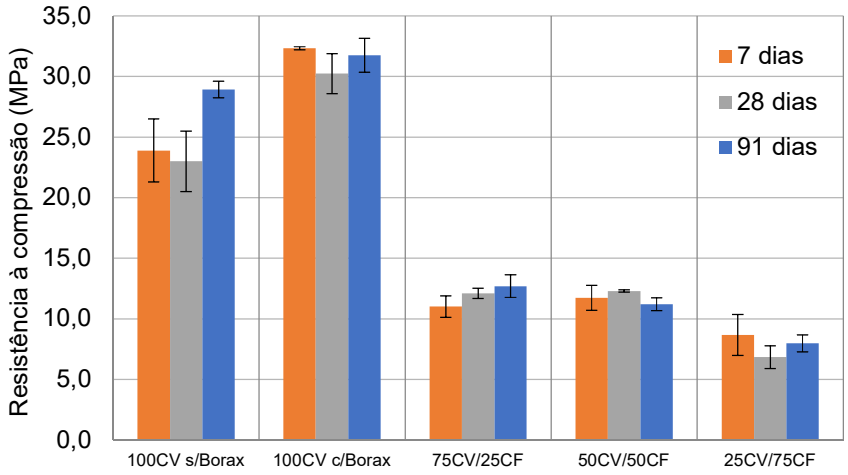

Figura 21 - Resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias.

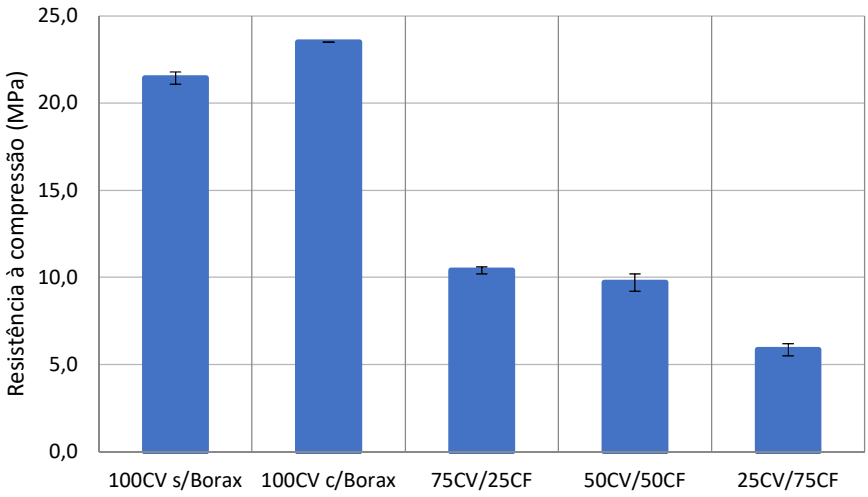

Figura 22 - Resistência à compressão em cilindros ativados alcalinamente a 28 dias.

Chi (2016) concluiu que as misturas com 100% de CV demonstraram um desenvolvimento de resistência à compressão muito baixo, o que é coerente com os resultados da presente investigação. Adicionalmente, esse autor referiu que, para as misturas com CV ativada, o maior ganho de resistência foi nos primeiros dias e o restante aumento de resistência deu-se a um ritmo bastante lento. No caso da CFRSU, notou-se mais uma vez a perda de resistência, o que vai ao encontro dos resultados de Casanova et al. (2021) e Avila et al. (2022). Nestas investigações, as misturas com CV e CFRSU ativadas alcalinamente apresentaram um desempenho reduzido em termos de resistência à compressão.

Nos betões produzidos com 100% de AR, o betão com CP (betão de referência), a nível de resistência à compressão em cubos, apresentou valores médios obtidos a 7, 28 e 91 dias de 21,7 MPa, 26,3 MPa e 30,6

MPa, respetivamente. Os valores obtidos demonstram uma evolução contínua de resistência à compressão. Para a resistência à compressão em cilindros a 28 dias, foi obtido um valor médio de 17,0 MPa.

Para as misturas com AR, não foi produzido um betão com CV e sem bórax, uma vez que se verificou a necessidade do retardador nas misturas. Na Figura 23, observa-se que a desempenho das várias misturas ativadas alcalinamente é bastante baixa, o que demonstra que a substituição total de AN por AR teve efeitos bastantes adversos em todas as misturas e vai ao encontro dos resultados de vários estudos na literatura (Hani Adnan et al., 2007; Rahal, 2007; Tabsh e Abdelfatah 2009; Shi et al., 2012).

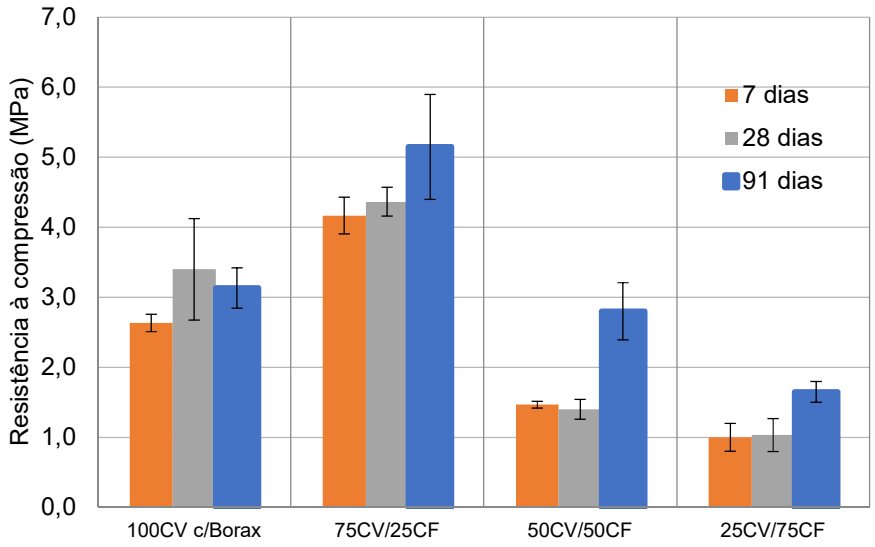

Figura 23 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AR a 7, 28 e 91 dias.

Casanova et al. (2021) sugeriram que a perda de resistência está relacionada com adsorção dos iões de hidróxido e de sódio pelos AR na sua microestrutura porosa. Isto resulta numa menor disponibilidade de iões para a reação com o ligante. Estas misturas não apresentam o mesmo comportamento do que as misturas com AN, visto que a mistura com 100% de CV apresenta uma resistência inferior à mistura de 25% de CFRSU. Por outras palavras, para as misturas com AR, a mistura com melhor desempenho é a com 25% CFRSU. De 7 para 28 dias, houve um aumento de resistência para as misturas de 0% e 25% de CFRSU, a mistura com 75% CFRSU manteve o valor e houve um decréscimo pequeno na resistência da mistura de 50%. No entanto, após 91 dias, observou-se um aumento substancial de resistência para as misturas com CFRSU. Contudo, a mistura com 100% CV teve um decréscimo na resistência.

Na Figura 24, constata-se que houve também um decréscimo da resistência à compressão nos provetes cilíndricos, tal como nos provetes cúbicos. O maior valor corresponde ao da mistura com 25% de CFRSU, demonstrando que a mistura com 100% CV apresentou uma maior perda de resistência relativamente à mistura com 25% de CFRSU. O pior desempenho foi observado na mistura com 75% de CFRSU.

Abdollahnejad et al. (2019) concluíram que a substituição de AN por AR tende a reduzir a resistência mecânica das MAA. Estes referem que, quando há uma substituição total de AN, as resistências tendem a diminuir em mais de 50%, o que está em linha com o analisado na presente investigação. Na

investigação de Shaikh et al. (2016), foi também observado que a resistência à compressão tende a diminuir com a adição de AR na mistura.

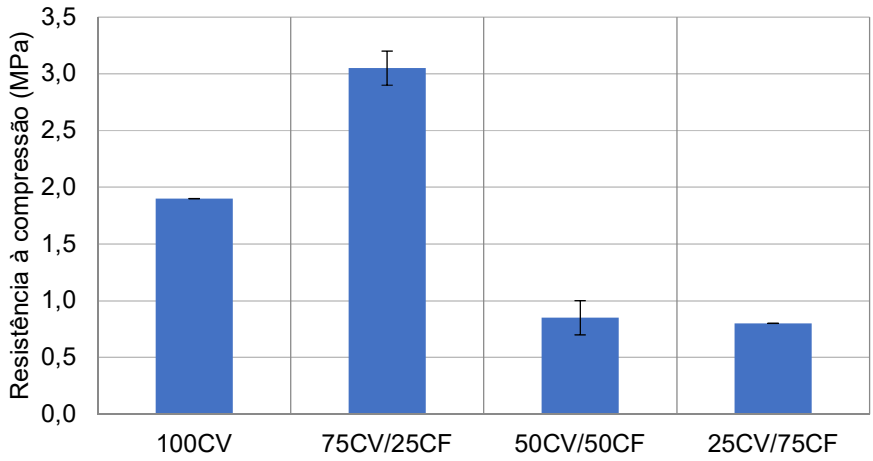

Figura 24 - Resistência à compressão em cilindros ativados alcalinamente com 100% AR a 28 dias.

Analisando o provete ensaiado na Figura 25, é possível observar que, no interior deste, existe uma grande quantidade de poros, que, como já sido analisado anteriormente, resulta num reduzido desempenho do betão. Para além da elevada porosidade, é possível observar que, quando houve a rotura do provete, houve o destacamento da pasta do ligante dos agregados reciclados. Isto sugere que a pasta apresenta uma resistência inferior ao agregado. Esta análise vai de acordo com o reportado por Abdollahnejad et al. (2019). Estes referiram que, para os BAA com AR, existe uma tendência de propagação de fendas/fissuras pelas ZIT entre a pasta de ligante nova e o agregado, entre a pasta de ligante velha e o agregado e também pela ZIT entre as duas pastas. Um dos fatores que resulta neste reduzido desempenho em BAA com AR, é o facto de estes apresentarem um nível bastante alto de absorção de água quando comparados com os níveis de absorção de água dos AN. Como foi observado por Abdollahnejad et al. (2019), para além de os AR absorverem água, também absorvem o AA, ou seja, leva a uma redução do rácio de ativador/ligante, o que leva a uma menor solução alcalina e, consequentemente, a uma menor polimerização.

Figura 25 - Pormenor de provete ativado alcalinamente com AR ensaiado

Para uma melhor análise dos valores obtidos das várias misturas, é possível observar as correspondentes variações e todos os *outliers* e perdas de provetes nos anexos (Tabela A3, Tabela A4, Tabela A5 e Tabela A6).

4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral em provetes cilíndricos seguiu a norma NP EN 12390-6 (2011). O ensaio foi realizado a 28 dias após a betonagem de cada família produzida. Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AR, o valor médio da resistência à tração por compressão diametral em cilindros obtido a 28 dias foi de 2,0 MPa. Na Figura 26, são apresentados os valores obtidos para as MAA. Verifica-se imediatamente que as misturas de 100% CV com e sem bórax apresentam valores superiores ao obtido para a mistura com 100% CEM, o que coincide com o resultado de Carvalho et al. (2021). No estudo de Olivia e Nikraz (2012), foi indicado que um alto teor de silicatos pode aumentar a elasticidade do betão ativado alcalinamente. Tal como observado para a resistência à compressão, a mistura de 100% CV com bórax apresenta um valor superior ao da mistura sem bórax. Contudo, para as misturas com CFRSU, mais uma vez, constatou-se um desempenho bastante inferior quando comparado com as restantes misturas tal como observado em estudos anteriores (Carvalho et al., 2021; Casanova et al., 2021). Analisando em detalhe as misturas de CFRSU entre si, observa-se, mais uma vez, que a mistura de 50% de CFRSU apresenta um valor superior ao valor obtido para a mistura com 25% de CFRSU, enquanto seria expectável ser mais baixo. Na Figura 27, verifica-se uma grande quantidade de poros no interior do provete com CFRSU, o que como referido, é prejudicial para a capacidade resistente do betão.

Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AR, o valor médio da resistência à tração por compressão diametral em cilindros a 28 dias foi de 2,1 MPa. Com a substituição de AN por AR, seria esperado que houvesse uma diminuição do desempenho em relação às misturas com AN. Tal como descrito no capítulo 2.3, a introdução de AR na mistura iria criar uma matriz menos densa devido à sua maior porosidade.

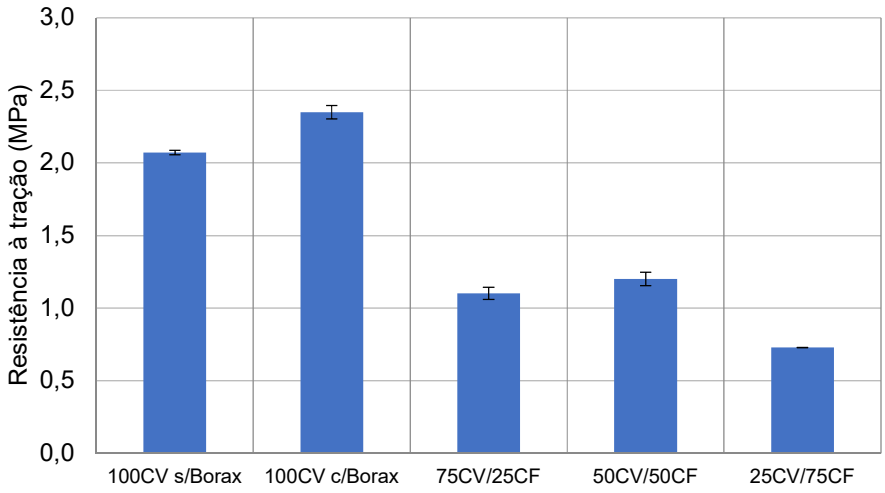

Figura 26 - Resistência à tração das misturas ativadas alcalinamente a 28 dias.

Figura 27 - Pormenor de provete ativado alcalinamente com AN ensaiados à tração a 28 dias.

Na Figura 28, que apresenta os resultados da resistência à tração dos BAA com 100% AR, conclui-se que existe um grande decréscimo de resistência em comparação com os provetes com 100% AN. Como expectável, a mistura mais resistente é a com 100% CV. As diferenças entre os valores observados estão de acordo com o observado por Casanova et al. (2021). Neste estudo, as argamassas produzidas com CV obtiveram valores para a resistência à flexão superiores aos das misturas com CFRSU. Os autores explicaram que o reduzido desempenho das MAA com AR se devia essencialmente ao elevado número de vazios e à reduzida quantidade de AA para reagir com o ligante, uma vez que os iões deste migraram para dentro da estrutura porosa dos AR.

Fazendo uma análise da Figura 29, mais uma vez, é possível observar que existe um grande número de vazios nos provetes, o que já se verificou que é prejudicial para o desempenho do betão. É também possível observar que a rotura do provete se deu de várias formas, tal como referido por Abdollahnejad et al. (2019).

Para uma melhor análise dos valores obtidos das várias misturas, é possível observar as correspondentes variações e todos os *outliers* e perdas de provetes nos anexos (Tabela A7).

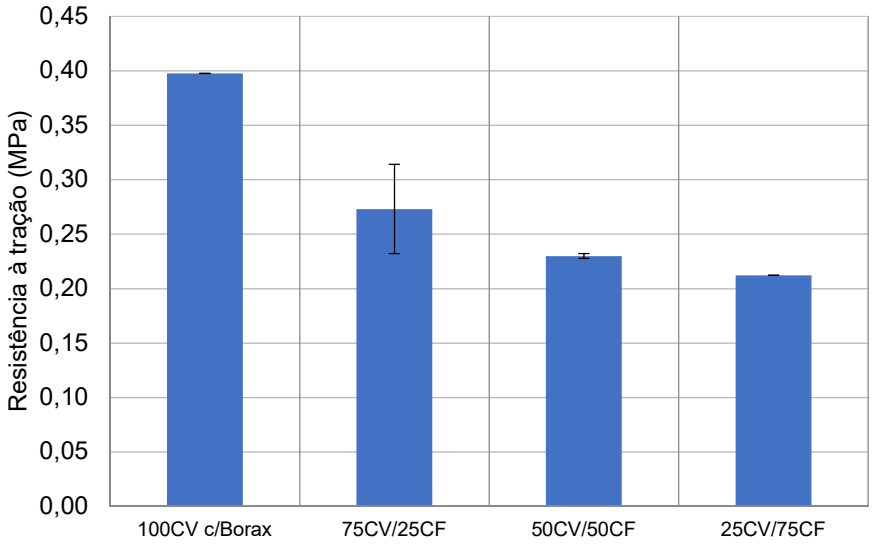

Figura 28 - Resistência à tração a 28 dias das misturas ativadas alcalinamente com 100% de AR.

Figura 29 - Pormenor de provetes ativados alcalinamente com AR ensaiados à tração a 28 dias.

4.4.3 Compressão após carbonatação em câmara de CO_2

Uma das principais anomalias do betão armado que provoca uma perda de durabilidade é a carbonatação, que leva a uma despassivação das armaduras e, consequentemente, ao destacamento do betão. Assim sendo, é importante determinar a resistência do betão à carbonatação, de modo a melhor entender a sua influência nos betões ativados alcalinamente. Deste modo, foram realizados ensaios da resistência à compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011) após uma cura de 28 dias em câmara seca (20 °C e 55% HR) e mais 28 dias em câmara de CO_2 a uma temperatura de 23 ± 3ºC, uma humidade relativa entre 55 e 65% e uma concentração de CO_2 de 5,0 ± 0,1%.

Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AN, o valor médio da resistência à compressão após a câmara de CO_2 em cubos obtido foi de 64,9 MPa. Analisando a Figura 30, é possível verificar que o maior valor foi obtido para a mistura com 100% CV, mas não ultrapassando a mistura de referência de CP. As misturas de CFRSU apresentaram um desempenho inferior, como era expectável. Verifica-se que, tal como verificado a 28 dias em cura normal, o valor mais alto das misturas com CFRSU pertence à mistura com 50% CFRSU, sendo a mais baixa mais uma vez a com 75% CFRSU.

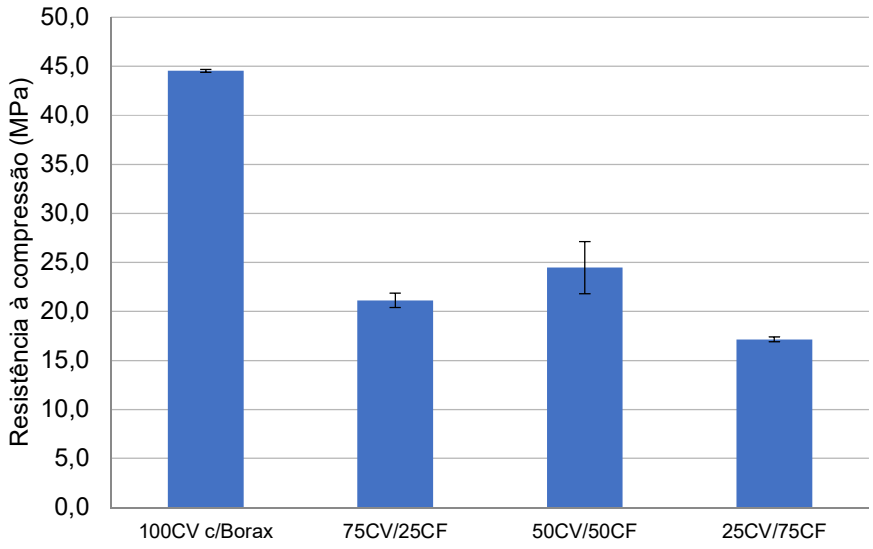

Figura 30 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AN a 28 dias após câmara de CO_2.

Na Tabela 14, comparando os valores obtidos nos provetes ensaiados após câmara de carbonatação com os valores obtidos pelos provetes com uma cura normal a 28 dias, verifica-se que as resistências à compressão dos primeiros são significativamente superiores à dos submetidos a cura na câmara seca. Verificou-se a maior diferença percentual na mistura com 75% de CFRSU, com um aumento de aproximadamente 151%. Após uma cura em câmara de carbonatação, houve um claro benefício no desempenho mecânico dos BAA.

Tabela 14 - Comparação entre valores de resistência à compressão em materiais com 100% AN antes e após câmara de CO_2.

Misturas	Antes CO_2 (MPa)	Após CO_2 (MPa)	Aumento percentual (%)
100 CEM:AN	48,53	64,87	33,65
100CV:AN	30,25	44,55	47,27
75CV/25CF:AN	12,10	21,13	74,66
50CV/50CF:AN	12,30	24,47	98,92
25CV/75CF:AN	6,83	17,15	150,98

Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AN, o valor médio da resistência à compressão após a câmara de CO_2 em cubos obtido foi de 34,8 MPa. Na Figura 31, é possível verificar que o maior valor para as MAA com 100% AR foi obtido pela mistura com 25% de CFRSU, tal como observado para os provetes ensaiados a 28 dias com cura em câmara seca. No entanto, não ultrapassou a mistura de referência de CP. De referir que o valor para a mistura de 50% de CFRSU foi inferior a todos os outros, o que não está de acordo com o observado para os 28 dias em câmara seca.

Comparando os valores dos provetes ensaiados após uma cura na câmara de carbonatação com os submetidos a uma cura normal (Tabela 15), verificou-se valores superiores aos obtidos em cura na câmara seca, tal como observado para as misturas com AN. Observou-se uma maior diferença na mistura com 75% de CFRSU, com um aumento percentual de aproximadamente 435%.

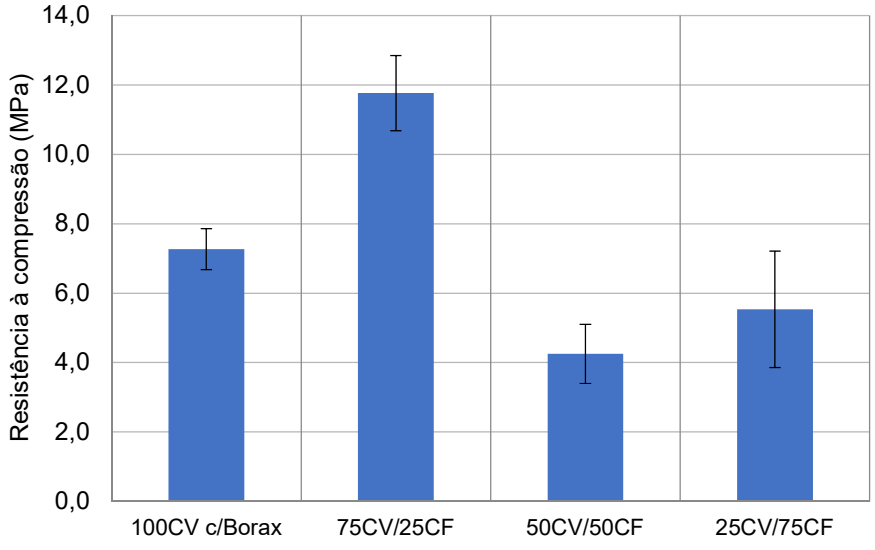

Figura 31 - Resistência à compressão em cubos ativados alcalinamente com 100% AR a 28 dias após câmara de CO_2.

Tabela 15 - Comparação entre valores de resistência à compressão de materiais com 100% AR antes e após câmara de CO_2

Misturas	Antes CO_2 (MPa)	Após CO_2 (MPa)	Aumento percentual (%)
100 CEM:AR	26,27	34,77	32
100CV:AR	3,40	7,27	114
75CV/25CF:AR	4,37	11,77	169
50CV/50CF:AR	1,40	4,25	204
25CV/75CF:AR	1,03	5,53	435

Este aumento substancial de resistência à compressão pode ser explicado através das reações químicas que ocorrem com a entrada de CO_2 na matriz da mistura. Este processo de reação começa pela dissolução de CO_2 (Equação 20), que promove a diminuição do pH do betão devido à dissociação dos iões de bicarbonato (HCO_3^-) em iões hidrogénio ($2H^+$) e iões de carbonato (CO_3^{2-}). Em seguimento, ocorre a reação do CO_2 com os hidróxidos de metais alcalinos do ligante, como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), silicatos e aluminatos cálcicos. Neste processo de dissolução de $Ca(OH)_2$, ocorre a difusão e migração dos iões cálcio (Ca^{2+}) para a superfície das fases iniciais, que, reagindo com o CO_2, leva à precipitação do $CaCO_3$ (Equação 22 e Equação 23) em cristais que irão preencher os vazios da mistura, tornando-a assim mais densa e impermeável. Tal fenómeno ocorre de forma equiparável noutras fases como o C-S-H, por exemplo. Eventualmente, deixando de existir fases com cálcio para reagir, o fenómeno da carbonatação, com a consequente formação de cristais, abranda e faz com que reduza o desenvolvimento da resistência. Adicionalmente, com a presença de sílica na matriz do betão, pode ocorrer outra reação. Nesta, dá-se a formação do gel de dióxido de silício, também conhecido como sílica-gel (SiO_2 (gel)), melhorando assim as suas propriedades microestruturais (Equação 23). O aumento percentual observado nas misturas com AR foi superior ao das misturas com AN, possivelmente devido à maior quantidade de fases cálcicas nos AR.

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3{}^{2-} \rightarrow H^+ + HCO_3{}^- \rightarrow 2H^+ + CO_3{}^{2-} \quad \textit{Equação 20}$$

$$2NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O \quad \textit{Equação 21}$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad \textit{Equação 22}$$

$$2SiO_2.3CaO.2H_2O + 3CO_2 \rightarrow 2SiO_2\,(gel) + 3CaCO_3 + 3H_2O \quad \textit{Equação 23}$$

Para uma melhor análise dos valores obtidos das várias misturas, é possível observar as correspondentes variações e todos os *outliers* e perdas de provetes nos anexos (Tabela A9).

4.4.4 Módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade em provetes cilíndricos seguiu a norma LNEC E 397 (1993). Foi realizado 28 dias após a betonagem de cada família produzida. Embora tivesse sido planeado efetuar este ensaio para todas as misturas, foi possível fazê-lo apenas para as misturas com AN. Nas MAA, a redução da propriedade foi tão significativa que a máquina que executou o ensaio não tinha a sensibilidade suficiente para analisar valores de tensão tão pequenos como os obtidos para as misturas com AR.

Para o betão produzido com CP (betão de referência) com AN, o valor médio do módulo de elasticidade

em cilindros a 28 dias foi de 33,1 GPa. Na Figura 32, é possível observar que os BAA apresentaram um desempenho inferior em relação ao betão de referência. O valor mais baixo correspondeu, mais uma vez, ao da mistura de 75% de CFRSU. A adição de CFRSU, em troca de CV, diminuiu o módulo de elasticidade do betão. Os resultados obtidos estão de acordo com os observados por Avila et al. (2022), que concluíram que o maior valor de módulo de elasticidade foi obtido para a mistura com 100% de CV e o menor valor foi obtido para a mistura com 75 % de CFRSU.

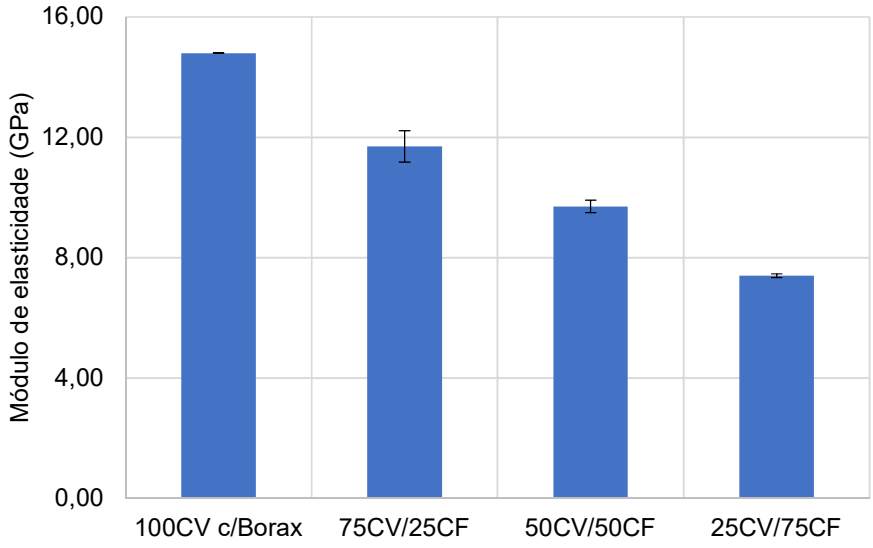

Figura 32 - Módulo de elasticidade de provetes cilíndricos ativados alcalinamente com 100% AN a 28 dias.

Na Figura 33, é possível ver a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão a 28 dias para os provetes cilíndricos. O coeficiente de determinação (R^2) obtido corresponde a 0,87, o que sugere a uma relação linear entre as duas propriedades. Por outras palavras, quanto maior a resistência à compressão, maior é o valor do módulo de elasticidade.

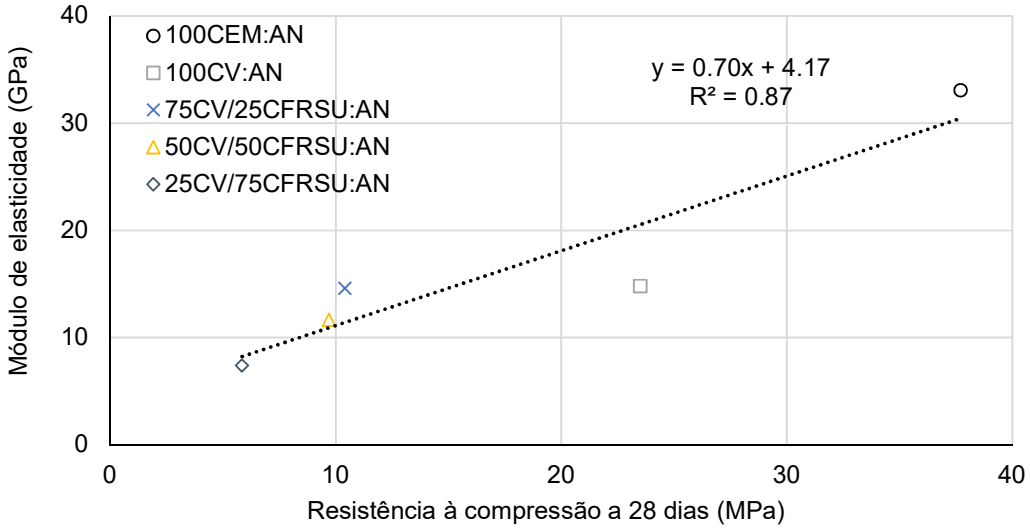

Figura 33 - Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade a 28 dias.

Contudo, a relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade não aparenta ter sido afetada com a substituição parcial de CV por CFRSU (Figura 34), o que sugere que uma maior compacidade do betão não significa necessariamente que tenda a ser mais rígido (com menor deformabilidade).

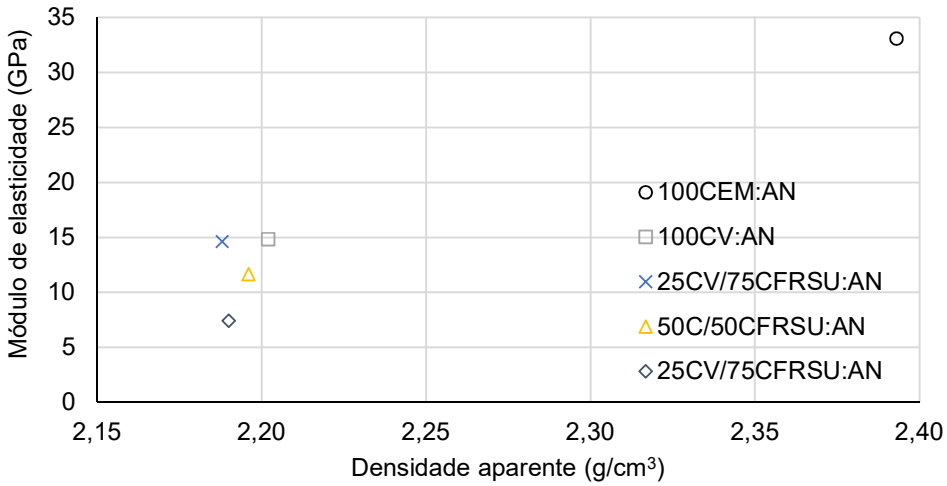

Figura 34 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente das várias misturas.

Para uma melhor análise dos valores obtidos das várias misturas, é possível observar as correspondentes variações e todos os *outliers* e perdas de provetes nos anexos (Tabela A8).

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações finais

O nível de produção de resíduos sólidos urbanos tem vindo a aumentar e estes são depositados em aterros a céu aberto, tornando-os um risco para o planeta. Nos países mais desenvolvidos, têm sido criadas soluções para a redução da quantidade de RSU que chega aos aterros, sendo uma dessas soluções a incineração. Esta dissertação teve como missão fazer um maior aproveitamento da CFRSU no setor da construção, atribuindo uma utilidade para este material. Este aproveitamento irá trazer vantagens ambientais, tais como a redução de emissões de poluentes, do consumo de recursos naturais e da redução dos aterros. Com a análise dos betões produzidos com CFRSU, verificou-se que estes apresentam um desempenho inferior ao observado em betões convencionais. Este comportamento já era expectável, dada alguma da experiência recente da equipa de investigação do projeto RinoPolyCrete, dentro do qual se inseriu este estudo. Ainda assim, com esta análise, foi possível identificar diversos problemas e encontrar soluções para os mesmos, o que irá possibilitar o desenvolvimento de várias investigações futuras.

5.2 Conclusões gerais

A divisão da presente dissertação fez-se em três fases. Na primeira (capítulo 2), foi feita uma revisão da literatura relacionada com BAA produzidos com CV e CFRSU, tanto como AR e com AN. O objetivo desta fase foi entender o comportamento da substituição de AN por AR e compreender o papel da ativação alcalina em betões com CV e CFRSU. Com a segunda fase (capítulo 3), fez-se uma exposição de todos os pontos da campanha experimental, desde os materiais e quantidades, todos os ensaios e provetes e as referentes normas dos ensaios. Na terceira e última fase (capítulo 4 e 5), fez-se a análise dos resultados obtidos, chegando-se posteriormente a conclusões relativamente aos valores obtidos com base na revisão literária feita na primeira fase. No presente capítulo, serão sumarizadas as conclusões referentes a esses valores obtidos.

5.2.1 Betões no estado fresco

Para os vários betões no estado fresco, foram realizados dois ensaios: trabalhabilidade e massa volúmica. Embora tivesse sido utilizado o rácio de a/l de 0,5 em todas as misturas, verificou-se que apenas as misturas 100CEM:AN e 100CEM:AR obtiveram uma classe de consistência S3 e que, para as restantes misturas ativadas alcalinamente, a classe de consistência foi S5. Contudo, é importante entender que a produção de betão ativado alcalinamente com CV e CFRSU foi a primeira no contexto do projeto de investigação RinoPolyCrete e as percentagens de quantidades utilizadas foram baseadas em quantidades ótimas utilizadas para argamassas. Mesmo havendo esta diferença entre as MAA e a mistura de referência, deu-se continuidade à campanha experimental, pois teria sido necessário fazer um acerto na trabalhabilidade e o expectável era que as várias misturas necessitassem de uma alteração significativa nos rácios das suas relações, de modo a diminuir a plasticidade das MAA.

5.2.2 Betões no estado endurecido

Para os vários betões no estado endurecido, foram realizados quatro ensaios de resistência mecânica, sendo estes: resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à compressão após cura em câmara de CO_2. Os resultados estão divididos em duas tabelas distintas, sendo a Tabela 16 referente aos provetes com 100% de AN e a Tabela 18 às misturas com 100 % AR. No entanto, para o ensaio da resistência à compressão após carbonatação, os valores são apresentados para as misturas com 100% AN na Tabela 17 e para as misturas com 100% AR na Tabela 19.

Na Tabela 16, em praticamente todas as propriedades, os BAA apresentaram um desempenho inferior ao do betão de referência, com exceção dos valores obtidos no módulo de elasticidade. Este declínio encontra-se de acordo com o tinha sido observado na revisão da literatura. Contudo, não foi expectável observar um valor de resistência à compressão da mistura 50CV/50CFRSU:AN a 7 dias superior ao da mistura 75CV/25CFRSU:AN.

Tabela 16 - Resistência mecânica das MAA, com 100% AN, com o betão de referência.

Propriedade	100CEM:AN (REF)	100CV:AN S/Bórax	100CV:AN C/Bórax	75CV/25CF:AN	50CV/50CF:AN	25CV/75CF:AN
Resistência à compressão em cubos a 7 dias (MPa)	42,00	-58,6% (23,90) ↓	-23,1% (32,3) ↓	-73,8% (11,00) ↓	-72,1% (11,73) ↓	-79,4% (8,67) ↓
Resistência à compressão em cubos a 28 dias (MPa)	48,53	-52,6% (23,00) ↓	-37,7% (30,25) ↓	-75,1% (12,10) ↓	-74,7% (12,30) ↓	-85,9% (6,83) ↓
Resistência à compressão em cubos a 91 dias (MPa)	51,10	-43,4% (28,93) ↓	-37,9% (31,75) ↓	-75,1% (12,70) ↓	-78,1% (11,20) ↓	-84,4% (7,97) ↓
Resistência à compressão em cilindros a 28 dias (MPa)	37,70	-43,1% (21,45) ↓	-37,7% (23,50) ↓	-72,4% (10,40) ↓	-74,3% (9,70) ↓	-84,5% (5,85) ↓
Módulo de elasticidade a 28 dias (GPa)	33,07		-55,2% (14,81) ↓	-55,8% (14,62) ↓	-64,7% (11,66) ↓	-77,6% (7,40) ↓
Resistência à tração a 28 dias (MPa)	2,00	+3,5% (2,07) ↑	+17,5% (2,35) ↑	-45% (1,10) ↓	-40% (1,20) ↓	-63,5% (0,73) ↓

Legenda:

↑ Valor superior ao de referência, apresentando melhores resultados

↓ Valor inferior ao de referência, apresentando piores resultados

Seria esperado que, com a introdução de CFRSU na mistura, a resistência fosse diminuindo gradualmente. Observou-se a mesma tendência para as restantes idades. De salientar que, ao longo do tempo, a única mistura que teve um aumento gradual, apesar de lento, foi a 75CV/25CFRSU:AN. As outras duas misturas tiveram uma variação anormal; a 50CV/50CFRSU:AN aumentou de 7 para 28 dias, porém diminuiu a 91 dias, e a 25CV/75CFRSU diminuiu de 7 para 28 dias, mas a 91 dias teve um aumento do seu valor. O módulo de elasticidade das várias misturas ativadas alcalinamente é bastante mais baixo do que o módulo de elasticidade da mistura 100CEM:AN. Verificou-se que, quanto maior a quantidade de CFRSU na mistura, menor será o valor da propriedade. Isto ocorreu devido ao facto de

as CV e a CFRSU terem uma massa volúmica mais baixa, e que é uma característica importante para um bom desempenho elástico. No que concerne à resistência à tração, é possível verificar que existe uma melhoria de desempenho de ≈3,5% para a mistura 100CV:AN s/Bórax e de ≈17,5% para a mistura 100CV:AN c/Bórax relativamente à mistura de referência, sendo que esta melhoria de comportamento foi também observada na revisão da literatura. Para as restantes misturas, dá-se uma diminuição de valores; contudo, mais uma vez, a mistura 50CV/50CFRSU:AN apresentou um valor superior à mistura 75CV/25CFRSU:AN. Foi feita uma nova betonagem para verificar a tendência destes valores, mas, até à data de entrega do presente documento, não foi possível obter os resultados.

Na Tabela 17, é possível observar uma comparação de valores de antes e após câmara de CO_2. Em que podemos verificar que se deu um grande aumento capacidade de resistência à compressão, com a cura em câmara de CO_2. Esta melhoria no comportamento é bastante importante, pois, olhando para os valores de resistência à compressão antes da câmara de carbonatação estes são muito baixos e este aumento é bastante positivo numa visão de futuro, pois tornam os MAA um passo mais perto de serem viáveis como ligantes.

Tabela 17 - Resistência à compressão antes e após câmara de carbonatação acelerada para as misturas com 100% AN.

Mistura	Antes de câmara de CO_2 a 28 dias (MPa)	Após câmara de CO_2 a 28 dias (%)	
100CEM:AN (REF)	48,53	+33,65 (64,86 MPa)	⬆
100CV:AN c/Bórax	30,25	+47,27 (44,55 MPa)	⬆
75CV/25CF:AN	12,10	+74,66 (21,13 MPa)	⬆
50CV/50CF:AN	12,30	+98,92 (24,47 MPa)	⬆
25CV/75CF:AN	6,83	150,98 (17,15 MPa)	⬆

Legenda:

⬆ Valor superior ao de referência, apresentando melhores resultados

Na Tabela 18, referente aos valores das misturas com 100% AR, pode-se inferir que o desempenho destas comparadas com as com 100% AN é inferior, o que está em concordância com o que era esperado e verificado na revisão da literatura. Analisando as MAA com mais detalhe, é possível verificar que a mistura que se destaca em termos de resistência à compressão é a mistura 75CV/25CF:AR, que apresenta os melhores valores em todas as idades. De notar que, nas misturas com 100% AR, houve um aumento de valor de resistência à compressão ao longo do tempo, algo que não se verificou em todas as misturas com 100% AN. Este desempenho inferior está relacionado com as propriedades intrínsecas dos agregados reciclados, que aumentam as possibilidades de propagação de fendas e também com a possível diminuição do rácio de ativador alcalino para ligante, o que leva a uma menor quantidade de solução alcalina para reagir com o precursor.

Os valores de módulo de elasticidade não estão apresentados, pois este ensaio não foi efetuado para estas misturas devido à sensibilidade da máquina não ser a suficiente para os valores de força média obtidos para as misturas ativadas alcalinamente. Olhando para os valores da resistência à tração, estes

demonstram mais uma vez que quanto mais CFRSU na mistura, pior são os resultados.

Tabela 18 - Resistência mecânica das MAA, com 100% AR, com o betão de referência.

Propriedade	100CEM:AR (REF)	100CV:AR C/Bórax	75CV/25CF:AR	50CV/50CF:AR	25CV/75CF:AR
Resistência à compressão em cubos a 7 dias (MPa)	21,67	-87,9% (2,63) ↓	-80,8% (4,17) ↓	-93,2% (1,47) ↓	-95,4% (1,00) ↓
Resistência à compressão em cubos a 28 dias (MPa)	26,27	-87,1% (3,40) ↓	-83,4% (4,37) ↓	-94,7% (1,40) ↓	-96,1% (1,03) ↓
Resistência à compressão em cubos a 91 dias (MPa)	30,55	-89,8% (3,13) ↓	-83,14% (5,15) ↓	-90,8% (2,80) ↓	-94,6% (1,65) ↓
Resistência à compressão em cilindros a 28 dias (MPa)	17,00	-88,8% (1,90) ↓	-82,1% (3,05) ↓	-95,0% (0,85) ↓	-95,3% (0,80) ↓
Resistência à tração a 28 dias (MPa)	2,05	-80,5% (0,4) ↓	-86,8% (0,27) ↓	-89,8% (0,23) ↓	-89,8% (0,21) ↓

Legenda:

↓ Valor inferior ao de referência, apresentando piores resultados

Na Tabela 19, são apresentados os valores referentes à resistência à compressão antes e após câmara de carbonatação. Dos quais podemos aferir que, mais uma vez temos uma melhoria de desempenho após a cura na câmara de CO_2. Contudo, é importante referir que apesar dos valores percentuais de aumento serem bastante elevados, isto também se deve aos valores antes da carbonatação serem bastante baixos. Ou seja, apesar de se apresentarem maiores que os valores observados para misturas com 100% AN, estes são na realidade semelhantes aos observados anteriormente.

Tabela 19 - Resistência à compressão antes e após câmara de carbonatação acelerada para as misturas com 100% AR.

Misturas	Antes de câmara de CO_2 a 28 dias (MPa)	Após câmara de CO_2 a 28 dias (%)
100CEM:AR (REF)	26,27	+32% (34,77 MPa) ↑
100CV:AR C/Bórax	3,40	+114% (7,27 MPa) ↑
75CV/25CF:AR	4,37	+169% (11,77 MPa) ↑
50CV/50CF:AR	1,40	+204% (4,25 MPa) ↑
25CV/75CF:AR	1,03	+435% (5,53 MPa) ↑

Legenda:

↑ Valor superior ao de referência, apresentando melhores resultados

Fazendo uma comparação de valores entre as misturas com AR e AN (Tabela 20), é possível verificar que, em grande parte dos casos, houve uma diminuição de capacidade resistente à compressão e à tração quando se fez a substituição total de AN por AR.

Tabela 20 - Resistência mecânica para misturas com AN e misturas com AR.

Propriedade	100CEM			100 CV C/bórax			75CV/25CF			50CV/50CF			25CV/75CF		
	AN	AR					AN	AR		AN	AR		AN	AR	
Resistência à compressão em cubos a 7 dias (MPa)	42,00	21,67	↓	32,3	2,6	↓	11,00	4,2	↓	11,70	1,5	↓	8,7	1,00	↓
Resistência à compressão em cubos a 28 dias (MPa)	48,5	26,3	↓	30,30	3,4	↓	12,10	4,4	↓	12,30	1,4	↓	6,8	1,00	↓
Resistência à compressão em cubos a 91 dias (MPa)	51,10	30,60	↓	31,80	3,10	↓	12,70	5,20	↓	11,2	2,8	↓	8,00	1,70	↓
Resistência à compressão em cilindros a 28 dias (MPa)	37,70	17,00	↓	23,50	1,90	↓	10,40	3,10	↓	9,70	0,90	↓	5,90	0,8	↓
Resistência à tração a 28 dias (MPa)	2,00	2,1	↑	2,30	0,40	↓	1,10	0,30	↓	1,20	0,20	↓	0,70	0,20	↓

Legenda:

↑ Valor superior ao de referência, apresentando melhores resultados

↓ Valor inferior ao de referência, apresentando piores resultados

Porém, a mistura 100CEM com AR teve um comportamento diferente, visto que teve um aumento de desempenho para a resistência à tração, embora fosse residual. Conclui-se que a substituição total de AN por AR não é benéfica para as MAA.

5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros

A substituição dos ligantes convencionais por CFRSU ativada alcalinamente é um processo muito recente, com poucas investigações e inovador a nível da sustentabilidade, pelo que é normal que no decorrer da campanha experimental tivessem ocorrido vários problemas. Contudo, os problemas observados podem vir a ser alvo de investigações futuras, para um melhor entendimento do comportamento do material.

Assim, as propostas de desenvolvimentos futuros são as seguintes:

- produzir as mesmas misturas a nível de ligante, mas mudar a percentagem de 100% de AR para apenas aplicar ARG;
- fazer uma otimização da trabalhabilidade do betão; na presente dissertação, foram utilizadas as quantidades ótimas de argamassas ativadas alcalinamente de investigações anteriores, levando a resultados não desejados;
- fazer a utilização de CFRSU não como ligante, mas como um agregado leve;
- após a cura do betão com CFRSU ativado, colocar os provetes diretamente na câmara de carbonatação e fazer-se uma comparação com a mesma mistura aos mesmos dias, mas estando esta numa câmara seca;
- produzir as mesmas misturas a nível de ligante e sem os agregados, mas com o objetivo de se produzir um betão de limpeza.

Referências

ABDOLLAHNEJAD, Z., MASTALI, M., FALAH, M., LUUKKONEN, T., MAZARI, M. & ILLIKAINEN, M. 2019. Construction and demolition waste as recycled aggregates in alkali-activated concretes. *Materials,* 12**,** 23.

ACI 318 2008. Building code requirements for structural concrete and commentary. *American Concrete Institute*. Farmington Hills, United States of America.

ACI M318-05 2005, Building code requirements for structural concrete and commentary, *American Concrete Institute*. Farmington Hills, United States of America.

AHMARI, S., REN, X., TOUFIGH, V.; ZHANG, L. 2012. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction Building Materials*, *35*, 718-729.

ASTM C469/C469M-14e1 2014, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. *Annual Book ASTM Standards 02.01*. West Conshohocken, United States of America.

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. *ASTM International*, West Conshohocken, United States of America.

AVILA, Y., SILVA, R. V., & DE BRITO, J. 2022. Alkali-Activated Materials with Pre-Treated Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. *Eco-Efficient Construction and Building Materials, 12***,** 3535.

BEHERA, M., BHATTACHARYYA, S. K., MINOCHA, A. K., DEOLIYA, R., MAITI, S. 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction Building Materials*, *68*, 501-516.

BENHELAL, E., ZAHEDI, G., SHAMSAEI, E. & BAHADORI, A. 2013. Global strategies and potentials to curb CO_2 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, London, United Kingdom.

BURNLEY, S. J. 2007. A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom. *Waste Management, 27.*

CARVALHO, R., SILVA, R. V., DE BRITO, J., & PEREIRA, M. F. C. 2021. Alkali activation of bottom ash from municipal solid waste incineration: Optimization of $NaOH^-$ and Na_2SiO_3-based activators. *Journal of Cleaner Production,* 291, 125930.

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.

CHENG-YONG, H., HUI-TENG, N., YUN-MING, L., ABDULLAH, M. M. A. B., ROJVIRIY, C., PART WEI KEN, P., SHEE-WEEN, O., YONG-JIE, H., WAN-EN, O. 2022. Thermo-mechanical behaviour of fly ash-

ladle furnace slag blended geopolymer with incorporation of decahydrate borax. *Construction and Building Materials, 331*, 127337.

CHI, M., & R. HUANG 2012. Effects of dosage and modulus ratio of alkali activated solution on the properties of slag mortars. *Advanced Science Letters 16(1)*, 7-12.

CHI, M., & R. HUANG 2013. Binding mechanism and properties of alkali activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials 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., JATURAPITAKKUL, C., CHALEE, W. & RATTANASAK, U. 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management, 29***,** 539-543.

COUTINHO, A.S., GONÇALVES A. 1994. Concrete fabrication and properties, 2nd edition, volume III. Lisboa: LNEC.

DAMRONGWIRIYANUPAP, N., SRIKHAMMA, T., PLONGKRATHOK, C., PHOO-NGERNKHAM, T., SAE-LONG, W., HANJITSUWAN, S., SUKONTASUKKUL, P., LI, L., CHINDAPRASIRT, P. 2022. Assessment of equivalent substrate stiffness and mechanical properties of sustainable alkali-activated concrete containing recycled concrete aggregate. *Case Studies in Construction Materials, 16, e00982*.

DE BRITO, J., EVANGELISTA, L. 2013. Using fine recycled aggregates from construction and demolition waste in concrete production: A state-of-the-art Review. *Innovations in Concrete Productions UKIERI 17.* Jalandhar, India.

DHIR, R. K., BRITO, J., LYNN, C. J. C 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.

DUXSON, P. & PROVIS, J. L. 2008. Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society, 91(12)*, 3864-3869.

ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ, E., MARÍ, A., BARRA, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research, 37*, 735-742.

EVANGELISTA, L., DE BRITO, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites 29*, 397-401.

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.

GUNASEKARA, C., NANAYAKKARA, O., SANDANAYAKE, M., LAW, DAVID W., NGUYEN, K., XIA,

J., SETUNGE, S. 2020. Alkali activated slag concrete incorporating recycled aggregate concrete: Long term performance and sustainability aspect. *Construction and Building Materials, 271*, 121512.

HAMA, S.M. 2017. Improving mechanical properties of lightweight Porcelanite aggregate concrete using different waste material. *International Journal of Sustainability Built Environment 6 (1),* 81-90.

HANI ADNAN, S., LOON LEE, Y., ABDUL RAHMAN, I., & WIMALA, M. 2007. Compressive strength of recycled aggregate concrete with various percentage of recycled aggregate. *National Seminar on Civil Engineering Research (SEPKA),* Universiti Teknologi Skudai, Malaysia.

HANJITSUWAN, S., INJORHOR, B., PHOO-NGERNKHAM, T., DAMRONGWIRIYANUPAP, N., LI, L. Y., SUKONTASUKKUL, P. 2020. Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive. *Cement and Concrete Composites, 114*, 103760.

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, C., LIN, S., CHANG, C., CHEN, H. 2013. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of class F fly ash. *Construction Building Materials, 46,* 71-78.

JATURAPITAKKUL, C., & CHEERAROT, R. 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material. *Journal of Materials in Civil Engineering, 15(1)***,** 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. *Materials, 14(8)***,** 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.

KROEHONG, W., SINSIRI, T., JATURAPITAKKUL, C., CHINDAPRASIRT, P. 2011. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction Building Materials 25 (11),* 4095-4104.

LEE, N. K., ABATE, S. Y., KIM, H. 2018. Use of recycled aggregates as internal curing agent for alkali-activated slag system. *Construction Building Materials*, *159*, 286-296.

LEE, N.K, LEE, H. K. 2013. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/ slag concrete manufactured at room temperature. *Construction Building Materials, 47*, 1201-1209.

LI, N., SHI, C., Wang, Q., ZHANG, Z., OU, Z. 2017. Composition design and performance of alkali-activated cements. *Materials and Structures, 50(3), 178.*

LIU, Z., LIU, Z., LI, X. 2006. Status and prospect of the application of municipal solid waste incineration

in China. *Applied Thermal Engineering, 26,* 1193-1197.

LNEC 397 1993. Betões: Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão, LNEC Lisboa.

MO, K. H., RAMESH, S., JUMAAT, M. Z., WONG, L. S., NG, C., ALENGARAM, U. J., 2018. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials, 186*, 550-576.

NATH, P., SARKER, P.K. 2017 Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials, 130 (Supplement C),* 22-31.

NEVILLE, AM. 1995. Properties of concrete. 4th edition. London: Longman.

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_2 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 volúmica 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 12390-6 2003. Ensaios de betão endurecido. Parte 6: resistência à tracção por 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.

NUAKLONG, P., SATA, V., CHINDAPRASIRT, P. 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2300-2307.

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. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design, 36*, 191-198.

PACHECO-TORGAL, F., TAM, V. W. Y., LABRICHA, J. A., DING, Y., BRITO, J. 2013. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. *Woodhead Publishing: Cambridge*, UK.

PARTHIBAN, K., SARAVANA, R. M. K. 2016. Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete. *Construction Building Materials*, *102*, 51-58.

PARTHIBAN, K., SARAVANA, R. M. K. 2017. Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials, 133*, 65-72.

PHAIR, J., DEVENTER, J., & SMITH, J. 2000. Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 39*, 2925-2934.

PHOO-NGERNKHAM, T., HANJITSUWAN, S., SUKSIRIPATTANAPONG, C., THUMRONGVUT, J., SUEBSUK, J., SOOKASEM, S. 2016. Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali-activated binders under different types of alkali solutions. *Construction Building Materials, 127,* 673-678.

PHOO-NGERNKHAM, T., PHIANGHIMAI, C., IINTARABUT D., HANJITSUWAN S., DAMRONGWIRIYANUPAP, N., LI, L. Y. 2020. Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue. *Construction Building Materials, 247*, 118543.

POON, C.S., LAM, C.S. 2008. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on properties of precast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites, 30*, 283-289.

PUERTAS, F., MARTÍNEZ-RAMIRÉZ, S., ALONSO, S., & VÁSQUEZ, T. 2000. Alkali-activated fly ash/slag cement Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research, 30*, 1625-1632.

RAHAL, K. 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment, 42(1)*, 407-415.

RAHAL, K.N., ALREFAEI, Y.T. 2018. Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups. *Construction Building Materials*, *191*, 866-876.

RANGAN, B. 2008. Fly ash-based geopolymer concrete. *Curtin University of Technology*, 1-44.

RATTANACHU, P., TANGCHIRAPAT, W., JATURAPITAKKUL, C. 2019. Water permeability and sulfate resistance of eco-friendly high-strength concrete composed of ground bagasse ash and recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering, 31(6),* 04019093.

REN, X., ZHANG, L. 2019. Experimental Study of Geopolymer Concrete Produced from Waste Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering 31, 7.*

RUENGSILLAPANUN, 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.

SAGOE-CRESENTIL, K. K., BROWN, T., Taylor, A. H. 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete. Research, 31*, 707-712.

SATA, V., WONGSA, A., CHINDAPRASIRT, P. 2013. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 39, 2925-2934.*

SEVERO, C., COSTA, D., BEZERRA, I., MENEZES, R., & NEVES, G. 2013. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 8(2),* 55-67.

SHAIKH, F. A. 2016. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainability Built Environment*, *5*, 277-287.

SHARIQ, M., PRASAD, J., ABBAS, H. 2013. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. *Construction Building Materials, 41 (Supplement C),* 411-418.

SHI, C., LI, Y., ZHANG, J., LI, W., CHONG, L., XIE, Z. 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - *A review. Journal of Cleaner Production 112*, 466-472.

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.

SIDDIQUE, R. 2003. Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research, 33 (4)*, 539-547.

SILVA, R. V., DE BRITO, J. D., LYNN, C., & DHIR, R. 2017. Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review. *Waste Management, 68*, 207-220.

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. 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. 2016. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production, 112***,** 2171-2186.

SOFI, M., VAN DEVENTER, J.S.J., MENDIS, P.A., LUKEY, G.C. 2007. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement Concrete Research 37(2),* 251-257.

SUKONTASUKKUL, P., CHINDAPRASIRT, P., PONGSOPHA, P., PHOO-NGERNKHAM, T.,

TANGCHIRAPAT, W., BANTHIA, N., 2020. Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer. *Journal of Sustainable Cement Based Materials, 9*, 1-15.

TABSH, S. W., & ABDELFATAH, A. S. 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials, 23(2),* 1163-1167.

TANG, Z., HU, Y., TAM, V., LI, W. 2019. Uniaxial compressive behaviors of fly ash/slag-based geopolymeric concrete with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, *104*, 103375.

TANGCHIRAPAT, W., KHAMKLAI, S., JATURAPITAKKUL, C. 2012. Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. *Materials and Design, 41,* 150-157.

XIAO, J. 2018. Recycled Aggregates. *In:* XIAO, J. (ed.) *Recycled Aggregate Concrete Structures.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 3(4), 65-98.

XIAO, J.Z., LI, W., FAN, Y., HUANG, X. 2012. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction Building Materials*, *31*, 364-383.

XIE, J., CHEN, W., WANG, J., FANG, C., ZHANG, B., LIU, F. 2019. Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. *Construction Building Materials*, *226*, 345-359

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.

ZHANG, P., GAO, Z., WANG, J., GUO, J., HU, S., LING, Y. 2020. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, *270*, 122389.

Anexos

Anexo 1

Tabela A2 - Distribuição granulométrica dos AN utilizados

D (mm)	D^(1/5)	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

Anexo 2

Tabela A3 - Valores de resistência à compressão aos 7 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	F_{max} (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	8307,1	993	44,1	42,0	1,5
	P2	8041,1	930	41,3		
	P3	8274,8	912,5	40,6		
100 CV:AN S/Bórax	P1	7648,1	596,6	26,5	23,9	2,6
	P2	7177,85	332,7	14,8		
	P3	7241,65	478,5	21,3		
100 CV:AN C/Bórax	P1	7630	726,6	32,3	32,3	0,1
	P2	7626	730,9	32,5		
	P3	7742	724,9	32,2		
75CV/25CF :AN	P1	7540,4	274	12,2	11,0	0,9
	P2	7507,5	227,1	10,1		
	P3	7429	240,7	10,7		
50CV/50CF :AN	P1	7782	297,5	13,2	11,7	1,0
	P2	7742	250,3	11,1		
	P3	7676	244,8	10,9		
25CV/75CF :AN	P1	7734,85	247,7	11	8,7	1,7
	P2	7896,4	180,3	8		
	P3	7810,65	156,9	7		
100 CEM:AR	P1	6974,15	496,5	22,1	21,7	1,2
	P2	6990,9	449,7	20		
	P3	7255,35	514,2	22,9		
100 CV:AR	P1	6961,4	63,2	2,8	2,6	0,1
	P2	6644,95	57,1	2,5		
	P3	6761,95	57,9	2,6		
75CV/25CF :AR	P1	6780,3	97,1	4,3	4,2	0,3
	P2	6981,7	98,3	4,4		
	P3	6758,7	86,6	3,8		
50CV/50CF :AR	P1	7142,3	33,9	1,5	1,5	0,0
	P2	6767,3	33,9	1,5		
	P3	6822,8	32,5	1,4		
25CV/75CF:AR	P1	6792,15	63,2	2,8	1,0	0,2
	P2	6550,28	17,9	0,8		
	P3	6742,3	26,7	1,2		

Anexo 3

Tabela A4 - Valores de resistência à compressão aos 28 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	F_{max} (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	8257,65	1156,9	51,4	48,5	2,3
	P2	8080,95	1088	48,4		
	P3	8040,1	1030,2	45,8		
100 CV:AN S/Bórax	P1	7480,9	461,4	20,5	23,0	2,5
	P2	7152,7	379,9	16,9		
	P3	7715,4	572,9	25,5		
100 CV:AN C/Bórax	P1	7715	717,6	31,9	30,3	1,7
	P2	7523	643,1	28,6		
	P3	7109	502,4	22,3		
75CV/25CF :AN	P1	7684	285,8	12,7	12,1	0,4
	P2	7527	262,3	11,7		
	P3	7492	268,1	11,9		
50CV/50CF :AN	P1	7572,95	192,1	8,5	12,3	0,1
	P2	7504,9	280	12,4		
	P3	7613,05	274	12,2		
25CV/75CF :AN	P1	7796,15	181,3	8,1	6,8	0,9
	P2	7765,2	145,3	6,5		
	P3	7619,2	133,4	5,9		
100 CEM:AR	P1	7096,55	602,4	26,8	26,3	0,8
	P2	6963,1	566,9	25,2		
	P3	6921,5	602,1	26,8		
100 CV:AR	P1	6831,7	69,1	3,1	3,4	0,7
	P2	6778,3	98,3	4,4		
	P3	6599,4	60,7	2,7		
75CV/25CF :AR	P1	6839,65	98,6	4,4	4,4	0,2
	P2	7015,15	104,3	4,6		
	P3	6666,75	92,4	4,1		
50CV/50CF :AR	P1	6961,55	33,9	1,5	1,4	0,1
	P2	6306,75	28,1	1,2		
	P3	7184,6	33,9	1,5		
25CV/75CF :AR	P1	6559,9	28,1	1,2	1,0	0,2
	P2	6888,3	28,1	1,2		
	P3	6511,7	16,4	0,7		

Anexo 4

Tabela A5 - Valores de resistência à compressão aos 91 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	F_{max} (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	7988,0	1181,9	52,5	51,1	1,5
	P2	7767,0	1105,7	49,1		
	P3	7942,0	1164,2	51,7		
100 CV:AN S/Bórax	P1	7446,3	643,1	28,6	28,9	0,7
	P2	7441,8	672,3	29,9		
	P3	7218,5	637,1	28,3		
100 CV:AN C/Bórax	P1	7654,9	619,6	27,5	31,8	4,25
	P2	7457,9	810,2	36,0		
	P3	7019,4	555,2	24,7		
75CV/25C F:AN	P1	7582,5	273,6	12,2	12,7	0,9
	P2	7542,5	315,0	14,0		
	P3	7411,3	268,1	11,9		
50CV/50C F:AN	P1	7546,7	238,6	10,6	11,2	0,5
	P2	7462,7	268,1	11,9		
	P3	7447,9	250,5	11,1		
25CV/75C F:AN	P1	7421,4	198,0	8,8	8,0	0,7
	P2	7818,5	159,2	7,1		
	P3	7569,6	180,3	8,0		
100 CEM:AR	P1	6886,3	655,8	29,1	30,6	1,5
	P2	7012,1	719,1	32,0		
	P3	-	-	-		
100 CV:AR	P1	6564,8	69,1	3,1	3,1	0,3
	P2	6511,5	79,2	3,5		
	P3	6410,0	63,2	2,8		
75CV/25C F:AR	P1	6424,6	98,3	4,4	5,2	0,7
	P2	6259,4	45,6	2,0		
	P3	6872,5	132,7	5,9		
50CV/50C F:AR	P1	6860,4	63,2	2,8	2,8	0,4
	P2	6517,5	74,9	3,3		
	P3	6202,0	51,4	2,3		
25CV/75C F:AR	P1	6414,8	33,9	1,5	1,7	0,2
	P2	6326,5	40,8	1,8		
	P3	6711,5	86,6	3,8		

Anexo 5

Tabela A6 - Valores de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	F_{max} (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	12631,0	742,4	42,0	37,7	4,3
	P2	12331,3	590,2	33,4		
100 CV:AN S/Bórax	P1	11593,2	373,7	21,1	21,5	0,4
	P2	11671,3	385,2	21,8		
100 CV:AN C/Bórax	P1	11578,0	414,7	23,5	31,8	1,4
	P2					
75CV/25 CF:AN	P1	11255,6	179,7	10,2	10,4	0,2
	P2	11472,2	187,5	10,6		
50CV/50 CF:AN	P1	11859,3	162,8	9,2	9,7	0,5
	P2	11913,1	180,3	10,2		
25CV/75 CF:AN	P1	11930,9	97,6	5,5	5,9	0,4
	P2	12032,0	110,1	6,2		
100 CEM:AR	P1	11042,0	332,7	18,8	17,0	1,8
	P2	10894,7	268,1	15,2		
100 CV:AR	P1	10516,2	33,9	1,9	1,9	0,0
	P2	10790,1	33,9	1,9		
75CV/25CF :AR	P1	10449,0	51,4	2,9	3,1	0,2
	P2	10464,9	57,4	3,2		
50CV/50CF: AR	P1	10583,8	12,5	0,7	0,9	0,2
	P2	10704,5	17,8	1,0		
25CV/75CF: AR	P1	10656,3	14,3	0,8	0,8	0,0
	P2	10464,8	14,3	0,8		

Anexo 6

Tabela A7 - Valores de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	F_{max} (kN)	Tensão (MPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	12642,86	143,50	2,03	2,00	0,03
	P2	12406,75	139,30	1,97		
100 CV:AN S/Bórax	P1	11385,35	145,30	2,06	2,07	0,02
	P2	11614,55	147,50	2,09		
100 CV:AN C/Bórax	P1	11669,10	162,80	2,30	2,35	0,05
	P2	11756,75	169,30	2,40		
75CV/25CF:AN	P1	11595,00	80,80	1,14	1,10	0,04
	P2	11641,00	74,90	1,06		
50CV/50CF:AN	P1	11638,75	84,40	1,19	1,20	0,05
	P2	11721,15	77,80	1,10		
25CV/75CF:AN	P1	11689,20	51,40	0,73	0,73	0,00
	P2	11976,30	51,60	0,73		
100 CEM:AR	P1	11189,30	174,40	2,47	2,05	0,41
	P2	10830,20	115,90	1,64		
100 CV:AR	P1	10713,10	28,10	0,40	0,40	0,00
	P2	10676,80	28,10	0,40		
75CV/25CF:AR	P1	10495,85	16,40	0,23	0,27	0,04
	P2	10468,60	22,20	0,31		
50CV/50CF:AR	P1	10623,10	16,10	0,23	0,23	0,00
	P2	10606,30	16,40	0,23		
25CV/75CF:AR	P1	10588,30	15,00	0,21	0,21	0,00
	P2	10542,20	15,00	0,21		

Anexo 7

Tabela A8 - Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias.

Mistura	Provetes ensaiados	Peso (g)	E (GPa)	Média tensões (MPa)	Desvio-padrão
100 CEM:AN	P1	12631	33,01	33,1	0,1
	P2	12331,3	33,13		
100 CV:AN C/Bórax	P1	11578,00	14,81	14,8	0,0
	P2				
75CV/25CF:AN	P1	11255,60	14,10	11,7	0,5
	P2	11472,20	15,14		
50CV/50CF:AN	P1	11859,30	11,87	9,7	0,2
	P2	11913,10	11,45		
25CV/75CF:AN	P1	11930,90	7,34	7,4	0,1
	P2	12032,00	7,46		

Anexo 8

Tabela A9 - Resultados do ensaio da compressão, antes e após carbonatação

		Antes da carbonatação						Após carbonatação				
Mistura	**Provetes ensaiados**	**Peso (g)**	**F_{max} (kN)**	**Tensão (MPa)**	**Média tensões (MPa)**	**Desvio-padrão**	**Provetes ensaiados**	**Peso (g)**	**F_{max} (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	30,3	1,7	P1	2158,75	446,8	44,7	44,6	0,15
	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	12,3	0,1	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	17,2	0.25
	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/75C F: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		

Tabela A10 – Tabela dos constituintes e respetivas quantidades das diversas misturas (quantidades para 1 litro de betão).

Constituinte	100 CEM		100 CV		75CV/25CF		50CV/50CF		25CV/75CF	
	AN	AR	AN	AR	AN	AR	AN	AR	AN	AR
CV (g)	-	-	300		225		150		75	
CFRSU (g)	-	-	-	-	75		150		225	
CP (g)	300		-	-	-	-	-	-	-	-
Água (g)	110,43	186,42	110,19	182,98	110,22	183,38	110,25	183,79	110,27	184,19
Areia Fina (g)	299,17	-	275,39	-	278,16	-	280,94	-	283,72	-
Areia Grossa (g)	549,45	-	505,78	-	510,88	-	515,98	-	521,09	-
Bago de arroz (g)	126,83	-	126,55	-	126,58	-	126,62	-	126,65	-
Brita 1 (g)	136,52	-	136,23	-	136,26	-	136,30	-	136,33	-
Brita 2 (g)	708,33	-	706,79	-	706,98	-	707,16	-	707,35	-
0 - 0,25 (g)	-	168,63	-	115,20	-	121,44	-	127,68	-	133,92
0,25 - 0,50 (g)	-	103,86	-	103,63	-	103,66	-	103,69	-	103,72
0,50 – 1 (g)	-	119,30	-	119,04	-	119,08	-	119,11	-	119,14
1 – 2 (g)	-	137,04	-	136,75	-	136,78	-	136,82	-	136,85
2 – 4 (g)	-	157,42	-	157,08	-	157,12	-	157,16	-	157,20
4 - 5,6 (g)	-	89,06	-	88,87	-	88,89	-	88,91	-	88,94
5,6 – 8 (g)	-	101,19	-	100,97	-	100,99	-	101,02	-	101,05
8 - 11,2 (g)	-	102,30	-	102,08	-	102,11	-	102,14	-	102,16
11,2 – 16 (g)	-	263,76	-	263,19	-	263,26	-	263,33	-	263,40
16 - 22,4 (g)	-	266,68	-	266,10	-	266,17	-	266,24	-	266,31
SP (g)	3									
Borax (g)	12									
NaOH (g)	49,39									
Solução Na_2SiO_3 (g)	80,07									