

Ativação alcalina de cinzas de fundo provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos na produção de argamassas com agregados reciclados de betão: Influência da cura térmica

Ana Sofia Lopes Casanova Fernandes

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: Professora Doutora Maria Cristina De Oliveira Matos Silva

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Vogal: Professor Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Junho 2019

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.

Resumo

Esta dissertação estuda o desempenho de argamassas que incorporam agregados reciclados finos em substituição de agregados naturais finos e cinzas volantes da incineração do carvão e cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos ativadas alcalinamente como substitutos do cimento. A substituição de agregados naturais finos por agregados reciclados é feita a 0 e 100%. A substituição total do cimento pelas cinzas de fundo permite analisar a viabilidade que estes materiais têm no setor da Construção. Por si só, os dois materiais ligantes não criam uma matriz resistente e, como tal, avaliou-se ambas as cinzas segundo o processo de polimerização que advém da comunhão do material com um ativador alcalino (hidróxido de sódio) seguida de uma cura térmica. Ao longo da dissertação, é estudada a influência das condições de cura térmica (70 °C/24 horas, 70 °C/48 horas, 90 °C/24 horas) para cada um dos ligantes estudados com e sem agregados reciclados. Nesta campanha experimental, verificou-se que as argamassas com resultados mais satisfatórios são as que incorporam cinzas volantes com agregados naturais, nomeadamente a 70 °C/48 horas de cura térmica, encontrando assim uma solução comparável com o cimento. Já as cinzas de fundo ainda são um material em expansão no mundo da investigação e os resultados obtidos revelaram uma discrepância com a argamassa de referência. Para as cinzas de fundo, após as condições do ensaio de carbonatação, estas resultaram numa matriz com melhores capacidades resistentes, pelo que é importante avaliar a carbonatação acelerada neste material.

Palavras-chave: argamassas, ativação alcalina, cura térmica, cinzas de fundo, resíduos sólidos urbanos, cinzas volantes, agregados reciclados.

Abstract

This dissertation assesses the performance of mortars that incorporate fine recycled aggregates as substitutes of fine natural aggregates and alkali activated fly ash, deriving from coal incineration, and bottom ash, from municipal solid waste, as substitutes of cement. The replacement of fine natural aggregates with recycled aggregates was total. The complete replacement of cement with bottom ashes allows an analysis of the viability of these materials in the construction sector. The two binders do not create a resistant matrix by themselves and therefore both ashes were evaluated according to the polymerization process that results from the reaction with the alkaline activator (sodium hydroxide) followed by a thermal curing process. Throughout this study, the influence of the curing conditions (70 °C/24 hours, 70 °C/48 hours, 90 °C/24 hours) was studied for each binder with and without recycled aggregates. In this experimental campaign, it was observed that the mortars with the best results are the ones incorporating alkali activated fly ash with natural aggregates, namely when under 70 °C/48 hours of thermal curing, and thus can be considered as a valid alternative to cement. The bottom ashes, after the conditions of the carbonation test, these ashes resulted in a matrix with enhanced mechanical performance, revealing the importance of assessing the accelerated carbonation in this material.

Keywords: mortar, alkali activation, thermal curing, bottom ash, municipal solid waste, fly ash, recycled aggregates.

Agradecimentos

Esta dissertação significa o fim de mais uma etapa da minha vida. No Técnico de Lisboa, ao longo destes últimos anos cresci não só ao nível intelectual, mas também pessoal, e quero agradecer a todos que, de alguma forma, presenciaram o meu trajeto e contribuíram para o meu futuro.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Prof. Dr. Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito. Ao definir na minha cabeça qual o género de tema que queria investigar, não foram colocadas dúvidas sobre o orientador a escolher. E, olhando para trás, tomei a melhor decisão possível. Sempre vi o Professor como alguém de enorme respeito e admiração. Quero agradecer-lhe por me ter aceitado como sua orientanda e pelo respeito com que sempre me tratou e por toda a ética, disciplina e rigor que exigiu de mim. Ao longo da dissertação, o meu percurso foi de altos e baixos e, por vezes, de inseguranças de não corresponder ao nível de exigência do Professor. Foram esses momentos, que por não o querer desiludir, me tornaram mais forte como pessoa.

Ao Dr. Rui Vasco Silva, quero agradecer por todo o apoio que me prestou ao longo da dissertação. Como já disse, ao longo deste último ano, nem sempre as coisas correram de feição para mim, mas pude sempre contar com o Dr. Rui para me ajudar e aconselhar. Ambos sabemos quantas vezes me questioneei quanto à minha prestação, e saber que tinha um enorme apoio ao meu lado, não foi só importante para concluir esta dissertação com sucesso, mas também a nível pessoal.

Aos meus colegas de laboratório, quero agradecer por toda ajuda e companhia ao longo de sete meses de trabalho intenso. Em primeiro lugar, ao Ricardo Carvalho, que me acompanhou desde o início desta dissertação e foi sem dúvida uma enorme ajuda não só a nível de laboratório, mas também no companheirismo que teve para comigo. Em segundo lugar, ao Sr. Pedro, Sr. Francisco e ao João por toda a paciência e ajuda prestada no laboratório. Por último, agradecer ao João Pacheco, ao Rawaz Kurda e ao Jorge Pontes que disponibilizaram o seu tempo para me ajudar em certos ensaios ao longo da campanha experimental. Este agradecimento não inclui todos aqueles que tiveram comigo no laboratório que foram sem dúvida uma companhia ao longo dos meses lá passados.

Um agradecimento muito especial que tenho é sem dúvida ao Tiago, o ‘Cenoura’ como lhe chamo. Para mim, é um grande amigo e, ao longo de todo o meu percurso académico o vi como exemplo e quis seguir as suas pisadas. E, foi também por ter estado presente no desenvolvimento da sua investigação que concluo o meu percurso académico com uma dissertação semelhante.

Ao Dudu que é como um irmão para mim, e sem o qual não teria conseguido concluir o meu percurso académico. É das pessoas que mais agradeço que o Técnico tenha colocado na minha vida porque tornou-se um amigo para a vida.

Às pessoas que estão comigo desde o meu primeiro dia no Técnico, à turma 25527. Sendo a única rapariga na turma, não tinha pedido turma melhor. Isto é apenas um até já da ‘Rainha das Princesas’.

Ao Mário que, apesar de tudo, sempre acreditou em mim e esteve do meu lado.

À Catarina Neves e ao Poim, para os quais não há palavras. Quando nos dizem que é na faculdade que vamos arranjar amigos para vida, é verdade e eles são a prova disso. Não podia estar mais grata por os ter na minha

vida não só nestes anos, mas por todos aqueles que ainda estão para vir.

Às Marianas, Chaves e Cagica, um grande obrigado por me ajudarem a ultrapassar o temido Técnico. Sem vocês não seria igual.

À Carolina e à Mariana que foram um grande pilar e me deram força para batalhar e concluir esta dissertação. Passámos de colegas de mestrado a amigas e só tenho de agradecer por todo o vosso apoio.

Obrigada ao Técnico por todas as pessoas maravilhosas que, para além das que já foram nomeadas, me deu o prazer de conhecer. Ao Diogo e a Raquel, de quem tenho muito orgulho de dizer que, para além de madrinha, sou amiga e pelos quais voltarei para festejar o fim desta fase da vida deles. Aos meus maninhos mais novos, a Carolina Cyrne e o Mateus, por quem eu tenho um grande carinho. E a todos que, por algum motivo, estiveram ou estão presentes na minha vida.

Aos que representamos LS. À Bá, à Cláudia, ao David, à Joana, à Rita Levita, ao Segundos, à Pars, à Xana e ao Zé que já estavam no meu coração e que assim continuam com um carinho muito especial.

O meu maior agradecimento é para os meus pais. Nunca conseguiria terminar este capítulo sem eles, são tudo para mim. O meu pai é o meu herói e, se houve alguém que me mostrou o que é força, foi ele. Estes dois anos não têm sido fáceis, mas ainda bem que milagres existem e estás cá para me ver. A minha mãe é a pessoa que irá sempre mover o meu mundo. O meu amor pela minha mãe é impossível de qualificar, é infinito. Obrigada por me tornarem na pessoa que sou hoje.

Por último, agradecer aos que não estão cá para presenciar. Guardo-vos todos no meu coração. Para vocês, avós.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	ESTADO DA ARTE.....	5
2.1	AGREGADOS RECICLADOS	5
2.2	CINZAS VOLANTES.....	6
2.3	CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	8
2.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	9
2.4.1	Retração.....	9
2.4.1.1	Agregados reciclados.....	9
2.4.1.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	10
2.4.1.3	Cinzas volantes	11
2.4.2	Resistência à compressão	11
2.4.2.1	Agregados reciclados.....	11
2.4.2.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	13
2.4.2.3	Cinzas volantes	14
2.4.3	Resistência à flexão.....	16
2.4.3.1	Agregados reciclados.....	16
2.4.3.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	16
2.4.3.3	Cinzas volantes	17
2.4.4	Ultrassons	18
2.4.4.1	Agregados reciclados.....	18
2.4.4.2	Cinzas volantes	18
2.4.5	Módulo de elasticidade	19
2.4.5.1	Agregados reciclados.....	19
2.4.5.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	20
2.4.5.3	Cinzas volantes	20
2.4.6	Carbonatação.....	21
2.4.6.1	Agregados reciclados.....	21
2.4.6.2	Cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos	22
2.4.6.3	Cinzas volantes	22
2.4.7	Absorção de água por capilaridade	24
2.4.7.1	Agregados reciclados.....	24
2.4.7.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	24
2.4.7.3	Cinzas volantes	25
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	27

3.1	INTRODUÇÃO.....	27
3.2	PLANO EXPERIMENTAL.....	27
3.2.1	Constituintes das argamassas.....	27
3.2.1.1	Cinzas volantes.....	27
3.2.1.2	Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.....	27
3.2.1.3	Agregados (naturais e reciclados).....	28
3.2.1.4	Ativador alcalino.....	28
3.2.2	Composição das argamassas.....	28
3.2.3	Produção de argamassas.....	29
3.2.4	Preparação dos provetes e condições de cura.....	29
3.3	ENSAIOS AOS AGREGADOS.....	30
3.3.1	Análise granulométrica.....	30
3.3.2	Massa volúmica e massa volúmica aparente.....	31
3.3.3	Absorção de água.....	33
3.4	ENSAIOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	35
3.4.1	Consistência.....	35
3.4.2	Massa volúmica.....	36
3.5	ENSAIOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	37
3.5.1	Resistência à flexão.....	37
3.5.2	Resistência à compressão.....	37
3.5.3	Módulo de elasticidade.....	38
3.5.4	Retração.....	39
3.5.5	Carbonatação.....	40
3.5.6	Absorção de água por capilaridade.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	INTRODUÇÃO.....	43
4.2	PROPRIEDADES DAS CINZAS VOLANTES E DAS CINZAS DE FUNDO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	43
4.2.1	Composição química.....	43
4.2.2	Análise granulométrica.....	43
4.3	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS.....	44
4.3.1	Análise granulométrica.....	44
4.3.2	Massa volúmica e massa volúmica aparente.....	45
4.3.3	Absorção de água.....	46
4.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	46
4.4.1	Trabalhabilidade.....	46
4.4.2	Massa volúmica.....	47
4.5	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	48
4.5.1	Resistência à compressão.....	48

4.5.2	Velocidade de ultrassons	52
4.5.3	Resistência à flexão	53
4.5.4	Módulo de elasticidade	55
4.5.5	Retração	56
4.5.6	Carbonatação	58
4.5.7	Absorção de água por capilaridade	61
5	CONCLUSÕES	63
5.1	Considerações finais	63
5.2	Conclusões gerais	63
5.3	Propostas de desenvolvimentos futuros	68
6	BIBLIOGRAFIA	69
	ANEXOS	I

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Variação dimensional de provetes com diferentes taxas de CFRSU (Leitão, 2017)	10
Tabela 2.2 Resistência à compressão assim como a variação entre as duas idades estudadas para vários incrementos de AR (Evangelista e de Brito, 2007)	11
Tabela 2.3 Resistência mecânica à compressão de CVAA (Nuaklong et al., 2016)	12
Tabela 2.4 Resistência à compressão (MPa) ao longo do tempo para betões e CVAA com diferentes incrementos de AR (Shi et al., 2012)	12
Tabela 2.5 Resistência à compressão com incrementos de CFRSU e AR nas amassaduras (Jurič et al., 2006)	13
Tabela 2.6 Resistência à compressão das amassaduras após 24 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)	15
Tabela 2.7 Resistência à compressão das amassaduras após 48 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)	15
Tabela 2.8 Resistência à compressão das amassaduras após 72 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)	15
Tabela 2.9 Resistência à flexão de CVAA com AN e AR para diferentes concentrações de AA (Nuaklong et al., 2016)	16
Tabela 2.10 Velocidade de ultrassons com diferentes rácios de substituição de AN por AR (Khatib ,2005).....	18
Tabela 2.11 Composições das misturas com dois tipos de betão (Farhan et al., 2019)	19
Tabela 2.12 Relação entre os valores de resistência à compressão e velocidade de ultrassons para as mesmas misturas de CVAA (Farhan et al., 2019)	19
Tabela 2.13 Módulo de elasticidade para as duas misturas avaliadas, a de referência e com AR (BN: betão normal; BAR: betão de alta resistência) (Gholampour e Ozbakkaloglu, 2018)	20
Tabela 2.14 Módulo de elasticidade com diferentes taxas de substituição de NA por AR (Evangelista e de Brito, 2007)	20
Tabela 2.15 Módulo de elasticidade das várias amostras de betão com o respetivo incremento de CF (Leitão, 2017)	20
Tabela 2.16 Módulo de elasticidade das três amostras para cada um dos AA utilizados (Fernandez-Jimenez et al., 2007)	21
Tabela 2.17 Coeficiente de absorção de água tendo em conta os vários incrementos de CF no ligante de cimento (Leitão, 2017)	25
Tabela 2.18 Composições dos polímeros analisados para as quatro relações estudadas: a/l, agregados/l, a composição dos agregados grossos e a resistência mecânica à compressão (Olivia et al., 2008).....	25
Tabela 3.1 Ensaio realizados na 1ª fase experimental	27
Tabela 3.2 Ensaio realizados na 2ª fase experimental	27

Tabela 3.3 Ensaio realizados na 3ª fase experimental	27
Tabela 3.4 Identificação de todas as argamassas produzidas.....	28
Tabela 3.5 Abertura dos peneiros (segundo a norma EN 1015-1, 1998).....	30
Tabela 4.1 Caraterização química das CFRSU	44
Tabela 4.2 Caraterização químicas das CV	44
Tabela 4.3 Análise granulométrica das CFRSU consoante os dois métodos realizados.....	44
Tabela 4.4 Análise granulométrica parcial da areia fina	45
Tabela 4.5 Análise granulométrica parcial da areia grossa	45
Tabela 4.6 Análise granulométrica parcial dos agregados reciclados.....	45
Tabela 4.7 Percentagem de material retido adotada na curva granulométrica dos ARF	45
Tabela 4.8 Massa volúmica dos diferentes agregados.....	45
Tabela 4.9 Baridade dos diversos materiais.....	45
Tabela 4.10 Consistência por espalhamento e relação ativador alcalino / ligante.....	47
Tabela 4.11 Massa volúmica no estado fresco [g/dm ³]	48
Tabela 4.12 Resistência à compressão das pastas para posterior ensaio DRX a 7 e 28 dias	52
Tabela 4.13 Velocidade de ultrassons das famílias de CV-AN e CV-AR para as diferentes condições de cura para 7, 28 e 91 dias.....	52
Tabela 4.14 Velocidade de ultrassons das famílias de CF-AN e CF-AR para as diferentes condições de cura para 7, 28 e 91 dias.....	52
Tabela 4.15 Módulo de elasticidade de cada umas das famílias estudadas aos 7, 28 e 91 dias.....	56
Tabela 4.16 Coeficientes de absorção de água e quantidade de massa de água absorvida ao fim de 72 horas..	62
Tabela 5.1 Quadro resumo das famílias de CV	66
Tabela 5.2 Quadro resumo das famílias de CFRSU	67

Índice de figuras

Figura 2.1 Resistência à compressão para vários valores de substituição de CF com AN (Jurič et al., 2006)	13
Figura 2.3 Resistência à flexão das misturas de CVAA em que o AA é composto por NaOH e Na ₂ SiO ₃ (Fernandez-Jimenez et al., 2007)	17
Figura 2.4 Carbonatação medida através do método da fenolftaleína (a) Polímero de CV (CVAA) (b) Argamassa de cimento (Sanjayan et al., 2018).....	22
Figura 2.5 Resistência à compressão ao longo do tempo; (A1) CVAA com solução A e método 1; (B1) CVAA com solução B e método 1; (A2) CVAA com solução A e método 2; (B2) CVAA com solução B e método 2 (Criado et al., 2005)	23
Figura 2.6 Absorção de água e volume de vazios em função da resistência à compressão (Olivia et al., 2008) ..	26
Figura 3.1 Modos de medição da frequência de ressonância (da esquerda para a direita): em flexão, em flexão a 90°, em torção e longitudinal.....	39
Figura 4.1 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CV-AN	50
Figura 4.2 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CV-AR	50
Figura 4.3 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CF-AN	50
Figura 4.4 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CF-AR.....	50
Figura 4.5 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CV AN	54
Figura 4.6 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CV AR.....	54
Figura 4.7 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CF AN.....	54
Figura 4.8 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CF AR	54
Figura 4.9 Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CV	55
Figura 4.10 Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CFRSU	55
Figura 4.11 Retração das famílias com CV	57
Figura 4.12 Retração das famílias com CFRSU	57
Figura 4.13 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AN.....	58
Figura 4.14 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AR	58
Figura 4.15 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AN	59
Figura 4.16 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AR	59
Figura 4.17 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AN	60

Figura 4.18 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AR	60
Figura 4.19 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AN	60
Figura 4.20 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AR.....	60
Figura 4.21 Ensaio de absorção de água por capilaridade com as famílias de CF-AN e CF-AR	62

Anexos

Tabela A.1 Ensaio da balança hidrostática para se calcular a absorção de água aos 10 minutos dos AR	II
Tabela A.2 Valores dos ensaios do estado fresco (espalhamento e massa volúmica) das CV com AN e AR	III
Tabela A.3 Valores dos ensaios do estado fresco (espalhamento e massa volúmica) das CFRSU com AN e AR ...	III
Tabela A.4 Valores medidos para todas as composições para os 7 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes.....	IV
Tabela A.5 Valores medidos para todas as composições para os 28 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes.....	IV
Tabela A.6 Valores medidos para todas as composições para os 91 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes.....	V
Tabela A.7 Valores do módulo de elasticidade de todas as composições ensaiadas aos 7, 28 e 91 dias	VI
Tabela A.8 Variação dimensional das composições estudadas ao longo da campanha experimental.....	VI
Tabela A.9 Valores medidos nos ensaios de resistência à flexão e compressão aos 28 dias do ensaio de carbonatação	VII
Tabela A.10 Valores medidos nos ensaios de resistência à flexão e compressão aos 91 dias do ensaio de carbonatação	VII
Tabela A.11 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 70/24	IX
Tabela A.12 Valores massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 70/48	IX
Tabela A.13 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 90/24	IX
Tabela A.14 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 70/24.....	IX
Tabela A.15 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 70/48.....	X
Tabela A.16 Valores massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 90/24	X
Tabela A.17 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 70/24	X
Tabela A.18 Valores de massa medidos e respetivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 70/48.....	X

Tabela A.19 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 90/24	XI
Tabela A.20 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AR 70/48	XI
Tabela A.21 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AR 90/24	XI
Figura A.1 Curva granulométrica da areia fina, areia grossa, 50%-50% agregados naturais e AR.....	I
Figura A.2 Análise DRX das pastas de CFRSU; NaCl (halite); SiO ₂ (quartzo); Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ Cl (sodalite); Na ₂ CO ₃ .7H ₂ O (carbonato de sódio hidratado); CaCO ₃ (calcite)	V
Figura A.3 Análise de DRX das pastas de CV; NaCl (halite); SiO ₂ (quartzo); Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ Cl (sodalite)	VI
Figura A.4 Análise de DRX dos provetes de CF-AN aos 91 dias com e sem a ação de carbonatação;; SiO ₂ (quartzo); KAlSi ₃ O ₈ (microlina); Na ₂ CO ₃ .7H ₂ O (carbonato de sódio hidratado); NaOCO ₃ (nahcolite); (Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ (albite,calcian)	VIII
Figura A.5 Análise de DRX dos provetes de CF-AR aos 91 dias com e sem a ação de carbonatação; SiO ₂ (quartzo); CaCO ₃ (calcite)	VIII

Lista de acrónimos

<i>AA</i>	Ativador alcalino
<i>AA/l</i>	Relação ativador alcalino / ligante
<i>Al₂O₃</i>	Óxido de alumínio
<i>AN</i>	Agregados naturais
<i>AR</i>	Agregados reciclados
<i>ARF</i>	Agregados reciclados finos
<i>ARG</i>	Agregados reciclados grossos
<i>Ca</i>	Cálcio
<i>CaO</i>	Óxido de cálcio
<i>Ca(OH)₂</i>	Hidróxido de cálcio
<i>CFRSU</i>	Cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos
<i>CFAA</i>	Cinzas de fundo ativadas alcalinamente
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>C-S-H</i>	Silicatos de cálcio hidratados
<i>CV</i>	Cinzas volantes da incineração do carvão
<i>CVAA</i>	Cinzas volantes ativadas alcalinamente
<i>DRX</i>	Difração de raio-X
<i>MAA</i>	Materiais ativados alcalinamente
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio
<i>Na₂SiO₃</i>	Silicato de sódio
<i>RCD</i>	Resíduos de construção e demolição
<i>SiO₂</i>	Óxido de silício

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

A presente dissertação tem como fundamento a necessidade de desenvolver alternativas viáveis aos materiais que são atualmente utilizados na Construção. Deste modo, é relevante incrementar o estudo das mesmas com o fim de determinar a sua aplicabilidade à realidade do meio.

A investigação apresentada consiste na substituição total de cimento por cinzas de fundo provenientes de resíduos sólidos urbano (CFRSU), e cinzas volantes da combustão do carvão (CV), com a incorporação de agregados reciclados finos (ARF) em argamassas. Esta alternativa tem como benefício a diminuição significativa do impacto ambiental da produção de argamassas por comparação com o método corrente.

Atualmente, uma das grandes preocupações do setor da Construção é a sua sustentabilidade, da qual nasce a motivação para o desenvolvimento de novos materiais com valores positivos para o meio ambiente. Desse modo, atuou-se numa das maiores fontes da poluição mundial, o cimento utilizado no fabrico de betão, com um grande potencial de melhoria.

O setor da Construção é responsável por uma enorme quantidade de resíduos gerados em Portugal e no resto da Europa. De facto, é estimado que, em Portugal, haja uma produção anual de resíduos de construção e de demolição (RCD) de 100 milhões de toneladas (Ambiente, 2019).

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelece que é necessária a existência de diversas operações (tais como a prevenção, a reutilização, o transporte, o armazenamento, a triagem, o tratamento, a valorização e a eliminação de parte desses resíduos) que envolvam os RCD de modo a diminuir o seu impacto ambiental (Ambiente, 2019). Aos RCD que são reutilizados como agregados dá-se o nome de agregados reciclados (AR). Deste modo, o recurso aos AR previne a exploração de recursos naturais enquanto, com a utilização das CV e de CFRSU, os custos energéticos e a poluição consequente da produção de cimento são minimizados. As CFRSU são provenientes dos resíduos sólidos urbanos e apresentam diversas aplicações no setor como pavimentos de estradas, na geotecnia e na cerâmica. No entanto, para a dissertação apresentada, o seu valor será destacado como componente ligante do betão. No final desta dissertação, pretende-se determinar a opção com o maior grau de viabilidade entre o conjunto das várias combinações que irão ser estudadas.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação, realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, pretende, como principal finalidade, estudar a influência das condições de cura a que são submetidas as argamassas ativadas alcalinamente nas propriedades das mesmas. O objeto de estudo reflete quatro composições distintas, tendo como ligante CV ou CFRSU, na sua totalidade, e utilização de agregados naturais (AN) ou AR. Em todas as composições, manteve-se a concentração de 28,6% de hidróxido de sódio (NaOH) para o ativador alcalino (AA), que corresponde a 10 moles. Relativamente às condições de cura, para cada uma das famílias de amassaduras, avaliou-se a influência dos seguintes regimes: 70 °C durante 24 horas; 70 °C durante 48 horas; e 90 °C por 24 horas na estufa. Uma vez que o foco na dissertação é a influência da cura térmica, a escolha do

AA baseou-se na sua simplicidade de modo a colocar menos variáveis de estudo no processo de polimerização e, considerando as conclusões de investigações anteriores, sabe-se que a eficácia do AA com sódio (NaOH) é superior à do potássio (KOH). Em relação à molaridade utilizada, optou-se por um tipicamente utilizado pelas das investigações concebidas até ao momento. Para as condições de cura estudadas, é importante avaliar a influência da temperatura, o período de exposição e a combinação de ambos. Assim, definiu-se duas temperaturas com a mesma duração e a mesma temperatura com duas durações distintas; o intervalo de temperaturas utilizadas no mundo da investigação encontra-se entre os 60 °C e 90 °C e, por esse motivo, definiu-se o estudo numa temperatura intermédia (70°C) e na temperatura máxima do intervalo discriminado (90 °C). Após a escolha de temperaturas optou-se por avaliar o tempo de exposição no valor intermédio com 24 e 48 horas em que o segundo valor corresponde ao período máximo analisado ao longo da dissertação.

Estas argamassas poderão ser consideradas microbetões, uma vez que a sua composição é semelhante à de betões, exceto a incorporação de agregados grossos. Apesar disto, todos os ensaios a realizar foram executados considerando as normas europeias para argamassas. Assim sendo, a análise de viabilidade dos dois materiais ligantes foi feita individualmente, com AN, e das mesmas com AR compactuando os efeitos de cada um. Concluída a campanha experimental, procurou-se alcançar uma solução viável para minimizar os impactes ambientais da Construção provenientes da produção de cimento.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

Para cumprir os objetivos propostos no subcapítulo anterior, o trabalho foi dividido nas seguintes fases:

- primeira fase: levantamento do Estado da Arte em que é explicitada toda a informação existente quanto ao uso de ARF bem como de CFRSU e CV. O desenvolvimento deste capítulo é influente no progresso da dissertação e, para tal, a informação selecionada e os estudos analisados têm de ser fidedignos. Por este motivo, as publicações só são utilizadas após uma breve análise de conteúdo. O levantamento do Estado da Arte encontra-se subdividido em quatro subcapítulos nos quais os três primeiros têm o intuito de introduzir termos gerais relativamente aos materiais incorporados na produção das argamassas, ou seja, ARF, CV, e por último, CFRSU. A última parte tem como objetivo selecionar e analisar a informação e os resultados obtidos por diversos autores quanto aos ensaios que irão também ser realizados;
- segunda fase: planeamento relativo à campanha experimental; foi feita uma pesquisa de todas as normas relevantes e a definição dos parâmetros variáveis. Esta fase de investigação foi dividida em subfases, sendo que as mesmas dizem respeito aos agregados que se iria utilizar nas argamassas, às argamassas no estado fresco e, por último, no estado endurecido. Concluída a campanha experimental, organizou-se todos os resultados obtidos ao longo da mesma e fez-se uma análise dos mesmos. Para tal, teve-se em consideração a incorporação dos ARF com as CV e as CFRSU e cada um dos ligantes utilizados nas argamassas;
- terceira fase: discussão dos resultados obtidos e as conclusões a que se chegou sobre cada um dos parâmetros ensaiados, apresentando-se a informação relevante em tabelas esquemáticas de modo a facilitar a sua compreensão.

Com base nas diversas fases descritas, a presente dissertação resume-se a cinco capítulos principais:

- Capítulo 1 - Introdução; são referidos os objetivos do trabalho e o motivo que levou à realização da dissertação; também é descrita a organização do trabalho.
- Capítulo 2 - Estado da arte; reúne a informação anterior relevante sobre os diversos temas que são abrangidos na dissertação; são descritas as investigações realizadas no passado e organizadas as conclusões a que os respetivos autores chegaram, de modo a auxiliar na compreensão dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental;
- Capítulo 3 - Campanha experimental; apresenta a informação a ter em conta ao longo da vertente laboratorial da investigação; descreve-se todos os ensaios e normas a considerar, para cada um dos ensaios a realizar;
- Capítulo 4 - Resultados e discussão; apresenta todos os resultados obtidos em cada um dos ensaios concretizados; estabelece-se comparações com os resultados dos autores enunciados no capítulo 2 e procura-se possíveis justificações para as variações de resultados verificadas entre os mesmos;
- Capítulo 5 - Conclusões; os principais resultados alcançados são destacados neste capítulo e é feita uma caracterização geral da influência de cada um dos materiais em estudo nas argamassas analisadas; também são apresentadas propostas de desenvolvimentos futuros dos temas abordados ao longo deste estudo.

2 Estado da arte

Este capítulo tem por fim apresentar o histórico e os progressos relacionados com o tema abordado da dissertação. Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição dos materiais quanto às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas em foco: CV, CFRSU e AR, com menos ênfase no último, uma vez que se considera existir um conhecimento aprofundado da influência do mesmo. De seguida, procede-se a uma análise detalhada do comportamento elementar dos materiais em cada uma das seguintes características: retração; resistência mecânica; módulo de elasticidade; carbonatação; absorção de água por capilaridade. De realçar que, devido à quase inexistência de estudos que abrangem argamassas com substituição total de cimento por CFRSU, ao longo do capítulo são apresentadas algumas análises / reflexões com o objetivo de fornecer uma melhor compreensão do comportamento conjunto dos materiais constituintes. Em todos os artigos enunciados, onde é referido o uso de CFRSU, são referentes à utilização como adição do cimento, ao contrário das CV em que há a distinção com AA (CVAA) e sem o mesmo.

2.1 Agregados reciclados

As vantagens resultantes da reutilização deste tipo de resíduos são fundamentais para o setor da Construção e para a Sociedade em geral. Além da diminuição do impacto ambiental causado pela deposição dos mesmos em aterros, também permite a diminuição da pegada de CO₂ e do consumo de energia consequente da produção de AN. Assim, além de a reutilização ser uma alternativa mais sustentável à deposição de RCD em aterros, também poderá criar novos mercados (Silva et al., 2016).

Quanto à granulometria dos AR, em termos práticos é possível obter qualquer gradação deste material. No entanto, o processo de britagem pode afetar a forma e a quantidade de finos. A operação de esmagamento pode também deixar um pouco de poeira residual nas superfícies e, portanto, requerer a lavagem do agregado antes da sua utilização (Brito & Evangelista, 2013). Tal como nos AN, os AR podem ser divididos consoante a sua granulometria: agregados reciclados finos (ARF) e grossos (ARG). As principais diferenças entre as duas tipologias devem-se, maioritariamente, ao fato dos ARG apresentarem grande quantidade de pasta de ligante do betão original aderida. Assim, é importante conhecer as características do betão original de onde o agregado foi britado (Shi et al., 2016). Para a dissertação em causa, o estudo será focado nos ARF (< 4 mm).

A densidade das partículas dos AR é, geralmente, inferior à dos AN. A principal razão para tal advém de os primeiros conterem uma pasta cimentícia agregada (Brito e Evangelista, 2013). Silva et al. (2015) baseiam a justificação para a variação desta propriedade em três fatores: o processo de reciclagem; a qualidade do material original e o tamanho dos agregados. O processo de britagem influencia a quantidade de ligante original aderida ao agregado. Assim, nos ARF, a sua menor dimensão traduz uma maior quantidade de pasta ligante original aderida e, como tal, apresentam uma menor densidade. Para o segundo fator, quanto menor for a relação água / cimento do betão original, maior vai ser a densidade dos AR provenientes desse material. Com as mesmas conclusões, Xiao (2018) afirma que há uma redução cerca de 5-10% dos materiais virgens para os AR. Consequentemente, a absorção de água dos AR é superior à dos AN. No caso dos ARF, os valores desta propriedade, geralmente, variam entre 4 e 13% e, nos ARG,

estes valores estão compreendidos entre 2 e 7% (Xiao, 2018). Esta variação deve-se à diferença da quantidade de pasta de cimento que se encontra agregada às partículas.

Brito & Evangelista (2013) aprofundaram a caracterização dos AR e refletiram quanto à forma do próprio agregado, alcançando uma relação entre comprimento e largura de 1.39 nos AR, enquanto para os AN foi de 1.27; a esfericidade foi de 1.21 e 1.04, respectivamente. Estes valores confirmam as condições favoráveis de angularidade dos AN. Dado que os ARF tendem a ser mais rugosos e angulosos do que os AN, a trabalhabilidade de betões que incorporam ARF tende a ser um problema. O formato dos ARF depende principalmente do processo secundário de britagem, que origina partículas menos angulosas e mais arredondadas (Silva et al., 2014).

Em relação à resistência mecânica, com a adição dos AR, existem três zonas de transição: entre o agregado e a pasta de ligante original aderida; entre essa mesma pasta e a nova pasta de ligante; e ainda entre o AN original e a nova pasta de cimento (Silva et al., 2014). Assim, a resistência mecânica da pasta de ligante aderida aos AR é influenciada pela resistência mecânica do betão original e da qualidade dessas zonas de transição. Logo, quanto maior for a qualidade do betão original, maior a resistência dos AR resultantes da trituração do mesmo.

2.2 Cinzas volantes

As CV, até à atualidade, têm vindo a afirmar-se no setor da Construção. Cada vez mais, são consideradas um material adequado para betões ativado alcalinamente devido à sua adequada composição de silício e alumina (Fang et al., 2018). As CV correspondem a um material aluminossilicato, que, por si só, não possui características hidráulicas significativas, mas, com as condições corretas, há a formação de um gel consequente da reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (Xu & Shi, 2018).

A extensão da polimerização entre as CV e o AA depende de diferentes parâmetros. Estes incluem as características químicas e físicas das CV assim como do AA. Em geral, elementos como óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), e óxido de ferro (Fe_2O_3) são os constituintes maioritários nas CV. O SiO_2 encontra-se presente em duas formas microestruturais distintas: cristalina e amorfa. Em estado amorfo, este elemento tem a capacidade de se dissolver pela ação do AA. O Al_2O_3 afeta significativamente a polimerização, assim como o SiO_2 . No estado inicial da polimerização, o Al_2O_3 auxilia o AA na dissolução do SiO_2 resultando um gel de aluminossilicatos. A presença do CaO é considerada como o promotor da resistência mecânica inicial nos materiais ativado alcalinamente (MAA) (Farhan et al., 2019).

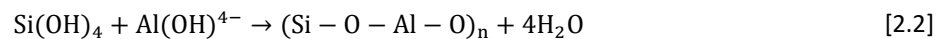
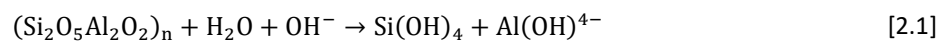
A classificação das CV depende da presença de cálcio (Ca), uma vez que é este elemento que irá determinar o nível das reações pozolânicas e de hidratação com o Ca(OH)_2 . Esta classificação é utilizada quando se recorre a CV para adição de cimento, mas também é aplicável nos polímeros inorgânicos. Quando este elemento se encontra em minoria, requer um maior tempo de desenvolvimento bem como maior temperatura de cura (Antoni et al., 2017).

Morfologicamente, as suas partículas são maioritariamente esféricas, com uma densidade de 2300-2600 kg/m^3 , e as restantes formas irregulares provêm de carvão não incinerado. Este parâmetro é controlado pela temperatura de combustão, a taxa de arrefecimento e a composição das partículas. A distribuição granulométrica depende do método de combustão, a fonte, entre outros, e abrange desde menos de 1 μm até mais de 200 μm (Xu

e Shi, 2018). A sua granulometria é um fator de impacto na polimerização com o AA; quanto maior a finura das partículas, maior a reatividade das CV. Com o aumento da superfície específica das cinzas, a ligação das partículas com o AA é mais eficaz. Assim, obtém-se uma matriz mais densa que irá reduzir a possibilidade de formação de microfendas e que, no fim, apresenta uma capacidade mecânica resistente considerável (Farhan et al., 2019; Mo et al., 2018).

Ao nível mineralógico, é necessário realçar a presença do quartzo (SiO_2) e da mulite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). O quartzo tipicamente não reage durante a hidratação das CV e a mulite forma-se durante a combustão do carvão pela decomposição das argilas. A falta de reatividade implica uma composição e um desenvolvimento de resistência lento e fraco. No entanto, aumenta com a redução do tamanho médio da partícula e com o aumento do tempo de moagem. Assim, é possível controlar esta propriedade através do pH das cinzas, a distribuição granulométrica e a fração de SiO_2 (Xu e Shi, 2018).

Uma vez que as cinzas por si só não são viáveis como ligante, é necessária a adição de um AA para se iniciar o processo de polimerização. A composição química de um MAA é semelhante à de um zeólito, composto, basicamente, por aluminossilicatos hidratados, com a diferença de a sua microestrutura ser amorfa. Da polimerização, que envolve uma reação rápida dos minerais silício e alumínio (Si-Al) sob um meio alcalino, resulta uma cadeia tridimensional com a estrutura Si-O-Al-O (Davidovits, 1994). Este processo recorre à policondensação da Si e do Al em meio alcalino para atingir a sua resistência mecânica semelhante à do cimento Portland (CP), que desenvolve silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). As Equações 2.1 e 2.2 traduzem as reações durante a polimerização.



A segunda equação revela a libertação de água durante a reação química. Esta água, ao ser expelida pela matriz polimérica durante o processo de cura, deixa a mesma sem descontinuidades na sua porosidade. Portanto, a água na mistura não representa um papel ativo na reação química, mas sim a função de providenciar a trabalhabilidade da mistura. O mesmo não se verifica no cimento Portland, em que a água é necessária para ocorrer a hidratação (Rangan, 2008). Características como a concentração e o tipo de AA, a viscosidade do fluido, a fonte dos aluminossilicatos, a granulometria das partículas e a intensidade das forças atrativas podem modificar o comportamento reológico (Boca Santa et al., 2018). A eficiência do AA é influenciada pelo pH, uma vez que a solubilidade do cálcio (Ca) decresce com o aumento do pH enquanto no Si e Al ocorre o oposto. Por conseguinte, apesar de a ativação alcalina com hidróxido de sódio (NaOH) se distinguir pelo seu elevado pH (pH ~13.5–13.8) comparado com solução de Si–NaOH (pH ~13), para a mesma concentração alcalina (2.5% Na_2O), são as segundas que desenvolvem uma resistência mecânica mais eficaz. Este efeito advém da formação adicional de C–A–S–H como produtos de reação (Angulo-Ramírez et al., 2017). Em relação ao AA para o processo de polimerização, os que têm base Na revelam uma ativação eficaz, o que causa um elevado grau de dissolução das CV com uma concentração relativamente pequena, por exemplo 2% do peso de ligante. A dosagem ótima pode até ser superior a 14% do peso de ligante, mas em excesso provoca o efeito adverso. AA em demasia na mistura invoca uma solução alcalina forte e propicia a redução de conectividade entre os iões de silicato, assim como a aceleração da dissolução do gel tornando-a superior à formação do mesmo.

2.3 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

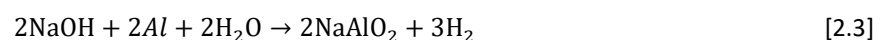
Na Europa, cerca de 20 milhões de toneladas de CFRSU são produzidas anualmente (Nørgaard et al., 2019). As CFRSU têm como base da sua composição vidro, metais ferrosos e não ferrosos, minerais, materiais cerâmicos, matéria orgânica e entre outros. Pode-se dividir a sua distribuição granulométrica da seguinte forma, em valores médios: na fração dos 4-25 mm, 50% do peso corresponde a vidro (> 50% da fração em causa), materiais cerâmicos > 26% e, por último, com uma percentagem inferior, os minerais, > 8% (Chimenos et al., 1999). Grande parte das CFRSU insere-se na gama de 20-50 mm e a sua curva granulométrica delinea uma graduação correta e consistente nas frações de areia e gravilha (Silva et al., 2019).

Em comparação com os AN, as CFRSU são menos densas do que a areia, com um valor típico de 2.65 g/cm³, mas superior às CV, com um valor de 2.15 g/cm³ (Torii e Kawamura, 1991). Para a densidade aparente, com medições de massa por unidade de volume das perdas e a inclusão de vazios, as CFRSU enquadram-se na gama dos 510 - 2000 kg/m³, com um valor médio de 1285 kg/m³ (Dhir et al., 2018). O baixo valor sugere que o material em estudo é poroso, do que advêm implicações em outros parâmetros como a absorção de água e a compactação. Contudo, a porosidade decresce com a moagem das partículas, já que, com a remoção da fração dos metais ferrosos e não-ferrosos, há uma diminuição pouco acentuada.

Morfologicamente, são tidas como um material irregular, forma angular e uma textura áspera com uma microestrutura porosa que advêm das bolhas de gás formadas durante o processo de incineração de aquecimento e arrefecimento. Esta propriedade, aliada à baixa densidade aparente, aumenta a capacidade de absorção de água, com um valor médio de 9.3% (Dhir, et al., 2018), tratando-se de um valor elevado para a maioria das aplicações possíveis por comparação com a areia, que corresponde a 1-3%. Identificou-se esta condição como uma restrição na trabalhabilidade de betões e argamassas.

Os óxidos abundantes são SiO₂ (37.4%), CaO (22.2%), Al₂O₃ (10.2%) e Fe₂O₃ (8.3%). Naturalmente, estas percentagens correspondem a valores intermédios uma vez que a composição das CFRSU depende do material incinerado. As fases minerais principais são o quartzo, carbonato de cálcio, cal e feldspatos (Chimenos et al., 1999).

Um dos aspetos que previne uma utilização generalizada das CFRSU é a presença do alumínio. Este material, em meio alcalino, provoca a formação de bolhas de hidrogénio (Equação 2.3). O período até esta reação estabilizar é indefinido e, se coincidir com o período da presa da argamassa, suscita perdas futuras ao nível do seu comportamento mecânico (Dhir et al., 2018). Porém, o tratamento das CFRSU com água e uma solução de NaOH considerável melhora as propriedades do material ao converter alumínio em aluminatos (Saikia et al., 2015).



A componente orgânica das CFRSU pode, de igual modo, ter implicações no comportamento e resistência mecânica do material, que é influenciada por múltiplos fatores: as condições de incineração, em particular a sua temperatura, a variabilidade do próprio material, e o processo pós incineração.

A ativação alcalina consiste numa reação química em que a Si e a Al são dissolvidas via uma solução alcalina. Tipicamente, as CFRSU contêm uma quantidade substancial de sílica e alumina, assim como fases com cálcio,

que são os principais compostos dos silicatos e dos aluminatos (Saikia et al., 2015). Portanto, as CFRSU são uma fonte adequada para as propriedades dos MAA (Huang et al., 2019). Um dos produtos necessários para a polimerização é a sílica amorfa. Este elemento combinado com o cálcio e a alumina amorfa formam C-S-H e C-A-S-H que determinam a resistência mecânica do material (Huang et al., 2019). No entanto, Rostami & Behfarnia (2017) e Wang et al. (2018) afirmam que, apesar de as CFRSU serem caracterizadas pela presença acentuada de Si, não apresentam a forma ideal para a polimerização. Ao apresentarem-se como majoritariamente cristalinas, durante o processo, não reagem com o AA e podem causar repercussões nas ligações dos produtos da polimerização (Gao et al., 2017; Garcia-Lodeiro et al., 2016; Huang et al., 2019).

Por comparação com as CV, a ativação das CFRSU tem como objetivo alcançar um ligante semelhante (Topçu et al., 2014). No entanto, as CFRSU têm recebido menos atenção do que qualquer outro material pozolânico na produção dos MAA. Chindaprasirt et al. (2009) reportaram que as CV têm um maior desenvolvimento de resistência, devido ao seu elevado grau de polimerização e a própria forma das partículas das CFRSU que, por serem grandes e porosas, apresentam reatividade diminuída. Com o intuito de comprovar o grau da reação das CFRSU, Jaturapitakkul & Cheerarot (2003) analisaram a reação pozolânica com a granulometria adequada. Os autores concluíram que, se as CFRSU forem suficientemente finas, conseguem igualmente alcançar grandes resistências, mas nunca superiores às das CV (Hanjitsuwan et al., 2017).

2.4 Propriedades das argamassas

2.4.1 Retração

2.4.1.1 Agregados reciclados

Braga et al. (2012) avaliaram a incorporação de AR em argamassas de cimento nas quais fizeram uma substituição parcial dos AN por 5, 10 e 15% de AR. Os provetes testados foram idealizados com o intuito de ter o espalhamento comum, 175 ± 10 mm. No fim, observaram um aumento de retração de 44% nos provetes modificados relativamente ao de referência.

Neno et al. (2014) analisaram a influência da percentagem de substituição de AN por AR. As argamassas foram produzidas com quatro teores diferentes: 0 (referência), 20, 50 e 100%. A sua granulometria máxima foi de 4 mm, e a relação água / ligante (a/l) foi adaptada a cada uma das hipóteses: 1.21 (referência), 1.31 (20%), 1.30 (50%) e 1.27 (100%). Os resultados obtidos estão em conformidade com a literatura; o aumento da taxa de substituição levou a um aumento da retração.

Domingo-Cabo et al. (2009) estudaram a influência da adição dos AR nas suas amassaduras. Iniciaram o ensaio de retração um dia após o desmolde e prolongaram o seu estudo até seis meses. Neste intervalo de tempo, as amostras foram expostas a 41-60% HR e a temperaturas de 20-30 °C. No final do estudo, confirmaram que a substituição de AN por AR aumenta a retração do betão, justificada através das características intrínsecas dos AR (elevada porosidade; poder de absorção de água superior).

Em concordância, Gholampour e Ozbakkaloglu (2018) estudaram a influência da introdução de AR em betões de alta resistência. Para minimizar efeitos externos, os agregados foram lavados com o fim de remover as impurezas e, posteriormente, secos durante 24 horas a 105 °C. Após o desmolde, os provetes foram mantidos numa sala

até ao dia do ensaio a 23 ± 2 °C. Concluída a campanha laboratorial, ao longo de 450 dias, os autores verificaram um aumento de 10% entre a amostra de referência e a com AR.

A inclusão de AR, devido às suas propriedades intrínsecas, irá afetar a durabilidade do betão ou da argamassa com o aumento da retração. Por esse motivo, é expectável que, para a mesma família de amassaduras, quando somado o efeito dos AR, a capacidade de restringir a deformação da matriz cimentícia seja menor.

2.4.1.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

Pera et al. (1997), no seu estudo relativo à inclusão das CFRSU como ligante em misturas cimentícias, verificaram que a retração das mesmas pode ser agravada caso não se evite as reações de corrosão do alumínio. Contudo, este efeito pode ser anulado se a adição for submetida a um tratamento de imersão em NaOH durante 15 dias até que o hidrogénio se liberte, com posterior lavagem e secagem. Após este processo, a sua utilização não implicaria consequências negativas na retração devido à exclusão das reações do alumínio durante a hidratação do cimento (Jurič et al., 2006).

Whittaker (2009) refletiram sobre a percentagem de CFRSU adicionada na fração de ligante na argamassa e concluíram que a retração aumenta em simultâneo com o aumento do teor de CFRSU na mistura. Este efeito advém em parte do crescimento da relação água / cimento (a/c) consequente do aumento da percentagem de substituição.

Leitão (2017) recorreu a este material para a sua dissertação de mestrado na produção de betões auto-compactáveis. Na sua campanha experimental, avaliou a substituição da pasta de cimento por 20, 30, 40 e 50% de CFRSU enquanto a amostra de referência tinha uma substituição parcial de 30% por CV. Ao longo do tempo, foi avaliando este parâmetro e obteve os valores apresentados na Tabela 2.1. O autor verificou que o aumento da taxa de substituição de cimento por CFRSU provocou um aumento na extensão da retração. Nos primeiros 28 dias de idade, observou-se uma evolução acelerada desta propriedade e, a partir desta altura, uma progressão gradual. Este valor acentuado deve-se às próprias cinzas não reagirem por completo com o cimento e, desse modo, não produzirem produtos de hidratação suficientes capazes de reduzir a retração.

Tabela 2.1 Variação dimensional de provetes com diferentes taxas de CFRSU (Leitão, 2017)

Mistura	ϵ_{cs3} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs7} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs14} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs28} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs42} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs55} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs77} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{cs91} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
REF [55,38 MPa]	-28	-109	-204	-361	-420	-450	-459	-495
B20 [20,57 MPa]	92	5	-164	-373	-421	-467	-541	-588
B30 [11,23 MPa]	90	-21	-146	-365	-499	-583	-646	-664
B40 [9,10 MPa]	-83	-213	-335	-595	-668	-744	-845	-842
B50 [6,28 MPa]	-63	-155	-352	-707	-798	-862	-954	-935

Com base na literatura, espera-se que as misturas com CFRSU reflitam uma maior expressão na retração, que pode resultar da presença acentuada do alumínio neste material, mas também do seu grau de polimerização. As CFRSU em uso irão apenas ser moídas, de modo a aumentar a sua reatividade, mantendo a presença de metais e outros elementos que implicam na eficiência da reação.

2.4.1.3 Cinzas volantes

No âmbito desta propriedade, as CV são uma aplicação regular no betão devido à expectável diminuição da retração, pela redução de água na amassadura e porosidade mais fina da pasta dificultando a saída da mesma.

Hardjito et al. (2015) testaram 14 amassaduras com diferentes composições num leque variado de ensaios. No entanto, basearam as suas conclusões numa só mistura de CV. O AA foi composto por 8 mol (41 kg/m³) de NaOH e 103 kg/m³ de Na₂SiO₃. Após 24 semanas, verificaram uma variação deste parâmetro entre 66 e 104 x 10⁻⁶ m/m (Hardjito et al., 2015).

Fernandez-Jimenez et al. (2007) testaram quatro composições distintas, metade com ligante de cimento Portland e a outra parte com CV. O AA utilizado nas CV subdividiu-se em duas hipóteses: 8 mol de NaOH (N) e 85% de 12 mol NaOH com 15% de Na₂SiO₃ (W). Assim, conseguiram aferir a relação entre a composição do AA e a retração. Em relação aos OPC, estudaram duas condições de cura: após a mistura, permaneceram no molde durante 20 horas, a 20 °C ou 40°C. Já as cinzas volantes ativadas alcalinamente (CVAA), no mesmo período, foram submetidas a 85 °C e, após desmoldagem, mantidas nas condições ambientes do laboratório, 21 °C e 50% HR. No fim da investigação, os autores justificaram o baixo valor de retração de ambas as famílias de CVAA, < 0.025%, através da estabilidade dimensional do material ensaiado (OPC= 0.09% aos 70 dias). Esta diferença advém das características microestruturais das CVAA na fase inicial da polimerização em que ocorre através da formação da zeolite (pré-zeolite ou promotores de zeolite).

2.4.2 Resistência à compressão

2.4.2.1 Agregados reciclados

Evangelista e de Brito (2007) ensaiaram os seus provetes de betão com substituições de 0 (referência), 10, 20, 30, 50 e 100% de AN por AR e com um espalhamento de 80 ± 10 mm. Os valores da resistência à compressão estão apresentados na Tabela 2.2. A variação da resistência à compressão com o tempo indica que a amostra de referência produzida exclusivamente com AN está grande parte estabilizada após 28 dias de idade. O mesmo comportamento não se observa nas misturas com AR, que continuam em desenvolvimento. Os autores justificam estes resultados através do uso de um cimento com uma maior velocidade de hidratação (CEM I) que viabiliza a estabilidade da amostra de referência. As restantes amostras são compostas por CEM II, que tem uma velocidade de hidratação normal, o que aumenta o seu período de hidratação e, consequentemente, o tempo de desenvolvimento da resistência mecânica.

Tabela 2.2 Resistência à compressão assim como a variação entre as duas idades estudadas para vários incrementos de AR (Evangelista e de Brito, 2007)

Idade	Ref.	C10R	C20R	C30R	C50R	C100R
7 dias	59,4	62,2	58,4	61,3	60,8	61,0
28 dias	59,3	59,0	57,3	57,1	58,8	54,8
Δ entre idades	-0,2	-5,3	-2,0	-6,8	-3,2	-10,2

Omary et al. (2018) optaram por estudar a composição de betão com as classes C25/30 e C35/45 utilizando AR grossos como substituto de AN grossos (0, 33, 54 e 100% em volume). Os AR, antes da produção foram saturados

durante 24 horas com a quantidade de água equivalente à sua absorção mais 1%. Concluída a campanha laboratorial, os autores verificaram um decréscimo da resistência mecânica para todas as classes estudadas.

Nuaklong et al. (2016) analisaram a influência dos AR em misturas com CV ativadas alcalinamente. As amassaduras foram submetidas a uma temperatura de cura de 60 °C durante 2 dias após terem permanecido 1 hora nos moldes. Concluído o período de cura, os provetes foram desmoldados e mantidos numa sala com condições controladas de 23 °C e 50% HR ao longo de 7 dias. O parâmetro de enfoque no estudo foi o AA (NaOH) e a sua otimização, mantendo constante a presença de 162 kg/m³ de Na₂SiO₃. Na Tabela 2.3, estão as composições das misturas avaliadas.

Tabela 2.3 Resistência mecânica à compressão de CVAA (Nuaklong et al., 2016)

NaOH [mol]	Resistência à compressão [MPa] - normalizada [%]	
	CVAA- AN	CVAA- AR
8	40,0 - 100	30,6 - 76
12	41,4 - 100	38,4 - 93
16	38,4 - 100	34,8 - 91

Os polímeros com resistências compreendidas entre 30.6 e 38.4 MPa podem ser utilizados como constituinte de betão estrutural. Os resultados mostram que a concentração ideal de 12 moles do AA produz um polímero com boa capacidade mecânica. Visto que a formação do gel depende da concentração alcalina do íão OH⁻, um baixo valor resulta numa fraca reação química e conseqüente resistência deficiente. O incremento das condições alcalinas no meio promove o desenvolvimento da resistência mecânica do material. Contudo, em excesso resulta precipitação de aluminossilicatos numa fase inicial e, assim, observa-se o comportamento contrário.

Shi et al. (2012) estudaram misturas com CVAA e com a substituição de AN por AR em 0, 50 e 100%. Também os compararam a betões convencionais na sua pasta, mas com iguais parcelas de AR. Em todas as amassaduras, a relação a/l foi de 0,50. Após a sua mistura, os betões com AR permaneceram dentro do molde durante 24 horas nas condições ambiente do laboratório e só depois foram desmoldados e imersos em água a uma temperatura de 23 ± 2 °C. As CVAA foram seladas no molde por um plástico de modo a prevenir a evaporação da água durante o processo de cura de 80 °C durante 24 horas e só depois removidas do molde e expostas à temperatura ambiente. A Tabela 2.4 exhibe os resultados obtidos no final da campanha experimental dos autores. Como visto no subcapítulo 2.1, a inclusão dos AR diminuiu a resistência mecânica dos betões. As CVAA apresentam um comportamento significativamente melhor do que os betões convencionais. No entanto, ao avaliar apenas os polímeros inorgânicos, é notável que a presença dos AR provocou um maior decréscimo na resistência à compressão, do que nos betões convencionais.

Tabela 2.4 Resistência à compressão (MPa) ao longo do tempo para betões e CVAA com diferentes incrementos de AR (Shi et al., 2012)

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

É expectável que as argamassas que incorporam ARF tenham piores desempenhos do que as argamassas apenas com AN. Este fato deve-se às próprias características dos AR quanto à sua porosidade e durabilidade que, em ambos os aspetos, produzem maus resultados por comparação com os AN finos. O maior grau de porosidade dos

agregados traduz-se numa perda de desempenho e, por conseguinte, uma matriz menos densa (de Brito & Evangelista, 2013).

2.4.2.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

Jurič et al. (2006) dividiram a sua investigação em duas fases. Inicialmente, estudaram a influência da inserção de CFRSU nas argamassas e, após a escolha de um valor otimizado, substituíram a totalidade de AN por AR. Nas suas misturas, equacionaram uma relação a/l de 0.55 e todas as substituições foram feitas por peso. Em ambas as fases, os provetes permaneceram durante 24 horas no molde e, após a descofragem, com uma temperatura de 22 ± 2 °C. Através da Figura 2.1, torna-se visível o decréscimo da resistência à compressão, para a mesma idade ensaiada, com o aumento percentual das CFRSU. Isto pode indicar que as CFRSU desenvolvem a sua resistência mecânica num estado mais lento de hidratação por comparação com o cimento. Uma possível razão para isto é a temperatura de produção da CFRSU ser demasiado baixa para a formação da alite, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, que é essencial para a componente resistente nas reações de hidratação iniciais.

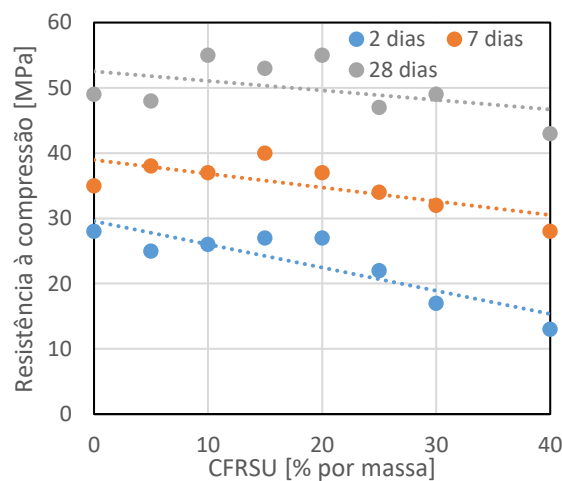


Figura 2.1 Resistência à compressão para vários valores de substituição de CF com AN (Jurič et al., 2006)

Finalizada a primeira fase, os autores prosseguiram o seu estudo para avaliação da interação das CFRSU na argamassa (0 e 15%) com os AR em vez de AN. Os resultados obtidos estão na Tabela 2.5. Em ambas as idades, para o mesmo rácio de AR, a existência de CFRSU melhorou a resistência à compressão em alguns casos. Possivelmente, como as CFRSU são caracterizadas pela sua elevada porosidade, em conjunto com AR, houve uma redução da relação a/l, traduzindo-se numa argamassa mais densa, logo, mais resistente.

Tabela 2.5 Resistência à compressão com incrementos de CFRSU e AR nas amassaduras (Jurič et al., 2006)

AR [%]	Resistência à compressão [MPa]			
	7 dias		28 dias	
	0% CFRSU	15% CFRSU	0% CFRSU	15% CFRSU
0	31,6	34,7	40,6	43,4
9.1	32,2	35,2	40,8	42,2
16.7	37,6	35,8	46,9	44,0
23.1	37,1	34,8	46,4	41,6

Cheng (2012), que utilizou CFRSU como substituto parcial de cimento (0, 10, 20 e 30%), concluiu que há uma proporcionalidade indireta entre a resistência à compressão e a taxa de substituição. O autor justificou este efeito através da fraca ligação na zona de transição agregado / pasta proporcionada pela adição.

Zajac et al. (2014) referem uma redução da resistência à compressão devida à presença do calcário (CaCO_3) constituinte do fíler, em particular a calcite. Este elemento pode provocar a diluição do cimento durante o seu processo de hidratação, facilitando a nucleação e crescimento dos produtos de hidratação do cimento. Como as CFRSU contêm calcite, este comportamento poderá ter ocorrido.

Amat et al. (2017) avaliaram quatro amassaduras de betão incluindo na sua composição os seguintes valores de CFRSU: 0 (referência), 10, 20 e 30%. Tal como nos estudos anteriores, a conclusão está de acordo com a literatura e foi observado o mesmo efeito com a substituição do cimento por CFRSU. Justificaram este resultado não apenas pelo efeito adverso da substituição do cimento, mas também pelo aumento da relação a/c da mistura, causando uma maior porosidade.

López et al. (2017), ao investigarem o comportamento da tipologia de CFRSU como parte do ligante, independente da fração substituída, concluíram que a extração das partículas leves e da matéria orgânica da combustão melhora significativamente a resistência mecânica. A amassadura com CFRSU sem qualquer processamento demonstrou uma diferença de 65% relativamente à amostra de referência.

Conclui-se que, na campanha experimental, é provável ocorrer uma descida abrupta na resistência à compressão das misturas de CFRSU em comparação com as de cimento.

2.4.2.3 Cinzas volantes

Ryu et al. (2013) analisaram a influência da molaridade do AA, composto por NaOH, na mistura dos polímeros com base em CV. As três famílias de amassaduras, com 6, 9 e 12 moles de NaOH, foram expostas a 60 °C durante 24 horas, permanecendo em condições de temperatura ambiente, ~20 °C, até à data do ensaio. Todas têm em comum um espalhamento de 183 ± 5 mm. Realizou-se o ensaio aos 1, 3, 14, 28 e 91 dias. Após 14 dias, a mistura com 12 moles tinha já desenvolvido 42,9 MPa mantendo um crescimento pouco acentuado até alcançar aos 28 dias 44,8 MPa e 47,5 MPa aos 91 dias. Após 28 dias, a amassadura com 9 moles mostrou uma resistência idêntica e, no fim da campanha experimental, 47,3 MPa. Como conclusão da investigação, observou-se uma boa correlação entre o aumento da molaridade do AA e resistência à compressão.

Nath e Sarker (2017) avaliaram amostras aos 28 e 90 dias, com ligante de CV e AA composto por 14 moles NaOH e silicato de sódio, Na_2SiO_3 , com uma razão de 2.5. Os moldes foram colocados numa sala com temperatura a variar de 18 a 23 °C, e humidade relativa de $70 \pm 10\%$. Após o desmolde, as amostras permaneceram no mesmo ambiente até ao ensaio. No fim da investigação, observaram um aumento do valor resistente de 25,6 MPa para 33,4 MPa de 28 dias para 91 dias de ensaio. As CV utilizadas, com baixo valor de cálcio, expostas a temperaturas ambiente, têm um desenvolvimento de resistência lento em comparação com as misturas curadas a altas temperaturas. A resistência mecânica demonstra uma proporcionalidade directa com o aumento da concentração do AA, da temperatura e período de cura.

Fernandez-Jimenez et al. (2007) investigaram o impacte de dois tipos de AA, em que o ligante dos polímeros inorgânicos é CV: composto por NaOH, 8 moles; e o segundo com a presença de 15% de Na_2SiO_3 para 85% de 12.5 moles de NaOH. O primeiro, com uma razão AA/CV de 0.4, e o outro de 0.55. Após 20 horas expostos a 85 °C, os provetes foram mantidos em condições de temperatura e humidade ambiente. Os cubos de 15 x 15 x 15

cm foram ensaiados aos 1, 3, 7 e 28 dias e, após 24 horas, alcançaram uma resistência à compressão na ordem dos 45 MPa, superior ao expectável no betão convencional. A presença da sílica provocou uma melhoria na resistência mecânica, mas limitou a sua trabalhabilidade com uma pasta mais densa.

Atiş et al. (2015) analisaram a influência das condições de cura, tanto o período como a temperatura, e do AA. Todas as misturas foram concebidas com um rácio de areia/CV de 3 e a/l de 1/3. O AA teve incrementos de 2% do peso do ligante no intervalo de 4 a 20%, enquanto a temperatura foi espaçada de 10 °C entre 45 e 115°C com variações de 24, 48 ou 72 horas. As Tabela 2.6, Tabela 2.7 e **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresentam-se os valores obtidos da campanha experimental. As Tabela 2.6 e Tabela 2.7 revelam que, quando o período de cura aumenta de 24 para 48 horas, a resistência também aumenta. Já quando o aumento ocorre entre 48 e 72 horas, não se verifica um desenvolvimento tão acentuado. O processo de polimerização das CV à temperatura ambiente é caracterizado pela sua lentidão. Nas três tabelas, as três primeiras colunas da última linha destacam-se pelos seus valores nulos. Este efeito pode ser explicado através da evaporação imediata da água da amassadura sem ainda antes ter ocorrido a dissolução da Si em meio alcalino.

Tabela 2.6 Resistência à compressão das amassaduras após 24 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)

Na [%]	4	6	8	10	12	14	16	18	20
45 °C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 °C	1,6	5,5	7,3	8,4	8,6	3,0	3,0	1,2	0
65 °C	3,6	10,6	17,8	22,6	22,8	10,6	6,5	6,5	4,5
75 °C	10,5	13,3	21,3	28,7	29,7	34,3	32,7	18,7	10,7
85 °C	13,2	14,1	23,3	34,9	36,5	38,8	35,8	34,5	30,3
95 °C	17,3	27,7	28,4	32,0	42,6	70,6	61,5	51,0	43,6
105 °C	12,6	15,4	17,6	41,0	56,2	113,0	112,2	110,7	104,3
115 °C	0	0	0	61,4	73,0	120,0	110,5	106,1	88,9

Tabela 2.7 Resistência à compressão das amassaduras após 48 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)

Na [%]	4	6	8	10	12	14	16	18	20
45 °C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 °C	6	13,2	19	19,7	19,8	8,4	5,2	2,4	2,3
65 °C	9,5	21,8	28	45	48,3	36,3	34,5	29,8	17,2
75 °C	18,1	24,3	35,5	62,7	62,9	63,9	59,1	54	50,3
85 °C	20,5	25,2	40	55,6	62,2	71,6	62,7	58,4	56,1
95 °C	21,4	27,9	45,6	59,5	72,7	99,1	84,6	82,5	74,2
105 °C	14,4	16,9	25,2	46,2	72,5	107,5	100,5	100,3	99,9
115 °C	0	0	0	59,2	69,1	117,4	109,6	100,3	88,6

Tabela 2.8 Resistência à compressão das amassaduras após 72 horas de cura [MPa] (Atiş et al., 2015)

Na [%]	4	6	8	10	12	14	16	18	20
45 °C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 °C	7,8	20,2	28,9	38,4	39,5	10,5	8,6	7,7	5
65 °C	14,7	22	36,1	55,1	57,0	59,2	47,4	46,7	35,1
75 °C	20,1	26,4	38,1	68,1	68,7	60,1	53,2	52,1	46,8
85 °C	20,6	27,1	41,6	68,8	69,8	69,9	60,4	56,1	54
95 °C	21,7	28,3	47,1	70,8	71,1	80,8	80,8	78,5	73,5
105 °C	15,3	17,5	29,7	58,3	69,5	90,4	88,2	84,6	83,6
115 °C	0	0	0	56,7	68,7	108,4	106,7	100	85,6

Elyamany et al. (2018) também avaliaram a relação entre a temperatura de cura e a respetiva resistência à compressão. O seu estudo foi baseado em teses anteriores que realçam as boas propriedades do polímero com base de CV ao nível da resistência e durabilidade devido às grandes quantidades de Si e Al, promotores do gel da

mistura, bem como uma estrutura mais densa devido ao aumento da temperatura. Os autores avaliaram misturas com molaridades de 12, 14 e 16 moles e expostos a três temperaturas, 30, 60 e 90 °C. Em todas as amassaduras, o rácio de Na₂SiO₃/NaOH é de 2 e areia/ligante de 3, já adição de água variou entre 3 e 6% do peso de ligante de modo a manter a trabalhabilidade. As amassaduras, que correspondiam a 60 e 90 °C, apresentaram um aumento de 158% e 216%, respetivamente, por comparação com a temperatura mais baixa. Esta tendência afirma a eficácia do processo de polimerização consoante o aumento de temperatura uma vez que viabiliza a dissolução dos aluminossilicatos.

Com base na literatura, é expectável que as misturas de CVAA na campanha experimental desenvolvam um crescimento da sua resistência mecânica mais evidente para uma maior duração de exposição à fonte de calor. Para o mesmo período, são esperados melhores resultados na família de amassaduras exposta à maior temperatura.

2.4.3 Resistência à flexão

2.4.3.1 Agregados reciclados

Nuaklong et al. (2016) fizeram o ensaio de resistência à flexão em CVAA com AR e do qual se obteve a Tabela 2.9. Os autores compararam, para três concentrações de NaOH (8, 12 e 16 moles), a utilização de AN e AR e a sua influência nos polímeros. A cura das amostras resumiu-se da seguinte forma: 2 dias a 60 °C e, depois de desmoldar, numa sala de condições controladas com 23 °C e 55% HR.

Tabela 2.9 Resistência à flexão de CVAA com AN e AR para diferentes concentrações de AA (Nuaklong et al., 2016)

Concentração de NaOH [moles]	Resistência à flexão [MPa] - normalizada [%]	
	CVAA- AN	CVAA- AR
8	4,2-100	4,0-95
12	5,1-100	5,3-104
16	4,3-100	4,6-107

Como referido, as propriedades intrínsecas dos AR impõem-se nas composições de um modo significativo. A sua baixa densidade e elevada porosidade promovem uma matriz com um maior volume de vazios. A introdução dos AR causa uma diminuição na relação a/l, o que dificulta as reações de hidratação. Adicionalmente, com as condicionantes de cura, os AR, ao receber energia térmica, irão retrair, o que pode provocar uma falha entre os agregados e a nova pasta ligante. Dependendo do ligante e da reatividade das partículas, os AR, ao expelirem a água que têm no seu interior, podem incentivar o desenvolvimento resistente do material.

2.4.3.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

Jurič et al. (2006) substituíram parte do cimento com CFRSU com as seguintes taxas: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 40%, em peso. Os provetes foram mantidos nos moldes durante 24 horas e, de seguida, submetidos a um ambiente húmido a 22 ± 2 °C. Uma vez mais, os autores confirmaram a conclusão dos anteriores ao identificarem o mesmo comportamento do que na resistência à compressão. O incremento das CFRSU na pasta ligante com base cimentícia traduziu-se num decréscimo na sua resistência.

É expectável, com base no único estudo encontrado, observar um aumento na resistência à flexão entre as idades ensaiadas, mesmo que pouco acentuado. Em relação às condições de cura, uma vez que têm um papel fulcral no processo de polimerização, a sua participação irá delinear o comportamento resistente do material.

2.4.3.3 Cinzas volantes

Fernandez-Jimenez et al. (2007), para a resistência à compressão, avaliaram a influência dos dois AA possíveis (8 moles de NaOH ou 85% de 12.5 moles de NaOH e 15% de Na_2SiO_3) e, para a flexão, apenas o AA composto por NaOH e Na_2SiO_3 foi ensaiado. As composições das amassaduras têm por base as seguintes razões: areia/l de 2 e AA/l de 0,47 para solução de NaOH e 0,64 para a solução composta pelos dois elementos. Todos os provetes foram sujeitos a 85 °C durante 20 horas com 98% de HR. Após a cura, foram mantidos num laboratório a, aproximadamente, 21 °C e 50% de HR. O ensaio foi realizado após 20 horas, 7, 28 e 90 dias (Figura 2.2). Os autores observaram o mesmo comportamento descrito para a resistência à compressão; um crescimento gradual ao longo do tempo. Embora o AA seja composto por dois componentes, o mesmo comportamento é expectável com 8 moles de NaOH.

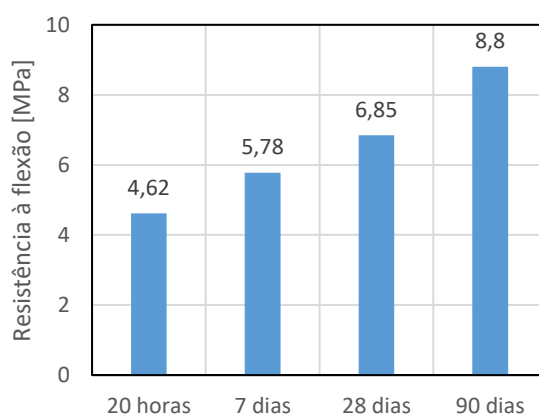


Figura 2.2 Resistência à flexão das misturas de CVAAs em que o AA é composto por NaOH e Na_2SiO_3 (Fernandez-Jimenez et al., 2007)

Nath e Sarker (2017) usaram o AA composto com um rácio de NaOH/ Na_2SiO_3 de 2.5 e 14 moles de NaOH. Todas as misturas são compostas por 40%, em massa, de AA. Entre 28 dias e 90 dias, os autores observaram um aumento de, aproximadamente, 20%, em que o valor final alcançou 5.91 MPa. Ao comparar estes dois estudos iniciais, apesar de se verificar a mesma tendência crescente ao longo do ciclo de vida, existe uma discrepância entre os valores finais. Esta diferença pode ser justificada com as condições de cura praticadas, uma vez que, neste último, os provetes ensaiados foram mantidos em condições ambiente, entre 18 e 23 °C e 70 ± 10% de HR.

Atiş et al. (2015) analisaram a resistência à flexão a misturas com as mesmas variantes analisadas na secção 2.4.2.3 (incrementos de 2% do Na em relação ao peso do ligante (CV); diferença de 10 °C entre 45 e 115°C; durante 24, 48 e 72 horas). As conclusões foram idênticas às da resistência à compressão. Para a mesma concentração de Na num dado período, com o aumento da temperatura, verificou-se um aumento gradual idêntico, mas apenas até um certo valor. Por outras palavras, não se verificou uma relação linear entre a temperatura e a resistência à flexão. O mesmo efeito ocorreu ao fixar uma dada temperatura e percorrer os vários incrementos de Na. Ao ultrapassar a concentração ideal, o decréscimo é justificado através da coagulação da Si, ao invés da sua dissolução.

Por último, Elyamany et al. (2018), ao focarem a resistência à flexão aos 7 dias dos polímeros com ligante variável,

confirmaram o comportamento descrito até agora em relação à temperatura de cura. Os moldes foram desmoldados após 24 horas e cada um dos provetes foi exposto à temperatura em estudo, 30, 60 ou 90 °C, durante 48 horas e mantidos a uma temperatura ambiente (20-23 °C) até ao dia de ensaio. Verificou-se um acréscimo de 57.1 e 71.4% para 60 e 90 °C, respetivamente, por comparação com a amostra dos 30 °C.

Assim, com base na literatura referida, espera-se que o comportamento da resistência à flexão seja semelhante ao da compressão. Para a mesma temperatura, o incremento do período de cura é indicativo de maior grau de polimerização e, conseqüentemente, aumento de resistência. Adicionalmente, para o mesmo tempo de exposição, quanto maior a temperatura, mais resistente é a microestrutura.

2.4.4 Ultrassons

2.4.4.1 Agregados reciclados

A velocidade de propagação de ultrassons é tanto maior quanto maior a densidade da matriz, ou seja, avalia, de modo indireto, a porosidade da amostra. Na secção 2.1, focou-se as principais características morfológicas dos AR e enfatizou-se a diferente densidade entre AN e AR. A introdução de AR nas diferentes amassaduras irá torná-las mais porosas, como potenciado pela incorporação de finos devido à maior quantidade de pasta ligante aderida em comparação com os congêneres grossos.

Na campanha experimental de Khatib (2005), as misturas de betão foram produzidas com 0 (referência), 25, 50, 75 e 100% de AR finos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.10. À medida que a taxa de substituição de AN por AR aumentou, a velocidade de ultrassons diminuiu. Contudo, o autor refere que esta diminuição de valores pode ser amenizada com o aumento do tempo de cura.

Tabela 2.10 Velocidade de ultrassons com diferentes rácios de substituição de AN por AR (Khatib ,2005)

Mistura	Nomenclatura	Velocidade de ultrassons [km/s]			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
M1	Referência	4,192	4,772	4,888	4,923
M2	CC25	3,741	4,324	4,670	4,699
M3	CC50	3,704	4,293	4,614	4,675
M4	CC75	3,554	4,270	4,585	4,612
M5	CC100	3,653	3,998	4,449	4,550

Apesar de a literatura nomeada não referir a ativação alcalina, é expectável um comportamento idêntico ao da resistência à compressão: uma diminuição com a incorporação de AR com um decréscimo de diferença gradual com a idade de cura.

2.4.4.2 Cinzas volantes

Farhan et al. (2019) estudaram a influência do ligante (CV e escória) na matriz de um polímero inorgânico. As composições das misturas tiveram por base o valor de resistência à compressão de um betão convencional, com 35 MPa, e de um betão de alta resistência, com 65 MPa. Em relação ao AA, as concentrações do NaOH foram distintas consoante a necessidade resistente a que se está a responder: 12 e 14 mol/l, para o betão normal e de alta resistência, respetivamente. A razão de Na₂SiO₃/NaOH, de 2, foi equivalente em ambas as condições. Os

moldes foram mantidos no laboratório em condições ambiente, 23 ± 3 °C, durante 24 horas, e, posteriormente, colocados a 80 °C durante mais 24 horas antes de os desmoldar e recolocar nas condições iniciais até à data do ensaio. A Tabela 2.11 apresenta as duas composições em pormenor.

Tabela 2.11 Composições das misturas com dois tipos de betão (Farhan et al., 2019)

Composição	Betão normal	Betão de alta resistência
CV [kg/m ³]	410	480
AA/ligante	0,45	0,35
Agregados finos [kg/m ³]	627	606
Agregados grossos [kg/m ³]	1164	1140
Na ₂ SiO ₃ /NaOH	2	2
Na ₂ SiO ₃ [kg/m ³]	123	112
NaOH [kg/m ³]	61,5	56
Água [kg/m ³]	45	35
Superplastificante [kg/m ³]	22,5	17,5

O ensaio da velocidade de ultrassons equaciona a resistência e a qualidade da amostra avaliada. Tal advém, principalmente, da dependência deste parâmetro relativamente à densidade. Verificou-se um aumento de quase 2% da velocidade entre 7 e 28 dias, de 3.14 para 3.20 km/s, respetivamente. A Tabela 2.12 apresenta os valores da resistência à compressão e das respetivas velocidades. É possível corroborar a ligação entre os dois parâmetros uma vez que ambos dependem da densidade da matriz. Quanto maior for a compacidade do provete, melhor a qualidade do mesmo, o que corresponde, por conseguinte, a melhores resultados quando sujeitos a ambos os ensaios.

Tabela 2.12 Relação entre os valores de resistência à compressão e velocidade de ultrassons para as mesmas misturas de CVAA (Farhan et al., 2019)

Mistura	Resistência à compressão [MPa]		Velocidade dos ultrassons [km/s]	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
CVAA-35	33,90	35,91	3,14	3,20
CVAA-65	61,71	65,28	3,82	3,93

2.4.5 Módulo de elasticidade

2.4.5.1 Agregados reciclados

Este parâmetro depende, em grande parte, da resistência à compressão e, conseqüentemente, é afetado negativamente pelo acréscimo de AR e pela composição do betão original. O módulo de elasticidade, normalmente, decresce com o incremento de AR, em que o grau depende das características inerentes dos AR, isto é, a tipologia, o tamanho e a qualidade do material original (Silva et al., 2016). O decréscimo do módulo de elasticidade é atribuído à porosidade intrínseca assim como à conectividade entre poros (Omary et al., 2018).

Gholampour e Ozbakkaloglu (2018) avaliaram a importância da origem dos AR ao substituir os AN por derivados de betões com 20, 40 e 110 MPa, aos 28 dias. Produziram duas tipologias de betões: resistência normal, com a substituição de 50% de AR; e de alta resistência, com 100% de AR. Para cada uma das composições, avaliou-se o impacto da origem dos agregados provenientes de betões com resistências distintas. Ao adicionar os AR, como a argamassa aderida aos agregados é porosa e tem uma menor rigidez, o betão resultante caracteriza-se de igual modo e, por isso, tem um módulo de elasticidade mais baixo. Mas, no fim da campanha experimental, os autores confirmaram que a utilização de AR provenientes de betões com alta resistência resultou num aumento do módulo de elasticidade. Os valores obtidos estão na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 Módulo de elasticidade para as duas misturas avaliadas, a de referência e com AR (BN: betão normal; BAR: betão de alta resistência) (Gholampour e Ozbakkaloglu, 2018)

Misturas/Dias	28 dias	56 dias	90 dias	180 dias
BN - REF	30,0	30,1	31,6	32,5
BN - 40	26,7	27,3	27,6	28,1
BN - 110	29,1	29,7	31,3	32,8
BAR - REF	41,3	42,1	42,8	43,0
BAR - 40	31,9	33,5	34,7	35,3
BAR - 110	41,5	42,3	42,9	43,7

Evangelista e de Brito (2007) testaram três composições de betão e, ao variar a percentagem de substituição de AN por AR, confirmaram o mesmo decréscimo. Os autores sugeriram que esta diminuição do módulo de elasticidade se torna pouco significativa com o incremento de 30% AR, ao contrário do que se verifica com 100% AR. A Tabela 2.14 apresenta os resultados dos autores.

Tabela 2.14 Módulo de elasticidade com diferentes taxas de substituição de NA por AR (Evangelista e de Brito, 2007)

	E_c [GPa]	Δ [%]
RC	35,5	-
C30R	34,2	-3,7
C100R	28,9	-18,5

2.4.5.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

Leitão (2017) investigou a influência de CFRSU, como substituto parcial de cimento, na produção de betão auto-compactável nas seguintes percentagens em peso de ligante: 0, 20, 30, 40 e 50%. As CFRSU passaram por um peneiro com abertura de malha de 1 mm para remover os resíduos de maior dimensão. Todos os provetes foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio. A Tabela 2.15 sintetiza os valores obtidos. Tal como na resistência à compressão, houve um decréscimo do módulo de elasticidade com o aumento das CFRSU. Para além da libertação de hidrogénio, que ocorreu por corrosão do alumínio presente nas CFRSU, o autor justificou este resultado inesperado com a dificuldade que teve em calibrar a curva de tensão / extensão para o patamar de ensaio.

Tabela 2.15 Módulo de elasticidade das várias amostras de betão com o respetivo incremento de CF (Leitão, 2017)

Mistura	$E_{cm,28d}$ [GPa]	Δ REF [%]	$E_{cm,91d}$ [GPa]	Δ REF [%]
REF	45,42	0,00	41,56	0,00
B 20	23,71	-47,49	19,43	-53,26
B 30	23,78	-47,64	19,51	-53,07
B 40	24,19	-46,74	19,90	-52,12
B 50	12,95	-71,49	9,07	-78,19

Bertolini et al. (2004) verificaram que o betão apresentava uma elevada expansão ainda nos moldes, comportamento que os autores atribuem à libertação de hidrogénio que ocorre por corrosão dos metais presentes na adição quando sujeitos a um ambiente alcalino. Este aumento de volume traduz-se numa pasta enfraquecida devido ao seu grau de porosidade e, por conseguinte, um valor de módulo de elasticidade inferior ao que é aceitável.

2.4.5.3 Cinzas volantes

Farhan et al. (2019) analisaram misturas de CVAA com valores de resistência à compressão à volta de 35 MPa, para um betão normal, e 65 MPa, para um betão de alta resistência. O AA foi composto sempre com uma razão de

Na₂SiO₃/NaOH de 2, variando a concentração do NaOH, de 12 e 14 mol/L em concordância à resistência pretendida. Aos 28 dias, aferiram uma diferença de 7.65% entre as CVAA e a mistura de referência à base de cimento.

Nath e Sarker (2017) investigaram várias composições submetidas a condições de temperatura ambiente, 18-23 °C, com 70 ± 10% de HR. O AA foi produzido com 14 moles de NaOH e uma relação de Na₂SiO₃/NaOH de 2.5. Relacionaram os valores obtidos de resistência à compressão com o módulo de elasticidade. Para valores semelhantes de resistência à compressão aos 28 dias, o módulo de elasticidade das CVAA foi inferior em 25-30% ao da mistura de referência com OPC.

Fernandez-Jimenez et al. (2007) determinaram o módulo de elasticidade em função do AA adicionado ao ligante, CV. Os provetes foram submetidos nas primeiras 20 horas a 85 °C e 98% de HR e, de seguida, em condições do laboratório até à data do ensaio, 21 °C e 50% de HR. Foram analisadas três amostras de cada uma das misturas (Tabela 2.16). Com base nos valores descritos, o uso de um AA composto por NaOH e Na₂SiO₃ resulta num melhor desempenho mecânico do que quando se utiliza um AA com NaOH apenas, uma vez que a polimerização é favorecida pela existência de mais sílica, Si.

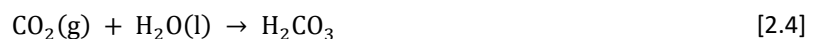
Tabela 2.16 Módulo de elasticidade das três amostras para cada um dos AA utilizados (Fernandez-Jimenez et al., 2007)

Amostras/ σ [N/mm ²]	Solução N (8M NaOH)	Solução W (85% de 12.5M de NaOH e 15% de Na ₂ SiO ₃)
1	32	43,5
2	29	-
3	34	39,5

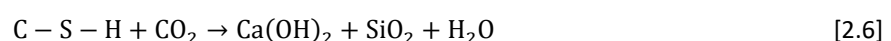
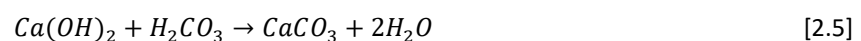
2.4.6 Carbonatação

2.4.6.1 Agregados reciclados

A carbonatação é um dos principais agentes prejudiciais na durabilidade de um betão estrutural e pelo qual é essencial o conhecimento dos ARF quanto a este parâmetro. A literatura demonstra que, de uma forma geral, a profundidade da carbonatação aumenta consoante o acréscimo da substituição dos AN por AR (Kenai, 2018; Bravo, et al., 2015; Shi, et al., 2012). A equação 2.4 apresenta a reação da carbonatação em misturas cimentícias.



Da reação do CO₂ com os compostos da pasta ligante resulta a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃). Há assim a constituição de uma camada que passa a ter uma alcalinidade significativamente menor do que aquela que não é afetada por esse fenómeno. De modo a compreender melhor este efeito, são apresentadas as reações que o expressam (Erro! A origem da referência não foi encontrada. Equações 2.5 e 2.6 Erro! A origem da referência não foi encontrada.).



Zhu et al. (2019), com o intuito de investigar a fiabilidade dos ARF no betão estrutural, avaliaram incorporações de 10, 20, 30 e 40% nas suas misturas. Apesar de terem utilizado duas qualidades de AR (obtidos em gerações diferentes) para cada rácio, o resultado foi idêntico em ambos por comparação com o de referência. Da adição de AR, resulta uma pasta porosa e de baixa densidade o que facilita a penetração do CO₂. Além disso, a presença

da pasta antiga aderida ao agregado tem na sua composição elementos como o Ca(OH)_2 que corresponde a um dos reagentes utilizados na reação de carbonatação.

2.4.6.2 Cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos

Leitão (2017), ao avaliar a carbonatação de misturas de betões auto-compactáveis com a adição de CFRSU no cimento, averiguou que o coeficiente de carbonatação aumenta com a incorporação do material. Para a amassadura com 50% de CFRSU, os provetes ficaram praticamente todos carbonatados. Quanto às restantes amassaduras, os valores são similares e, ao fim de 21 dias, atingem cerca 70% do seu valor final. Esta difusão excessiva resultou do aumento da relação a/l com a adição das CFRSU o que provocou o aumento da porosidade da mistura facilitando a propagação do CO_2 .

2.4.6.3 Cinzas volantes

Sanjayan et al. (2018) investigaram a carbonatação das CVAA, tendo argamassas de cimento como referência. O AA utilizado era composto por Na_2SiO_3 e NaOH (8 M). De modo a manter o espalhamento semelhante em todas as misturas, foi necessária a utilização de um superplastificante para melhorar a sua trabalhabilidade. As amostras foram submetidas a uma temperatura de 60 °C nas 24 horas iniciais. Posterior a estas condições de cura iniciais, procedeu-se ao desmolde dos provetes. Assim, foram colocados em condições de temperatura ambiente, 23 °C, durante 28 dias. Em seguida, foram colocados na câmara de carbonatação por mais 28 dias, sujeitos a uma temperatura de 23 °C, com 65% de HR e 1% de CO_2 . A Figura 2.3 apresenta dois provetes submetidos ao método da fenolftaleína. O método da fenolftaleína reflete, através de um tom rosa, qual a área que não se encontra carbonatada. A Figura 2.3 não suscita dúvidas quanto ao excelente comportamento do OPC face à carbonatação, em comparação com a mistura de CVAA.

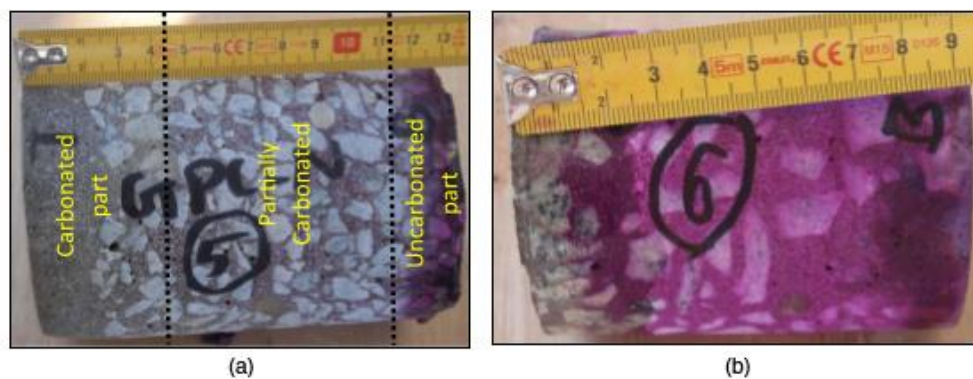


Figura 2.3 Carbonatação medida através do método da fenolftaleína (a) Polímero de CV (CVAA) (b) Argamassa de cimento (Sanjayan et al., 2018)

Criado et al. (2005) focaram-se na influência das condições de cura nas reações que ocorrem durante o processo de carbonatação. Para tal, utilizou-se dois AA: a solução A, apenas com NaOH (7.81% Na_2O ; 92.19% H_2O ; $\text{pH} = 13.93$); solução B, com adição de Si (8.29% NaOH ; 1.22% SiO_2 ; 90.49% H_2O ; $\text{pH} = 13.83$). Independente do AA, a razão entre AA/CV foi de 0,4. Os provetes foram sujeitos a 85 °C durante 5, 12, 20 horas e 7 dias. De modo a avaliar mais uma condicionante do comportamento mecânico e a evolução mineralógica, estudaram dois sistemas alternativos: manter os moldes num local restrito às condições exteriores e que em simultâneo contenha

uma certa quantidade de água, sem esta entrar em contacto com os moldes (método 1); colocar os moldes diretamente no forno junto de uma cápsula com água (método 2). Numa análise por difração de raios-X (DRX), os resultados indicam a presença de quartzo, mulite e magnetite, que correspondem a fases cristalinas. Outros sinais detetam estruturas de zeólito como hidroxisodalite, $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{12}$, e herschelite, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\cdot\text{H}_2\text{O}$ ou bicarbonatos alcalinos. A intensidade dos sinais de bicarbonatos acentua-se com o período das condições de cura, para a mesma temperatura. Ao observar os resultados da DRX, uma conclusão a realçar é a relação entre o bicarbonato de sódio e a herschelite. Quando se verifica a formação do bicarbonato de sódio, o outro composto não é um produto da reação e vice-versa. Na síntese da estrutura da zeolite, ocorrem dois estados mediante o ataque alcalino sob o material aluminossilicato: (A) o primeiro estado de nucleação advém da dissolução inicial dos aluminossilicatos em meio alcalino, favorecendo a formação dos precursores da zeolite; (B) quando vários núcleos alcançam o tamanho crítico e iniciam o processo de cristalização. Quando o propósito da ativação alcalina das CV é obter um material cimentício, as condições requeridas não exigem apenas alta alcalinidade mas também um meio que permaneça ao longo das reações em progressão. Durante os estados iniciais, quando o material está em contacto com a atmosfera, a carbonatação ocorre de forma rápida. Mas, com a evolução do material, a matriz torna-se mais compacta e dificulta a entrada do CO_2 ; portanto, o grau da neutralização diminui substancialmente. Como resultado da formação do bicarbonato de sódio, o pH diminui e, conseqüentemente, também a eficácia da ativação alcalina. Por conseguinte, há uma redução substancial na formação do gel alcalino de aluminossilicatos. Quando o AA é exclusivamente NaOH, apesar da existência de valores de resistência mecânica satisfatórios, a estrutura dos produtos é menos polimerizada. Este comportamento pode ser justificado com a presença acentuada de OH^- mantendo o sistema em ativação contínua. Na Figura 2.4, apresenta-se os valores obtidos de resistência mecânica para cada uma das idades. As condições de cura desempenham um importante papel na ativação alcalina das CV. Se as condições não são adequadas, o processo de carbonatação é favorecido. Neste caso, a fase inicial desta reação envolve a redução do pH e, portanto, o grau de desenvolvimento mecânico e de ativação alcalina é retardado. A reação primordial da carbonatação pode ser controlada através do regime de cura com uma HR elevada.

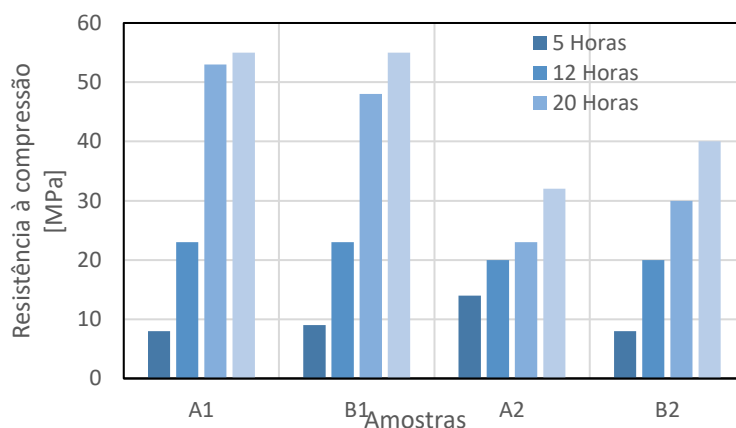


Figura 2.4 Resistência à compressão ao longo do tempo; (A1) CVAA com solução A e método 1; (B1) CVAA com solução B e método 1; (A2) CVAA com solução A e método 2; (B2) CVAA com solução B e método 2 (Criado et al., 2005)

2.4.7 Absorção de água por capilaridade

2.4.7.1 Agregados reciclados

Tanto a capacidade de absorção de água como a permeabilidade são medições importantes para controlar a durabilidade do material a estudar. A penetrabilidade de um líquido numa mistura consiste na permeabilidade através dos poros, por difusão e absorção. No entanto, a tendência de absorção por parte da amassadura não depende apenas da porosidade mas também do diâmetro dos poros, assim como da sua distribuição, continuidade e forma.

Segundo Silva et al. (2016), a capacidade de absorção de um material é um importante indicador da capacidade de poros não saturados em absorver e drenar água através da sua capilaridade. O ensaio da absorção de água por capilaridade é relevante em termos da durabilidade da mistura, uma vez que corresponde a uma medição indireta da porosidade da mesma (Kurda et al., 2019).

Xiao (2018) diferencia a tendência dos AR finos e grossos e afirma que a mistura mais suscetível à absorção de água por capilaridade é composta apenas por agregados finos. Quanto à utilização de AR, Pedro et al. (2017) constataram um aumento de 40.6-46.9%, 59.4-71.9% e 134.4-153.1% para substituições parciais de 25, 50 e 100% de AN, respetivamente.

Para misturas ativadas alcalinamente com AN e AR, a absorção de água variou 5.3-6.5% e 9.6-11.2%, respetivamente, enquanto o volume de vazios associado apresenta valores de 14.5-17.5% e 22.1-25.3%, respetivamente (Nuaklong et al., 2016). Avaliando a concentração do AA, o uso de 12 moles de NaOH reduziu a absorção de água e o volume de vazios ao comparar com as outras possibilidades de AA. O autor justifica os resultados com base na densidade e no grau de porosidade da matriz. Como esperado, as CVAA com a inclusão de AR apresentam um pior comportamento.

Kurda et al. (2019) conjugaram a ação das CV e dos AR em misturas de betão. As misturas tinham 0, 30 e 60% de CV como substituto parcial do cimento e diferentes percentagens de ARG (0 e 100%) e ARF (0, 50, 100%). Todas as composições tinham uma dosagem de ligante de 350 kg/m³ e 1% (da massa de ligante) de superplastificante. A capilaridade decresceu ao substituir a pasta de cimento por CV. Numa fase inicial, isto pode ter estado associado à pouca quantidade de água requerida para obter o espalhamento desejado. Naturalmente, em combinação com a fina granulometria das CV, que funcionaram como fíler, isto traduziu-se numa matriz mais densa e menos porosa.

2.4.7.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

Leitão (2017) submeteu os seus provetes ao ensaio de absorção de água, do qual resultaram os valores da Tabela 2.17. Como esperado, houve uma redução da absorção de água com o aumento da idade do betão para cada uma das composições. O autor observou que é nas primeiras 6 horas, independentemente da adição (em peso) de CFRSU no ligante, que se verifica um declive abrupto na absorção ao alcançar aproximadamente 50% do valor ao fim de 72 horas.

Apesar de não haver referência de cinzas de fundo ativadas alcalinamente (CFAA), é possível retirar conclusões por parte das características das CFRSU como ligante. Através do estudo enunciado, é possível avaliar não só a elevada porosidade das partículas das CFRSU, mas também o seu lento desenvolvimento de resistência. Independente da

substituição parcial do ligante, a absorção de 28 para 91 dias decresce para a mesma hora: revela que os polímeros com CFRSU como ligante só alcançam uma matriz de melhor qualidade num período significativo.

Tabela 2.17 Coeficiente de absorção de água tendo em conta os vários incrementos de CF no ligante de cimento (Leitão, 2017)

Mistura	Idade [Dias]	Abs _{m,3h} [kg/m ²]	Abs _{m,6h} [kg/m ²]	Abs _{m,24h} [kg/m ²]	Abs _{m,72h} [kg/m ²]
REF	28	1,43	1,83	2,57	2,96
	91	0,93	1,04	1,34	1,72
B 20	28	1,48	1,87	2,75	3,45
	91	0,80	0,94	1,34	1,85
B 30	28	1,83	2,40	3,79	4,89
	91	0,97	1,15	1,68	2,34
B 40	28	1,67	2,23	3,73	5,26
	91	0,93	1,02	1,51	2,00
B 50	28	1,84	2,45	3,96	5,21
	91	1,07	1,21	1,70	2,34

2.4.7.3 Cinzas volantes

Olivia et al. (2008), no seu estudo, basearam-se numa das misturas (GP1) da investigação de Hardjito (2005), mas, para todas as suas composições, as relações entre os diversos elementos tendem a corresponder a uma amostra de OPC de 35 MPa de resistência à compressão. Um elemento comum a todas as amassaduras corresponde ao uso de um superplastificante. Tal proporcionou um espalhamento superior a 200 mm. Na Tabela 2.18, estão as composições das diversas misturas. Todas as misturas foram expostas a 60 °C durante 24 horas. Após as condições de cura iniciais, permaneceram num ambiente controlado com uma temperatura de 23-25 °C. Entre as diversas composições, os autores subdividiram e aferiram a relevância das relações a/l, agregados/l, a composição dos agregados grossos e a resistência mecânica à compressão. Primeiro, analisaram as misturas GP4, GP2, GP1 e GP3 que têm uma relação a/l decrescente (0,25, 0,23, 0,22, 0,20, respetivamente). Daí concluíram a diminuição de absorção de água bem como o volume de vazios com o decréscimo da relação a/l. Quanto à razão de agregados/l, fundaram as suas conclusões nas misturas GP5 (agregados/l 3.5), GP1 (agregados/l 3.9) e GP6 (agregados/l 4.7). A mistura GP5 teve uma resistência à compressão superior à de GP1 apesar de o seu coeficiente de absorção de água e volume de vazios serem superiores. Através dos resultados obtidos, os autores afirmaram que as amassaduras com menor quantidade de agregados originam provetes mais porosos. Quanto à granulometria dos agregados, uma melhor distribuição reduziu o tamanho e a continuidade dos poros. Os valores da resistência à compressão aos 28 dias estão apresentados na Figura 2.5. Em suma, o decréscimo da relação a/l conduz a uma pequena redução na absorção de água e no volume de vazios. Adicionalmente, a durabilidade do material demonstrou uma maior correlação com o rácio a/l do que com a resistência à compressão.

Tabela 2.18 Composições dos polímeros analisados para as quatro relações estudadas: a/l, agregados/l, a composição dos agregados grossos e a resistência mecânica à compressão (Olivia et al., 2008)

Mistura	a/l	Agr./l	Quantidade [kg/m ³]							
			Água	Agregado grosso			Areia	CV	NaOH (14M)	Na ₂ SiO ₃
				7 mm	10mm	20mm				
GP1	0,23	3,9	25,8	647	554	-	647	408	41	103
GP2	0,22	3,9	20,7	647	554	-	647	408	41	103
GP3	0,20	3,9	16,5	647	554	-	647	408	41	103
GP4	0,25	3,9	36,2	647	554	-	647	408	41	103
GP5	0,22	3,5	25,8	630	540	-	630	444	44	111
GP6	0,24	4,7	25,8	672	576	-	356	356	36	89
GP7	0,23	3,9	25,8	645	570	277	408	408	41	103

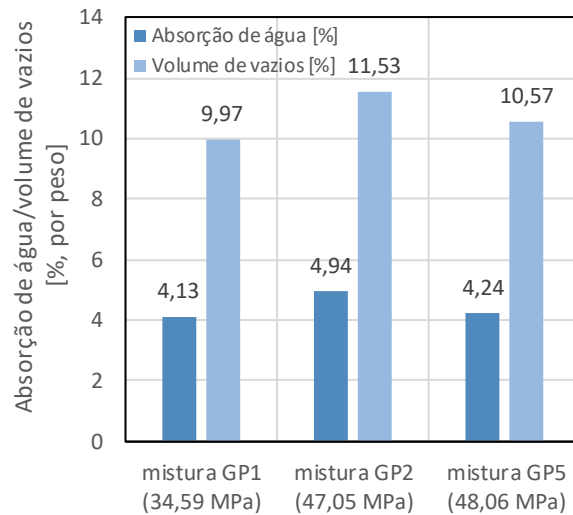


Figura 2.5 Absorção de água e volume de vazios em função da resistência à compressão (Olivia et al., 2008)

Assim, da incorporação de AR em ambos os MAA com CV ou CF irá resultar uma matriz mais porosa. Comparando as relações de AA/l, enquanto nas CV é de 0.5, para as CF é de 0.65, e com base na literatura, uma menor relação a/l traduz-se numa mistura mais densa. Por último, um aspeto que não foi descrito neste subcapítulo, a influência das condições de cura. Uma matriz torna-se menos porosa quanto maior o período de exposição, para a mesma temperatura, e quanto maior a temperatura exposta, para o mesmo tempo, com base em 2.4.2.3.

3 Campanha experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo, são definidas as diferentes fases do plano experimental, são referidas as características dos diferentes constituintes das argamassas e também é feita a descrição da composição e o método de produção das mesmas. Também é referido o modo como os provetes foram moldados e curados e quais os ensaios realizados para caracterização dos agregados e das argamassas, quer no estado fresco quer no endurecido. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil), do Técnico de Lisboa.

3.2 Plano experimental

A campanha experimental foi dividida em três fases. A primeira consistiu na identificação das principais características dos constituintes das argamassas. A segunda e terceira fases consistiram na realização de ensaios às argamassas, no estado fresco e endurecido, respetivamente. Toda a informação referente às diferentes fases da presente investigação, aos ensaios realizados e às normas consideradas em cada ensaio é apresentada nas Tabela 3.1, Tabela 3.2 e

Tabela 3.1 Ensaios realizados na 1ª fase experimental

Ensaio	Material	Norma considerada
Análise granulométrica	Areia natural e ARF	EN 1015-1 (1998)
Massa volúmica e massa volúmica aparente	Areia natural	EN 1097-6 (2000) e EN 1097-3 (2002)
	ARF	Rodrigues et al. (2013) e EN 1097-3 (2002)
Absorção de água	Areia natural	EN 1097-6 (2000)
	ARF	Rodrigues et al. (2013)

Tabela 3.2 Ensaios realizados na 2ª fase experimental

Ensaio	Material	Norma considerada
Consistência	Argamassas no estado fresco	EN 1015-3 (1999)
Massa volúmica	Argamassas no estado fresco	EN 1015-6 (1999)

Tabela 3.3 Ensaios realizados na 3ª fase experimental

Ensaio	Material	Idades (dias)	Nº de provetes	Norma considerada	Cura
Módulo de elasticidade	Argamassas no estado endurecido	7	3	E 187601 (2010)	70 °C durante 24 horas; 70 °C durante 48 horas; 90 °C durante 24 horas
		28	3		
		91	3		
Resistência à flexão e à compressão		7	3	EN 1015-11 (1999)	
		28	3		
		91	3		
Velocidade de ultrassons		7	3	EN 12504-4	
		28	3		
		91	3		
Retração	-	2	LNEC E 398 (1993)		
Absorção de água por capilaridade	28	3	LNEC E 393 (1993)		
Carbonatação	28	3	E 391 (1993)		
	91	3			

3.2.1 Constituintes das argamassas

3.2.1.1 Cinzas volantes

As CV utilizadas para a produção são provenientes da incineração do carvão e foram fornecidas pela empresa Secil.

3.2.1.2 Cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos

As CFRSU da presente dissertação foram cedidas pela empresa Valorsul que tem como fim o tratamento e valorização dos resíduos sólidos urbanos da zona de Lisboa.

3.2.1.3 Agregados (naturais e reciclados)

Os agregados naturais foram cedidos pelo Grupo Soarvamil, enquanto os agregados reciclados são provenientes de uma dissertação anterior realizada no Laboratório de Construção no IST.

3.2.1.4 Ativador alcalino

O AA é composto por soda cáustica da *Ercros*, com 99% de pureza, e água por meio da rede pública (a água de compensação para as misturas com AR tem a mesma fonte). Para o AA, as percentagens mássicas da NaOH e da água foram de 28,6% e 71,4%, respetivamente. A quantidade adicionada à mistura é em função da trabalhabilidade pretendida para a argamassa (ajustada recorrendo ao ensaio de consistência, no estado fresco), tendo sempre uma relação AA/l efetiva de 0,50 para as CV e de 0,65 para CFRSU. No caso das CFRSU, ao manter a relação AA/l de 0,5, a mistura não se enquadrava no intervalo de trabalhabilidade exigido, mesmo com o auxílio do superplastificante.

3.2.2 Composição das argamassas

Ao longo da campanha experimental, foram produzidas e ensaiadas diversas argamassas, em que na sua composição varia o tipo de ligante utilizado, CV ou CFRSU, e a percentagem de incorporação de ARF. Para além destas argamassas, foi também produzida uma argamassa de referência, apenas constituída por areia natural, água e cimento (identificada como REF). Todas as argamassas produzidas têm um traço volumétrico 1:3 (ligante / areia) e a sua composição baseou-se no método proposto por Nepomuceno (2005). A relação AA / ligante corresponde a 0,50 para as CV e 0,65 para as CFRSU. Antes de se dar início à campanha experimental da presente dissertação, foram realizadas diversas iterações de modo a que fosse possível obter resultados razoáveis de um ponto de vista de trabalhabilidade e compactação. A substituição de areia natural por ARF foi feita de forma integral. Em relação ao ligante, a sua substituição também foi sempre total. Assim sendo, a identificação de cada família de argamassa produzida é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Identificação de todas as argamassas produzidas

Identificação das argamassas	Tipo de ligante	Tipo de agregados	Cura
<i>CV-AN 70/24</i>	Cinzas volantes	Agregados naturais	70 °C durante 24 h
<i>CV-AN 70/48</i>			70 °C durante 48 h
<i>CV-AN 90/24</i>			90 °C durante 24 h
<i>CV-AR 70/24</i>			70 °C durante 24 h
<i>CV-AR 70/48</i>			70 °C durante 48 h
<i>CV-AR 90/24</i>			90 °C durante 24 h
<i>CF-AN 70/24</i>	Cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos	Agregados naturais	70 °C durante 24 h
<i>CF-AN 70/48</i>			70 °C durante 48 h
<i>CF-AN 90/24</i>			90 °C durante 24 h
<i>CF-AR 70/24</i>			70 °C durante 24 h
<i>CF-AR 70/48</i>			70 °C durante 48 h
<i>CF-AR 90/24</i>			90 °C durante 24 h

3.2.3 Produção de argamassas

As argamassas foram produzidas segundo a norma europeia EN 1015-2 (1998). No entanto, para promover uma mistura coesa, os tempos de amassadura foram ligeiramente diferentes aos referidos na norma. O procedimento adotado variou consoante o tipo de ligante e de agregados. Para as CV-NA, adotou-se o seguinte procedimento:

- introduziu-se, no recipiente da misturadora, os constituintes sólidos, o AA e os agregados;
- colocou-se o recipiente na misturadora e ligou-se o programa manual do equipamento;
- após 5 minutos com movimento intermédio, desligou-se a misturadora e retirou-se o material aderente às paredes do recipiente;
- o repouso da argamassa durou menos de 60 segundos;
- após esse tempo, iniciou-se novamente o movimento intermédio durante 5 minutos.

Quanto às CV-AR, a metodologia distingue-se no passo inicial uma vez que, em primeiro lugar, introduz-se os AR com a água de compensação durante 5 minutos de modo a fomentar a absorção dessa mesma água. Também para as amassaduras de CF-AR, esta ação foi respeitada.

Por último, nas argamassas de CF-AN:

- misturou-se previamente o ativador alcalino e o superplastificante;
- introduziu-se, no recipiente da misturadora, os constituintes sólidos, o AA + superplastificante e os agregados;
- colocou-se o recipiente na misturadora e ligou-se o programa manual do equipamento;
- após 5 minutos com movimento intermédio, desligou-se a misturadora e retirou-se o material aderente às paredes do recipiente;
- o repouso da argamassa durou menos de 60 segundos;
- após esse tempo, iniciou-se novamente o movimento intermédio durante 10 minutos.

3.2.4 Preparação dos provetes e condições de cura

A preparação de provetes prismáticos, de acordo com a EN 1015-11 (1999), adotou o seguinte procedimento:

- em primeiro lugar, limpou-se e lubrificou-se os moldes com óleo mineral;
- colocou-se a argamassa no molde (cada molde é composto por três provetes de 160 x 40 x 40 mm) numa camada até, aproximadamente, metade da altura dos provetes e compactada 60 vezes na mesa de compactação;
- colocou-se outra camada até ao topo do molde e compactou-se com o mesmo procedimento;
- após a compactação, alisou-se a superfície de modo a retirar a argamassa em excesso;
- por último, forrou-se a superfície à vista do molde com película aderente para isolar o contato com o meio exterior;
- nas primeiras 24 horas, os provetes foram submetidos a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$;
- após estas 24 horas, consoante as suas condições de cura, os provetes foram colocados na estufa;
- os provetes foram descofrados concluído o período de cura da respetiva família e mantidas na câmara seca (20°C e 55% HR) até à data do ensaio.

Para o ensaio de carbonatação, as suas condições de cura foram adaptadas de acordo com a norma e, ao fim de 28 dias na câmara seca, colocaram-se os provetes na câmara de carbonatação onde ficaram expostos a uma temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$, a uma humidade relativa entre 55 e 65% a uma concentração de CO_2 de $5,0 \pm 0,1\%$.

3.3 Ensaaios aos agregados

3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica permite determinar a dimensão das partículas sólidas de um material e a frequência com que ocorrem num dado intervalo de tamanho de partículas. A realização deste ensaio ajuda a compreender o comportamento e a influência da areia na estrutura porosa da argamassa. Foi realizada a análise granulométrica da areia natural (tanto da areia fina - 0/1 - como da areia grossa - 0/4) e dos ARF, e o método adaptado na execução da mesma seguiu a norma europeia EN 1015-1 (1998).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- estufa;
- balança com precisão até 0,1 g;
- peneiros de malha quadrada (a Tabela 3.5 apresenta as aberturas dos peneiros utilizados);
- máquina de vibração horizontal.

Tabela 3.5 Abertura dos peneiros (segundo a norma EN 1015-1, 1998)

Abertura dos peneiros [mm]
8
4
2
1
0,5
0,25
0.125
0,063

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi:

- secou-se a amostra (cerca de 2 kg) numa estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 48 horas;
- encaixou-se os peneiros uns nos outros, de modo a que o peneiro de cima tivesse sempre malha com abertura superior ao que se encontrava imediatamente abaixo;
- introduziu-se a amostra no peneiro de malha superior e colocou-se o conjunto de peneiros em vibração horizontal, numa máquina apropriada para esse fim;
- passado aproximadamente um minuto, desligou-se a vibração e pesou-se a massa de agregados retida em cada peneiro.

Resultados:

A percentagem de material retido em cada peneiro é dada pela Equação 3.1

$$\% \text{ retida} = \frac{m_{\text{peneiro}}}{m_{\text{total}}} \times 100\% \quad [3.1]$$

sendo,

- % retida - percentagem de material retido em cada peneiro (%);
- m_{peneiro} - massa obtida em cada peneiro (kg);
- m_{total} - massa total da amostra (kg).

Determinada a percentagem de material retido em cada peneiro e as percentagens acumuladas, traçou-se a curva granulométrica dos agregados naturais e reciclados. Uma vez que na presente investigação apenas se utilizou agregados finos, a sua granulometria é inferior a 4 mm.

3.3.2 Massa volúmica e massa volúmica aparente

Tanto a massa volúmica dos agregados como a sua massa volúmica aparente (baridade) são importantes na constituição das argamassas. Enquanto a primeira influencia a massa volúmica da própria argamassa, a baridade, além de influenciar o desempenho mecânico dos materiais, permite converter traços volumétricos para traços em massa e, desta forma, determinar as quantidades necessárias (em peso) de agregados naturais e reciclados nas argamassas. Relativamente aos ARF, este ensaio foi realizado segundo Rodrigues et al. (2013) e permitiu determinar as duas propriedades em estudo. Foi considerado este estudo, ao invés da norma EN 1097-6 (2000), uma vez que apresenta, segundo Rodrigues et al. (2013), vantagens como, por exemplo, a reduzida aglomeração de material fino, que facilita a libertação de bolhas de ar durante o teste (devido ao uso de hexametáfosfato de sódio, ou comercialmente conhecido como *Calgon*). Relativamente aos AN, o ensaio foi realizado segundo a norma EN 1097-6 (2000).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- picnómetro;
- hexametáfosfato de sódio em pó;
- água destilada;
- estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- filtro de papel;
- peneiro de malha quadrada com abertura 0,063 mm;
- balança com precisão até 0,1 g;
- secador de ar quente.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi:

- preparou-se e pesou-se, pelo menos, 1,5 kg do material, tendo sido retiradas as partículas com granulometria superior a 4 mm e inferior a 0,063 mm;
- imergiu-se, durante 24 horas, o material numa solução de hexametáfosfato de sódio com concentração de 1 g/l;

- decantou-se grande parte da solução e secou-se a amostra com recurso a ar quente;
- quando seca, colocou-se, pelo menos, 1 kg da amostra num tabuleiro e registou-se a massa (M1);
- colocou-se o material novamente no picnómetro, preenchido com a solução de hexametáfosfato de sódio até ao topo;
- colocou-se o picnómetro em água morna (22 °C) durante 24 horas, garantindo-se a libertação das bolhas de ar do material;
- secou-se o exterior do picnómetro e registou-se a sua massa (M2);
- registadas as massas do peneiro com abertura 0,063 mm e do filtro de papel, colocou-se o segundo no fundo do primeiro, ao longo de toda a sua extensão;
- removeu-se todo o material do interior do picnómetro para o interior do peneiro de modo a que o filtro conseguisse recolher todas as partículas sólidas da amostra;
- colocou-se o peneiro na estufa a 110 ± 5 °C;
- encheu-se o picnómetro com a solução e, após a sua secagem exterior, registou-se a massa (M3);
- garantida a massa constante do peneiro com a amostra no seu interior, registou-se essa massa; a esta pesagem foi deduzida a massa do peneiro e do filtro de papel, dando origem a M4.

O procedimento adotado para os AN é igual ao descrito excetuando a utilização de hexametáfosfato de sódio.

Resultados

A massa volúmica aparente, a massa volúmica das partículas secas em estufa e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca são determinadas (em kg/dm³) recorrendo às Equações 3.2, 3.3 e 3.4, respetivamente.

$$\rho_a = \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)/\rho_w} \quad [3.2]$$

$$\rho_{rd} = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)/\rho_w} \quad [3.3]$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)/\rho_w} \quad [3.4]$$

ρ_w é a densidade da solução de hexametáfosfato de sódio (em kg/dm³), assumindo-se que apresenta, aproximadamente, o mesmo valor do que a densidade da água a 20 °C.

Relativamente à baridade dos agregados (reciclados e naturais), foi usada a norma europeia NP EN 1097-3 (2002).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- recipiente metálico de volume conhecido;
- estufa ventilada a 110 ± 5 °C;
- balança com precisão até 0,1 g.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi:

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

Resultados:

A baridade do agregado ensaiado foi determinada através da Equação 3.5.

$$\rho_b = \frac{MB - MA}{V} \times 100 \quad [3.5]$$

sendo:

- V - volume do recipiente metálico (dm³);
- MA - massa do recipiente metálico vazio (kg);
- MB - massa do recipiente cheio com agregados (kg).

Foram ensaiadas três amostras por cada tipo de agregado. O valor da baridade desse material é a média dos resultados das três amostras

3.3.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água, nomeadamente em agregados reciclados, é importante na medida em que permite determinar a quantidade de água absorvida durante a amassadura e, desta forma, compensar essa absorção de modo a garantir as características que se pretendem para a argamassa.

Relativamente aos ARF, tal como referido no subcapítulo 3.3.2, também se considerou-se o estudo realizado por Rodrigues et al. (2013), uma vez que o mesmo permite obter resultados ao longo de toda a duração do ensaio (24 horas) e não apenas o resultado absoluto após as 24 horas. Esta diferença de procedimento é importante, pois permite determinar a quantidade de água absorvida nos primeiros instantes do ensaio, quantidade essa que terá de ser compensada de modo a manter a relação a/l efetiva que se deseja. Relativamente aos AN, considerou-se a norma europeia EN 1097-6 (2000).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- picnómetro;
- hexametáfosfato de sódio em pó;
- água destilada;
- forno a 110 ± 5 °C;
- filtro de papel;

- peneiros de malha quadrada com abertura 0,063 e 0,044 mm;
- peneiro de fundo;
- cronómetro;
- balança hidrostática;
- secador de ar quente.

Procedimento:

Parte do procedimento é o descrito no subcapítulo 3.3.2. O restante procedimento do ensaio foi:

- preparou-se, pelo menos, 1 kg de amostra do material segundo a norma EN 932-1 e colocou-se no forno a secar;
- após secagem, retirou-se a amostra do forno e registou-se a sua massa (M_{seca});
- colocou-se a amostra no peneiro de fundo, misturando com a solução de hexametáfosfato de sódio (com concentração de 1 g/L) e iniciou-se a contagem do tempo no cronómetro;
- após colocar o peneiro de abertura 0,044 mm como tampa, pousou-se o conjunto na balança hidrostática, no interior do tanque; registou-se a massa após o valor estar estabilizado (M_0);
- registou-se a variação da massa do conjunto ao longo de 24 horas, sendo que se regista o valor a cada 2 minutos nos primeiros 10 minutos, a cada 5 minutos nos 20 minutos seguintes, a cada 10 minutos nos 30 minutos seguintes, a cada 15 minutos na hora seguinte, a cada hora nas 9 horas seguintes e o valor da massa final após 24 horas do instante inicial (M_{24}); o conjunto dos peneiros deve ser agitado regularmente para permitir a libertação de bolhas de ar;
- retirou-se o conjunto do tanque, removeu-se todos os agregados do interior dos peneiros, colocou-se estes últimos no interior do tanque e registou-se a sua massa (M_{eq}).

O ensaio de absorção de água de AN segue o mesmo procedimento adotado para o ensaio da massa volúmica destes mesmos agregados, referido no subcapítulo 3.3.2.

Resultados:

A massa da amostra nas leituras inicial e final do ensaio foi determinada através das Equações 3.6 e 3.7, respetivamente.

$$M_{inicial} = M_0 - M_{eq} \quad [3.6]$$

$$M_{final} = M_{24} - M_{eq} \quad [3.7]$$

Relativamente à absorção de água, enquanto o resultado absoluto é determinado após a execução do procedimento referido no subcapítulo 3.3.3, recorrendo à Equação 3.8, o valor de absorção do material entre o instante inicial e o instante final do procedimento referido neste subcapítulo é determinado pela Equação 3.9. De realçar que, relativamente aos AN, apenas se considerou a Equação 3.8.

$$A_{24h} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad [3.8]$$

$$A_{eq} = \frac{M_{final} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \quad [3.9]$$

Dado que o registo inicial da massa do conjunto dos peneiros apenas foi realizado ao fim de 2 ou 3 minutos de ensaio (tempo despendido para colocar o conjunto no tanque e o valor da sua massa estabilizar), o valor da absorção inicial da amostra pode ser determinado através da Equação 3.10. Além disto, se se pretender determinar o valor da absorção de água em qualquer instante, terá de se recorrer à Equação 3.11.

$$A_{inicial} = A_{24} - A_{eq} \quad [3.10]$$

$$A_t = \frac{M_t - M_{inicial}}{M_{inicial}} \quad [3.11]$$

3.4 Ensaio de argamassas no estado fresco

Quando as argamassas estão no estado fresco, é importante realizar diversos ensaios de modo a controlar, por exemplo, a sua trabalhabilidade ou a sua massa volúmica.

3.4.1 Consistência

Nesta investigação, um dos critérios importantes na formulação das argamassas é a manutenção da relação AA / ligante efetiva. Desta forma, determinou-se a consistência das argamassas segundo a norma europeia EN 1015-3 (1999). Estipulou-se, também, que a trabalhabilidade das argamassas deveria ser 170 ± 30 mm.

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- mesa de espalhamento;
- molde cónico truncado;
- colher de pedreiro;
- pilão;
- craveira;
- pano húmido e seco.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- antes do ensaio, limpou-se com um pano a superfície do disco e as bordas do molde;
- centrou-se o molde no disco da mesa de espalhamento e colocou-se a argamassa em duas camadas, cada uma compactada por 10 pancadas com o pilão;
- retirou-se a argamassa em excesso com uma espátula, limpou-se a área livre do disco e secou-se de forma a remover toda a água ao redor da borda inferior do molde;
- após aproximadamente 15 segundos, levantou-se o molde, verticalmente e lentamente, e espalhou-se a argamassa no disco por gravidade e por rotação manual do manípulo através de 25 pancadas com uma frequência constante de cerca de uma por segundo;
- com recurso à craveira, mediu-se o diâmetro (em mm) da argamassa espalhada em quaisquer três direções perpendiculares.

Resultados:

O resultado deste ensaio corresponde à média das três medições realizadas. Se os valores individuais variarem menos de 10% da média, esta média corresponde ao valor da consistência da argamassa. No caso contrário, o ensaio é repetido, utilizando-se a mesma amostra. Se estes novos resultados divergirem da média menos de 10%, considera-se esta nova média como o valor da consistência da argamassa. Se tal não se verificar, estas medições são consideradas insatisfatórias, sendo o ensaio repetido com uma nova amostra.

3.4.2 Massa volúmica

Este ensaio é executado de acordo com a norma EN 1015-6 (1998) e tem como objetivo verificar a influência dos diversos constituintes na massa volúmica da argamassa, no estado fresco.

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- recipiente metálico cilíndrico, com capacidade de 1 L;
- espátula;
- colher de pedreiro;
- balança com precisão de 0,1 g.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- pesou-se o recipiente metálico;
- encheu-se o mesmo recipiente até cerca de metade da sua capacidade e compactou-se com 10 pancadas realizadas a partir da oscilação do recipiente (em lados alternados);
- encheu-se o recipiente até à sua capacidade máxima e compactou-se da mesma forma;
- retirou-se a argamassa excedente, recorrendo à espátula, limpou-se a parte de fora do recipiente e pesou-se.

Resultados:

Este ensaio determina, de forma rápida, a massa volúmica de uma argamassa em pasta através do quociente entre a massa de uma amostra desta e o volume por si ocupado, recorrendo à Equação 3.12.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_V} \quad [3.12]$$

sendo,

- ρ_m - massa volúmica da argamassa em pasta (g/dm^3);
- m_1 - massa do recipiente metálico (g);
- m_2 - massa do recipiente metálico e do total de argamassa em pasta contida no seu interior (g);
- V_V - volume da argamassa contido no interior do recipiente, que é idêntico à sua capacidade máxima (1 L).

3.5 Ensaios de argamassas no estado endurecido

3.5.1 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão permite avaliar a influência dos dois ligantes, CV e CFRSU, e dos ARF no desempenho mecânico das argamassas. Este ensaio foi realizado tendo em conta a norma europeia EN 1015-11 (1999).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi a máquina de ensaios.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura específica de cada uma das famílias, colocou-se os provetes sobre os cilindros de apoio da máquina de ensaios, de forma a que estes ficassem perpendiculares ao seu eixo longitudinal;
- aplicou-se uma carga concentrada a meio vão (aproximadamente), uniforme, com valores compreendidos no intervalo de 10 a 50 N/s de modo a que a rotura ocorresse no intervalo de 30 a 90 s;
- anotou-se o valor máximo da carga aplicada (em N).

Resultados:

A resistência à flexão foi determinada recorrendo à Equação 3.13.

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \quad [3.13]$$

sendo,

- f - resistência à flexão (MPa);
- F - carga máxima aplicada (N);
- l - distância entre apoios (mm);
- b - largura do prisma (mm);
- d - espessura do prisma (mm).

Segundo a norma europeia, o valor da resistência à flexão de cada provete é arredondado a 0,05 N/mm² e a média dos valores é arredondada a 0,1 N/mm².

3.5.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão também permite avaliar a influência dos dois tipos de ligante e dos ARF no desempenho mecânico das argamassas. Este ensaio foi realizado tendo em conta a norma europeia EN 1015-11 (1999).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi a máquina de ensaios.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura e terem sido ensaiados à flexão, colocou-se os semi-prismas (resultantes desse mesmo ensaio) sobre o acessório adequado para o ensaio;
- aplicou-se uma carga uniforme com uma velocidade compreendida no intervalo de 50 a 500 N/s a fim de a rotura ocorrer num período de 30 a 90 s;
- anotou-se o valor máximo de carga aplicada (em N).

Tendo em conta as características das argamassas e de modo a que a duração do ensaio fosse a especificada na norma europeia considerada, aplicou-se uma carga uniforme com velocidade de 1000 N/s.

Resultados:

A resistência à compressão é determinada recorrendo à Equação 3.14.

$$f = \frac{F}{A} \quad [3.14]$$

sendo,

- f - resistência à compressão (MPa);
- F - carga máxima aplicada (N);
- A - área da zona comprimida (mm²).

Segundo a norma europeia considerada, o valor da resistência à compressão de cada provete é arredondado a 0,05 N/mm² e a média dos valores é arredondada a 0,1 N/mm².

3.5.3 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade das argamassas permite avaliar a capacidade destas para absorver tensões e fornece uma estimativa relativamente à sua resistência à fendilhação. Este ensaio foi realizado em conformidade com o descrito na norma ASTM E 1876-1 (2010). O procedimento descrito nesta norma não permite determinar diretamente o módulo de elasticidade de cada provete, mas sim a sua frequência de ressonância. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico é feita recorrendo a um programa computacional adequado.

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- balança com precisão de 0,1 g;
- craveira;
- máquina de ensaios;
- sensor de impulsos;
- martelo impulsor;
- sistema de apoios.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, foram registadas as massas dos provetes;
- as frequências de ressonância dos provetes foram determinadas de quatro modos diferentes: modo de vibração em flexão; modo de vibração em flexão, a 90º; modo de vibração em torção; modo de vibração longitudinal (Figura 3.1).

Em cada ponto de medição, repetiu-se o ensaio até se obter cinco leituras consecutivas que tenham uma variação inferior a 1% entre si.

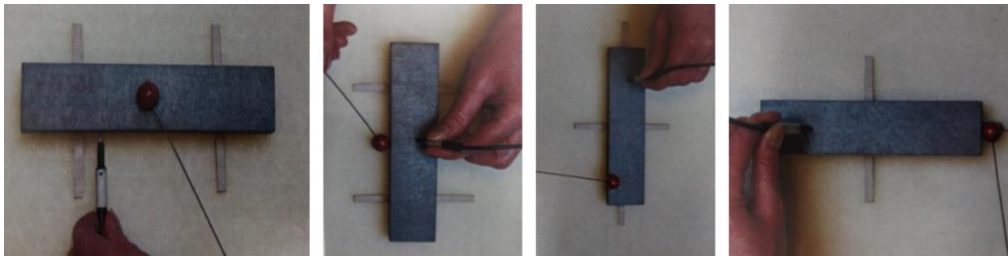


Figura 3.1 Modos de medição da frequência de ressonância (da esquerda para a direita): em flexão, em flexão a 90°, em torção e longitudinal

Resultados:

O valor da frequência de ressonância em cada ponto de medição corresponde à média das cinco leituras. O valor do módulo de elasticidade dinâmico é determinado recorrendo a um programa de computador. Para tal, tem de se introduzir os seguintes dados de cada provete: massa, dimensões e valores das frequências de ressonância em cada ponto medido. A Equação 3.15 é aquela que o programa considera no cálculo do parâmetro (em Pa).

$$E = 0,9465 \left(m \cdot \frac{f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad [3.15]$$

sendo,

- m - massa do provete (g);
- f_f - frequência de ressonância de flexão do provete (Hz);
- b - largura do provete (mm);
- L - comprimento do provete (mm);
- t - altura do provete (mm);
- T_1 - fator de correção tendo em conta a altura do provete e o coeficiente de Poisson.

3.5.4 Retração

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- pernos;
- defletómetro;
- balança com precisão de 0,1 g.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- anotou-se o valor da posição inicial do defletómetro e, em seguida, o valor do defletómetro resultante da sua calibração;
- após a cura (Tabela 3.3), mediu-se cada provete segundo o seu eixo longitudinal na vertical, realizando-se quatro medições em cada extremo do provete;
- realizou-se a primeira medição de retração logo após a desmoldagem dos provetes;
- repetiu-se o procedimento todos os dias durante a primeira semana, de dois em dois dias nas duas semanas seguintes, de três em três dias na semana seguinte e de semana a semana daí em diante.

Resultados:

A variação dimensional de cada provete é dada pela Equação 3.16.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [3.16]$$

sendo,

- ε - variação específica do comprimento;
- ΔL - variação do comprimento do provete, relativamente ao comprimento inicial (mm);
- L - comprimento inicial do provete (mm).

O resultado da retração de cada argamassa foi calculado com recurso à média dos valores individuais de retração dos dois provetes.

3.5.5 Carbonatação

A realização deste ensaio seguiu as especificações da norma LNEC E391 (1993).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%;
- serra de disco elétrica;
- régua.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, ensaiou-se os provetes à resistência à flexão;
- borrifou-se as faces de corte com a solução de fenolftaleína;
- mediu-se, com uma régua, a penetração da carbonatação da face de cada semi-prisma.

Resultados:

O valor da profundidade de carbonatação de cada argamassa corresponde à média dos valores obtidos para cada face de corte ensaiada.

3.5.6 Absorção de água por capilaridade

A análise da absorção por capilaridade permite determinar a porosidade e refletir sobre a influência dos ARF e do ligante nas argamassas. O ensaio de absorção por capilaridade de argamassas seguiu as especificações presentes na norma europeia EN 1015-18 (2002).

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- serra de disco elétrica;
- balança com precisão de 0,1 g;
- forno a 60 ± 5 °C;
- barras de plástico de suporte;
- tina transparente;
- papel absorvente.

Procedimento:

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, os provetes foram cortados ao meio com a serra de disco elétrica;
- os provetes foram pesados e introduzidos na tina, verticalmente, com as faces de corte em contacto com a água;
- passados 10 minutos, retirou-se os provetes, limpou-se a superfície imersa em papel absorvente, e os provetes foram pesados e colocados em seguida na tina;
- repetiu-se o procedimento 10,30, 180, 360, 1440 e 4320 minutos após a imersão inicial.

Resultados:

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C), em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$, representa a velocidade de absorção de água nos instantes iniciais e corresponde ao declive da reta que une os pontos representativos das medições dos provetes realizadas aos 0 e t minutos. Este coeficiente é determinado pela Equação 3.17.

$$C = 0,1 \times (M_t - M_0) \quad [3.17]$$

O cálculo das quantidades de material para a produção das argamassas da presente investigação foi baseado na metodologia proposta por Nepomuceno (2005), apesar de a mesma se aplicar a betões e argamassas auto-compactáveis. A adoção desta metodologia resulta na produção de argamassas que podem ser consideradas micro-betões, como referido no subcapítulo 1.2, uma vez que a sua constituição é semelhante à de betões, exceto a não utilização de agregados grossos. Assim sendo, seria importante analisar a absorção de água por capilaridade

durante um maior período de tempo (i.e. 72 horas). Desta forma, adaptou-se essa equação de modo a determinar o coeficiente de absorção capilar para toda a duração do ensaio, resultando na Equação 3.18.

$$C = 0,1 \times (M_{4320min} - M_{0min}) \quad [3.18]$$

O coeficiente de absorção de água médio resulta da média dos valores individuais do coeficiente de absorção dos três provetes de cada argamassa.

4 Resultados e discussão

4.1 Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar e avaliar os resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental. Em primeira instância, são apresentados os resultados relativos aos ensaios realizados aos agregados. Esta caracterização inicial é essencial para conclusões futuras, uma vez que as propriedades intrínsecas dos agregados poderão ter um papel influente no desempenho de uma argamassa. Em segundo, são apresentados e analisados os ensaios realizados às argamassas no estado fresco, concluindo com os ensaios no estado endurecido. Estes últimos são fundamentais na percepção do desempenho das argamassas, uma vez que possibilitam a análise das condições de cura iniciais, assim como até ao dia do ensaio.

Ao longo dos resultados apresentados, é realizada uma análise comparativa entre as várias condições de cura para o mesmo ligante utilizado e a influência da utilização dos ARF em cada uma das famílias. O objetivo inicial da dissertação era comparar os dois tipos de ligantes mantendo a dosagem de ligante e relação AA/I. No entanto, numa fase inicial da campanha experimental, foi necessário alterar a relação AA/I nas amassaduras de CFRSU uma vez que estas, mesmo com o superplastificante, não se enquadravam na trabalhabilidade estabelecida. Com esta alteração, os dois ligantes em estudo deixam de ser comparáveis entre si uma vez que as composições são distintas.

4.2 Propriedades das cinzas volantes e das cinzas de fundo dos resíduos sólidos urbanos

4.2.1 Composição química

Recorrendo à difração a raio-X, determinou-se as composições químicas das CV e CFRSU utilizadas (Tabela 4.1 e Tabela 4.2). A caracterização química das CV está de acordo com as amostras usuais nas investigações anteriores; os elementos com maior presença são o SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Os primeiros dois elementos são os impulsionadores do gel de aluminossilicatos enquanto o óxido de ferro irá dificultar o desenvolvimento da dissolução da sílica e do alumínio. É importante avaliar a presença do Fe em estado amorfo na mistura porque ele desempenha um papel crítico no mecanismo da polimerização. Caso o Fe esteja sob a forma de espinel Fe-Al (espinel é um grupo de minerais) ou vidro rica em Fe, a sua presença pode provocar uma diminuição da sílica e da alumina na polimerização ao não inibir a dissolução destes dois elementos (Chen-Tan and Riessen, 2009). Devido a este último elemento, foi efetuada uma análise de difração de raio-X das CFRSU tendo em conta a fração magnética ferrosa (M), não magnética (NM) e ambas (N+NM), com o fim de se conhecer as fases presentes em cada uma das parcelas da amostra. No entanto, na dissertação utilizou-se as CFRSU com ambas as frações (M+NM). Na fração NM, o ensaio DRX distinguiu os seguintes elementos: quartzo (SiO_2), calcite (CaCO_3) e anortite. Na fração M, observou-se uma acentuada presença da magnetite (óxidos de ferro), kamacite (Fe, Ni) e calcite (CaCO_3). Por outras palavras, ao retirar-se a fração dos magnéticos ferrosos, a presença dos óxidos de ferro foi praticamente dissipada e, deste modo, promove-se a dissolução da sílica e do alumínio que é impedida por estes elementos.

4.2.2 Análise granulométrica

As CFRSU, antes de serem utilizadas, foram submetidas a um processo de moagem com o fim de alcançar uma granulometria semelhante à do cimento e, desse modo, potenciar a reatividade das partículas ao aumentar a

sua superfície específica. A Tabela 4.3 apresenta a análise granulométrica das CFRSU para cada um dos processos de moagem (crivagem manual a húmido): moído em moinho de bolas pequeno durante 1 hora com uma carga próxima de 1 kg e moído em moinho de bolas grande durante 1 hora com uma carga cerca de 20 kg. Uma vez que foi necessária uma grande quantidade de CFRSU para a campanha experimental, a sua moagem foi realizada com recurso a moinho de bolas grandes. Os valores alcançados após o processo já tornavam a granulometria destas cinzas equiparável à do cimento.

Tabela 4.1 Caracterização química das CFRSU

Óxidos	Amostra 1 (M) [%]	Amostra 2 (NM) [%]	Amostra 3 (M+NM) [%]
PbO	0,043	0,195	0,183
ZnO	0,198	0,415	0,409
CuO	0,145	0,178	0,162
NiO	0,114	-	-
Fe ₂ O ₃	62,609	6,691	9,291
MnO	0,260	-	-
Cr ₂ O ₃	0,183	-	-
TiO ₂	0,576	0,331	0,343
CaO	9,858	24,253	22,999
K ₂ O	0,480	1,597	1,574
SO ₃	1,357	2,422	2,419
SiO ₂	14,924	53,735	51,841
Al ₂ O ₃	4,173	4,494	4,995

Tabela 4.2 Caracterização químicas das CV

Óxidos	Valor médio [%]	Desvio padrão [%]
Na ₂ O	0,76	0,05
MgO	0,90	0,04
Al ₂ O ₃	18,75	0,88
SiO ₂	51,93	0,54
K ₂ O	3,24	0,11
CaO	4,46	1,10
TiO ₂	2,39	0,10
Fe ₂ O ₃	15,96	1,83
CuO	1,60	0,45

Tabela 4.3 Análise granulométrica das CFRSU consoante os dois métodos realizados

Granulometria [µm]	Moinho de bolas pequeno	Moinho de bolas grande
	Massa retida [%]	Massa retida [%]
>106	16,08	6,95
>53	8,53	34,97
>45	0,07	5,64
>25	21,13	13,14
<25	54,19	39,31

4.3 Propriedades dos agregados

4.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos diferentes agregados utilizados na presente investigação foi realizada de acordo com a norma EN 1015-1 e sobre amostras de 2 kg (aproximadamente). Os resultados obtidos para a areia fina, areia grossa e AR são apresentadas nas Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, respetivamente. Em anexo (Figura A.1), encontram-se as curvas granulométricas correspondentes à areia fina, areia grossa, AR e a curva com 50% areia fina-50% areia grossa que determinou a distribuição dos AR nas amassaduras.

A curva granulométrica adotada para as argamassas com AN incorpora 50% de areia fina e outros 50% de areia grossa. Assim, a incorporação de ARF nas argamassas deverá substituir tanto a areia fina como a areia grossa. Para facilitar este processo, determinou-se a distribuição granulométrica resultante da utilização de 50% de cada uma das areias referidas e, desta forma, a substituição de AN por ARF é baseada nesta nova distribuição granulométrica.

Uma vez que é importante manter-se a granulometria dos agregados na substituição de AN por ARF, é necessário determinar a curva granulométrica dos ARF que melhor se assemelha à granulometria da areia fina e grossa (50% - 50%). Ao utilizar granulometrias semelhantes na substituição dos AN por ARF, a análise consequente das argamassas torna-se mais direta e precisa quanto à influência da substituição. A percentagem de ARF retido adotada

é apresentada na Tabela 4.7. Apenas se considerou granulometrias abaixo de 4 mm, uma vez que se quer analisar a influência da substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados.

Tabela 4.4 Análise granulométrica parcial da areia fina

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (areia fina) (%)
8	0,00
4	0,02
2	0,08
1	1,03
0,5	31,48
0,25	57,92
0,125	8,83
0,063	0,40

Tabela 4.5 Análise granulométrica parcial da areia grossa

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (areia grossa) (%)
8	0,10
4	3,31
2	12,08
1	41,88
0,5	32,43
0,25	6,93
0,125	2,49
0,063	0,47

Tabela 4.6 Análise granulométrica parcial dos agregados reciclados

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (%)
4	0,00
2	22,83
1	34,86
0,5	21,00
0,25	13,03
0,125	5,19
0,063	1,33
< 0,063	1,07

Tabela 4.7 Percentagem de material retido adotada na curva granulométrica dos ARF

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (%)
4	1,59
2	7,56
1	38,37
0,5	44,41
0,25	19,28
0,125	2,53
0,063	0,14
<0,063	0,65

4.3.2 Massa volúmica e massa volúmica aparente

A massa volúmica foi determinada para os diferentes agregados como referido no subcapítulo 3.3.2: areia fina, areia grossa e agregados reciclados finos. Através deste ensaio determinou-se a massa volúmica aparente (ρ_a), a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8. Através da análise da Tabela 4.9, que apresenta a baridade dos agregados, verifica-se que a baridade dos ARF é inferior à dos AN como era expectável, devido à pasta cimentícia que os AR têm aderida a si que lhes confere um elevado grau de porosidade.

Tabela 4.8 Massa volúmica dos diferentes agregados

Massa volúmica (kg/m ³)	Material		
	Areia fina	Areia grossa	ARF
ρ_a	2652	2636	2510
ρ_{rd}	2624	2601	2040
ρ_{ssd}	2634	2614	2230

Tabela 4.9 Baridade dos diversos materiais

Materiais	Areia fina	Areia grossa	ARF
Baridade (kg/m ³)	1544	1556	1217

4.3.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água dos agregados naturais (ensaio do picnómetro, referido no subcapítulo 3.3.3) apenas determina o valor referente a uma imersão durante 24 horas (A24h). Os resultados obtidos para a areia fina, areia grossa e ARF foram 0,40, 0,51 e 9,33%, respetivamente. Além do valor de absorção de água resultante da imersão do material durante 24 horas, é relevante determinar a absorção de água dos AR durante o período de produção da argamassa, A10min (considerou-se que esse período correspondia aos primeiros 10 min). Desta forma, essa absorção inicial foi determinada com base no descrito por Rodrigues *et al.* (2013) e o valor obtido foi 82% do valor total da absorção dos ARF em 24 horas. Em anexo, na Tabela A.1, estão os valores obtidos do ensaio da balança hidrostática aos AR.

Relativamente aos valores de absorção em 24 horas, confirma-se a discrepância dos valores de ARF para os AN. Estes resultados estão de acordo com a tendência descrita por Kenai (2018) e Pedro *et al.* (2017); a porosidade dos AR origina uma maior capacidade de absorção de água pelos mesmos, devido à maior quantidade de pasta de cimento que se encontra aderida às partículas dos agregados.

4.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

4.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi determinada por via do ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (1999) e visa determinar a quantidade de água a utilizar na mistura de modo a obter a consistência desejada, sendo que esta quantidade irá ter em consideração o valor obtido de A10min dos ARF (subcapítulo 4.3.3). Uma vez que as argamassas estudadas podem ser consideradas microbetões, é importante que haja uma boa trabalhabilidade em casos práticos. Assim, adotou-se 170 ± 25 mm como consistência adequada. Para a amostra REF, obteve-se um espalhamento de 223 mm. Os resultados do ensaio de consistência por espalhamento são apresentados na Tabela 4.10. Nas famílias de CF-AN, são apresentados dois valores para o mesmo parâmetro que correspondem ao valor medido de imediato e após 1 hora da mistura. Em anexo, nas Tabelas A.2 e A.3 encontram-se os valores de todas as amassaduras efetuadas.

Em ambos os ligantes, a introdução de ARF, como esperado, conduz a uma pasta menos trabalhável. Silva *et al.* (2014) confirmaram o mesmo no seu estudo, sendo que atribuíram essa tendência à maior capacidade de absorção de água, maior angulosidade e menor finura dos ARF, relativamente aos ANF. Contudo, para todas as amassaduras, foi adicionado 8% (da massa dos agregados) de água de compensação (a_c) para promover a saturação dos ARF para 10 minutos e, assim, garantir que a totalidade do AA introduzido tem a função de envolver os agregados e proporcionar trabalhabilidade.

Nesta fase inicial, as 12 famílias são apenas avaliadas em função das diferentes composições com e sem ARF para o mesmo tipo de ligante. Adicionalmente, recorda-se que algumas argamassas não são diretamente comparáveis, uma vez que a sua relação AA/l é distinta. A diferença de espalhamento entre CV-AN e CV-AR é de 18%, enquanto para as CFRSU, entre AN e AR, é de 5,1%, após a amassadura. Como descrito no subcapítulo 2.3, as argamassas com CFRSU têm tendência a formar bolhas de hidrogénio em paralelo com as reações de hidratação, pelo que, na produção destas, só 1 hora depois se colocaram as argamassas nos moldes para que a reação química atingisse o equilíbrio. Inicialmente,

pretendia-se respeitar esta condição para ambos os agregados; no entanto, para CF-AR, a pasta após amassadura já se enquadrava na consistência pretendida e, após 1 hora, apresentava-se como um material seco e com trabalhabilidade nula.

O valor médio do espalhamento das CV-AR encontra-se no limiar do intervalo pretendido. Este efeito foi observado de imediato na produção das argamassas e pode ser justificado com base em fatores externos ao ensaio, tais como as condições em que o ensaio é realizado e o material utilizado para a produção. Uma vez que o laboratório em que são produzidos os ensaios é um espaço aberto, as condições exteriores em que as argamassas são desenvolvidas diferem (para o mesmo dia, produzir a argamassa em diferentes horas, a temperatura e a humidade do espaço varia). Também a potência da misturadora utilizada influencia a aparência final da pasta. Nesta campanha experimental, devido a problemas técnicos, foram utilizadas três misturadoras de capacidades diferentes (4L, 2L, 1L). Na produção, verificou-se que, nas amassaduras com AR, a misturadora de 1 L não foi eficiente e havia um depósito de matéria no fundo, tendo afetado em larga escala as amassaduras de CV-AR.

Tabela 4.10 Consistência por espalhamento e relação ativador alcalino / ligante

Argamassa	Consistência (mm) (15 min / 60 min)	Desvio-padrão (mm) (15 min / 60 min)	Relação AA/I
CV-AN 70/24	189	2	0,50
CV-AN 70/48	178	1	
CV-AN 90/24	189	4	
CV-AR 70/24	149	6	
CV-AR 70/48	149	7	
CV-AR 90/24	159	6	
CF-AN 70/24	171/152	6/8	0,65
CF-AN 70/48	177/166	8/10	
CF-AN 90/24	172/163	7/7	
CF-AR 70/24	165	10	
CF-AR 70/48	164	6	
CF-AR 90/24	164	9	

Em suma, na substituição dos ANF por ARF, a sua trabalhabilidade diminui para ambos os ligantes estudados. Para manter uma trabalhabilidade semelhante em todas as argamassas, aumentou-se a quantidade de AA na mistura de CFRSU e recorreu-se à utilização de 2% (de massa de ligante) de superplastificante (Sikament 400 Plus). A escolha deste adjuvante, com base química de lignosulfonato, deve-se à sua capacidade dispersante e como redutor de água. As partículas das CFRSU, através de testes anteriores, demonstraram elevada hidrofobicidade, pelo que o uso de um superplastificante era necessário para uma mistura coerente. Adicionalmente, plastificantes à base de lignosulfonato têm uma maior estabilidade química quando expostos a ambientes mais alcalinos. Por esse motivo, ao longo deste capítulo, as reflexões não poderão comparar o desempenho do ligante, apenas as condições de cura iniciais para o mesmo tipo de ligante e com a variante dos agregados.

4.4.2 Massa volúmica

O ensaio de massa volúmica, no estado fresco, foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-6 (1998). A mistura REF tem um valor de 2248 g/dm³. Todas as misturas estudadas foram sujeitas a este ensaio, de modo a quantificar a influência a substituição dos ANF por ARF e do cimento por CV ou CFRSU. Os resultados obtidos

são apresentados na Tabela 4.11. Em anexo, nas Tabelas A.2 e A.3, encontram-se os valores de todas as amassaduras efetuadas. Analisando os resultados, é possível verificar que, para ambos os ligantes, a incorporação de ARF provoca uma diminuição da massa volúmica das argamassas, 13 e 8,2% para as CV e CFRSU, respetivamente. Esta tendência de resultados está de acordo com a literatura (Brito e Evangelista, 2013). A principal justificação para tal prende-se com o fato de os ARF terem aderida às suas partículas uma pasta cimentícia. Para as CFRSU, a massa volúmica aumentou em 5% após 1 hora de reação. Este efeito advém do desenvolvimento da libertação de bolhas de hidrogénio. Assim, obtém-se uma matriz menos porosa, logo mais densa, que corresponde a um valor de massa volúmica superior.

Tabela 4.11 Massa volúmica no estado fresco [g/dm³]

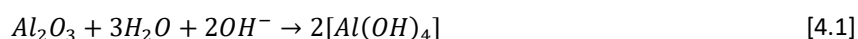
Ligante	AN	ARF
CV	2260	1970
CFRSU	1901/2004 (após 1 hora)	1744

4.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido

4.5.1 Resistência à compressão

O ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (1999), tendo sido repetido aos 7, 28 e 91 dias de idade de cada família de argamassas. As Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam os valores obtidos na campanha experimental ao longo do período avaliado consoante as condições de cura iniciais em cada uma das composições das amassaduras. Em anexo (Tabelas A 4, A.5 e A.6) estão os valores medidos nas três idades ensaiadas. As figuras permitem verificar que, para a maioria das famílias de amassaduras, existe um crescimento entre todas as idades. As exceções incluem as seguintes famílias: CV-AR 70/24, em que os valores não diferem entre idades; CF-AR 70/48, em que se verifica o comportamento inverso das restantes; e, por último, CF-AR 90/24, que revelou uma menor resistência aos 91 dias por comparação aos 28 dias. A justificação para estas lacunas advém da dificuldade de desmoldar alguns provetes devido à ineficácia do óleo descofrante, o que os deixou com falhas na sua pasta e irregulares.

Antes de se efetuar uma análise dos dados obtidos, é importante perceber as reações químicas envolvidas no processo de polimerização. Ao longo da dissertação, foi explícita a importância da presença de elementos como a sílica e a alumina para obter um MAA. Numa fase inicial do mecanismo de reação, ocorre a dissolução da sílica (que tem de estar em estado amorfo), seguida pelas fases de transporte e policondensação. A ativação alcalina tem lugar através de um processo exotérmico de dissolução, durante o qual ocorre o colapso das ligações covalente Si-O-Si e Al-O-Al. Os produtos resultantes começam a acumular-se até ocorrer a condensação produzindo uma estrutura pouco ordenada com alta resistência mecânica. O processo inicial da reação de ativação alcalina reflete a dissolução de partículas sólidas de aluminossilicatos em solução alcalina e pode ser esquematizada segundo as reações seguinte (Equações 4.1, 4.2, 4.3):



Estas reações sugerem que as moléculas de água e o íon OH^- são consumidos em dissolução contínua, o que demonstra a importância da influência da alcalinidade na taxa de dissolução da sílica e da alumina. Enquanto a sílica é altamente solúvel em meio básico, a alumina é solúvel nos extremos, tanto em meio ácido como básico. O ataque alcalino sobre a microestrutura resulta na libertação de espécies de silicato e aluminato em solução. Com a extensão de estudos sobre a polimerização, tem-se vindo a conjecturar que a libertação inicial de Al possa ser mais rápida do que a de Si (Severo et al., 2013). A alumina dissolvida pode reagir com qualquer silicato inicialmente fornecido pelo AA, levando à formação de um gel de aluminossilicato, e é por isso que o uso de soluções de silicato de sódio como ativador favorece a formação de produtos que apresentam melhores capacidades mecânicas do que apenas os que são formados com NaOH, como na presente dissertação. Estudos destacam a relevância da quantidade de alumina presente no tempo de reação, para além das proporções molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, como um dos principais responsáveis pelos ganhos de propriedades mecânicas. Após a dissolução, a segunda etapa deste mecanismo denomina-se de condensação. Nesta etapa, as espécies $[\text{Al}(\text{OH})_4]$ e $[\text{SiO}(\text{OH})_3]$ ligam-se pela atração entre um dos grupos OH^- a partir de $[\text{SiO}(\text{OH})_3]$ e íões de Al do $[\text{Al}(\text{OH})_4]$ do qual se forma uma estrutura intermédia. Os dois grupos OH^- desta estrutura condensam de modo a formar uma espécie de aluminossilicato libertando uma molécula de água. Por último, a formação e o endurecimento do polímero é consequente da condensação entre aluminatos e silicatos. Este género de reações também ocorre durante a síntese da zeolite, mas a condensação entre estes elementos ocorre mais rápido (Severo et al., 2013). Embora a explicação seja referente a CV, presume-se que o mecanismo de reação nas CFRSU seja semelhante.

A tendência verificada nos resultados de resistência à compressão está de acordo com Nuaklong et al. (2016) e Shi et al. (2012). Para as amassaduras com CV e mesmas condições de cura, a alteração de AN por AR revela uma redução da capacidade resistente, confirmando as fracas propriedades intrínsecas do AR. Contudo, em relação a Nuaklong et al. (2016), os valores obtidos foram inferiores em 40-55% aproximadamente. Tal deve-se, principalmente, ao AA utilizado. Os autores concluem que a concentração ideal de AA, para obter um MAA com boa capacidade mecânica, equivale a 12 moles. Adicionalmente, a adição de Na_2SiO_3 promove a dissolução de Si e fortalece o gel de aluminossilicatos que garante a resistência da amassadura. Na campanha experimental, foi fixado o NaOH em 10 moles, pelo que pode ter resultado num meio insuficientemente alcalino e, por isso, incapaz de resultar em resistências superiores pela baixa concentração de OH^- .

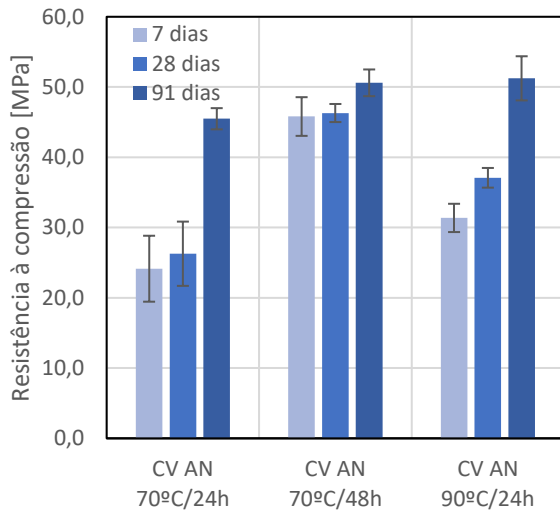


Figura 4.1 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CV-AN

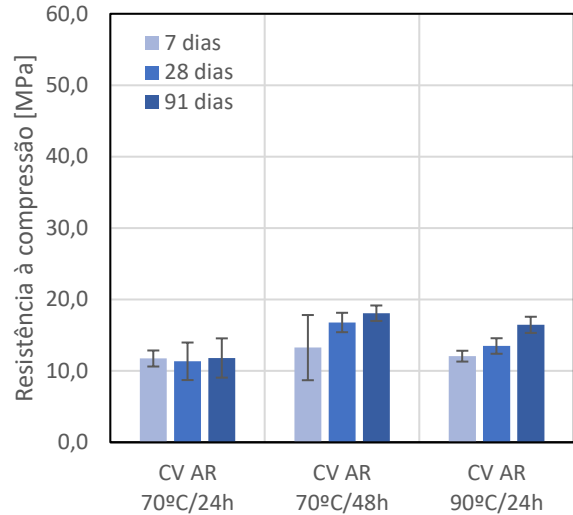


Figura 4.2 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CV-AR

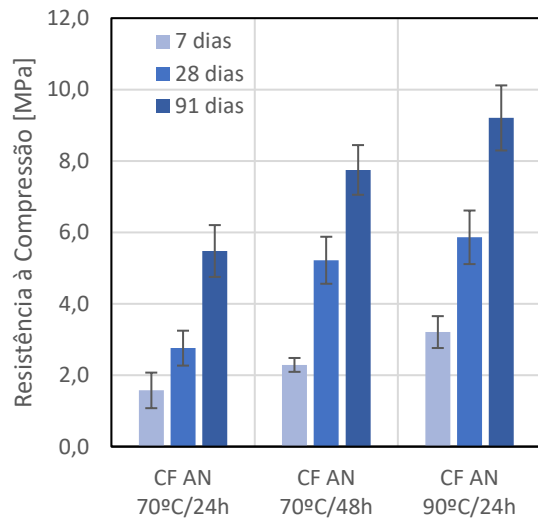


Figura 4.3 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CF-AN

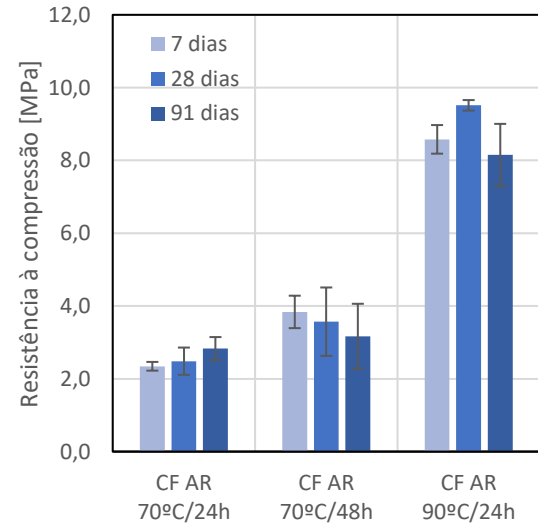
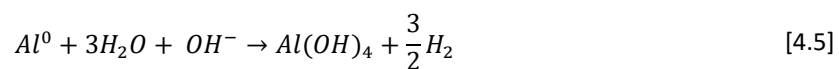


Figura 4.4 Relação entre a resistência à compressão e as condições de cura da família CF-AR

Para o mesmo ligante, era expectável que se verificasse o mesmo comportamento entre condições de cura para AN e AR. Na substituição de AN por AR, para cada uma das condições de cura houve uma redução de entre 50-70%. É necessário ter em conta que a compensação das argamassas ativadas alcalinamente com AR não é feita do mesmo modo do que para as misturas convencionais de cimento (2/3 de água no início da amassadura + 1/3 adicionado mais tarde), o que leva a uma dinâmica de absorção de água interna ainda desconhecida. Assim, não se garante a saturação uniforme dos agregados. Adicionalmente, em vez da água de compensação, os AR poderão absorver o AA ou poderá existir a migração de OH⁻ para o seu interior reduzindo a alcalinidade da solução envolvendo as partículas do precursor. Adicionalmente, o formato irregular dos AR por oposição ao arredondado da areia criou uma maior fricção entre partículas e, conseqüentemente, uma menor compacidade dos provetes.

Em relação às condições de cura estudadas, os resultados obtidos vão ao encontro das conclusões de Atiş et al. (2015). Para a mesma temperatura de cura, o aumento do período de exposição promove o desenvolvimento da capacidade resistente e, para a mesma duração, mas com temperatura superior, a resistência também responde de maneira equivalente. Elyamany et al. (2018) justificam que o aumento de temperatura viabiliza a eficácia da dissolução dos aluminossilicatos. Assim, para a variação de condições de cura, para a mesma composição de amassadura, é necessário avaliar a energia envolvida em cada uma das hipóteses estudadas. É possível afirmar que, quanto maior a energia introduzida durante a cura, maior a resistência (reação endotérmica).

Para as CFRSU, validou-se o mesmo comportamento com a introdução dos AR em vez de AN. Contudo, a gama de valores não varia como nas CV, aspeto que não era esperado no início da campanha experimental. As CFRSU, como descrito no subcapítulo 2.3, são um material caracterizado pela sua porosidade e pela sua reação de expansão por parte das bolhas de hidrogénio (Equações 4.4 e 4.5), que, só por si, é capaz de enfraquecer significativamente a matriz da mistura. Com a adição de AR, há dois elementos a reduzir a quantidade de água na mistura e uma redução, pouco significativa, de AA/l origina uma argamassa mais densa, logo mais resistente. Para algumas idades, ocorreram valores superiores com a utilização de AR. No entanto, nas famílias CF-AR 70/48 e CF-AR 90/24, houve problemas no desmolde dos provetes deixando pasta aderida nos mesmos, tendo gerado valores discrepantes.



No início da campanha experimental, era expectável observar a mesma tendência do que nas CV (i.e. melhores resultados nos moldes expostos a 70 °C durante 48 horas), mesmo com composições distintas, mas tal não aconteceu. Apesar da moagem das CFRSU, para se igualar a granulometria do cimento, o grau de polimerização das CV é superior. Adicionalmente, a fisionomia das suas partículas arredondadas fomenta uma mistura mais homogénea e com maior compacidade. Independentemente da idade estudada e do tipo de agregado, foi a família CF-AR 90/24 que desenvolveu melhores resultados, comportamento que não era expectável devido à introdução de AR, que fragiliza a matriz. Ao longo da campanha experimental, este efeito não se verificou nos restantes ensaios. Quanto à solução de cura ideal, possivelmente, a introdução de uma maior quantidade de energia provocou uma evaporação precoce da água da amassadura antes que tivesse ocorrido a dissolução da sílica amorfa no material. Adicionalmente, com 70 °C/24 horas, não é criado o meio alcalino necessário para o desenvolvimento das reações químicas por falta de energia térmica envolvida. Como López et al. (2017) afirmam, o desenvolvimento da resistência à compressão das CFRSU é caracterizado pela sua lentidão devido à baixa reatividade das cinzas. No ensaio de resistência à compressão apenas da pasta de CFRSU consoante cada uma das condições de cura, não se verificou melhores resultados a 90 °C/24 horas. Também nestas pastas se observou a formação de uma película envolvendo o provete que corresponde, principalmente, a carbonato de sódio (ensaio DRX).

Os valores da resistência à compressão das argamassas REF foram 43,9, 55,2 e 66,2 para 7, 28 e 91 dias, respetivamente. Apenas as amassaduras CV-AN, de 70/48 e 90/24, a longo prazo conseguiram alcançar valores semelhantes ao de 28 dias de REF.

Na fase final da campanha experimental, optou-se por realizar um ensaio de DRX às pastas (sem agregados) para as diferentes condições de cura e, além de um estudo da sua composição química, avaliou-se os provetes quanto à resistência à compressão. Estes valores são indicativos (Tabela 4.12) e não validam as conclusões anteriores, uma vez que a pasta de CV submetida a 90 °C/24 horas se apresenta superior numa fase inicial e com o tempo a sua resistência assemelha-se à da CV 70 °C/48 horas. Os ensaios de DRX das pastas encontram-se nos anexos (Figuras A.1 e A.2). Quanto às pastas de CV, há dois picos de destaque: o de SiO₂ e o de halite (NaCl) com sodalite (Na₄Al₃Si₃O₁₂Cl); nas CFRSU, houve uma reestruturação química visível apenas na pasta de 70 °C/48 horas de sodalite para calcite entre os 7 e 28 dias.

Tabela 4.12 Resistência à compressão das pastas para posterior ensaio DRX a 7 e 28 dias

Amassaduras	Compressão 7 dias (MPa)	Compressão 28 dias (MPa)	Δ 7 dias (%)	Δ 28 dias (%)	Δ 7-28 dias (%)	
CV	70/24	7,02	8,73	-	-	24,4
	70/48	9,32	14,31	32,7	63,9	53,6
	90/24	12,03	14,29	71,4	63,6	18,8
CFRSU	70/24	0,47	0,93	-	-	97,4
	70/48	0,70	1,58	47,7	69,8	126,9
	90/24	1,09	1,05	131,8	12,4	-4,3

4.5.2 Velocidade de ultrassons

De acordo com a norma EN 12504-4, todos os provetes foram submetidos ao ensaio de ultrassons a 7, 28 e 91 dias. Os valores obtidos são apresentados nas Tabela 4.13 e Tabela 4.14. Em anexo (Tabelas A 4, A.5 e A.6), estão os valores medidos nas idades ensaiadas. Através de ambas, verifica-se a tendência descrita no subcapítulo 4.5.1 para cada uma das composições. Os valores de duas famílias não foram calculados: o ensaio a 7 dias de CV-AN 70/24 não foi concretizado; e o de CF-AN 70/48 a 28 dias não foi possível devido às faces laterais do provete se apresentarem irregulares e com falta de massa. Em relação ao ensaio a 91 dias de todas as famílias de CFRSU a máquina possivelmente encontrava-se descalibrada de modo que os valores não eram razoáveis face aos a 28 dias. Tanto para as CV como para as CFRSU, os valores das amassaduras com AR são sempre inferiores aos das amassaduras respetivas de AN. Confirmam-se as melhores condições de cura para cada um dos géneros de ligantes avaliados: 70 °C durante 48 horas nas CV, com base na energia inicial concedida ao sistema; e 90 °C durante 24 horas para as CFRSU.

Tabela 4.13 Velocidade de ultrassons das famílias de CV-AN e CV-AR para as diferentes condições de cura para 7, 28 e 91 dias

Amassaduras	Velocidade de ultrassons (m/s)			
	7 dias	28 dias	91 dias	
CV AN	70 °C/24 horas	-	3613	3584
	70 °C/48 horas	3597	3743	3813
	90 °C/24 horas	2939	2632	3756
CV AR	70 °C/24 horas	2341	1755	2439
	70 °C/48 horas	2521	2181	2561
	90 °C/24 horas	2132	2127	1972

Tabela 4.14 Velocidade de ultrassons das famílias de CF-AN e CF-AR para as diferentes condições de cura para 7, 28 e 91 dias

Amassaduras	Velocidade de ultrassons (m/s)			
	7 dias	28 dias	91 dias	
CF AN	70 °C/24 horas	1982	2183	-
	70 °C/48 horas	2830	-	-
	90 °C/24 horas	2068	2379	-
CF AR	70 °C/24 horas	1623	1590	-
	70 °C/48 horas	1543	1860	-
	90 °C/24 horas	2362	2147	-

Os valores da argamassa REF foram 4126, 4586 e 4565 m/s para 7, 28 e 91 dias, respetivamente. Neste parâmetro, tal como no subcapítulo anterior, são as misturas CV-AN que se aproximam da de referência. Para as CFRSU desenvolverem resultados semelhantes às CV, ou até ao cimento, é necessário que sofram um processo de tratamento para além de uma moagem prévia como se realizou na presente dissertação. Contudo, a argamassa de referência

foi exposta a condições distintas dos restantes provetes da campanha experimental; os provetes REF permaneceram na câmara húmida (20°C e $95 \pm 5\%$ HR), enquanto que os provetes de CV e CFRSU, até à data do ensaio, encontram-se na câmara seca (20°C e $55 \pm 5\%$ HR). No subcapítulo 4.2.1, explicou-se a influência da presença dos óxidos de ferro na amassadura ao despromover a dissolução da sílica e do alumínio. Assim, há um défice no processo de polimerização das cinzas e não se cria uma matriz com todo o potencial resistente possível. Caso todas as composições tivessem a mesma relação AA/l, independentemente de CV ou CFRSU, as CFRSU iriam apresentar valores inferiores devido à lentidão do seu processo de polimerização.

4.5.3 Resistência à flexão

O ensaio foi realizado de acordo com o descrito na norma europeia EN 1015-11 (1999), tendo sido repetido a 7, 28 e 91 dias de idade de cada família de argamassas. Quanto às condições de cura estudadas para cada uma das composições, os valores obtidos estão representados nas Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8. A resistência à flexão descreve as mesmas tendências observadas para a resistência à compressão, descritas no subcapítulo anterior. Assim, observa-se, novamente, incoerências no desenvolvimento resistente das famílias CF-AR 70/48 e CF-AR 90/24 e ainda CV-AR 70/48. Em anexo (Tabelas A 4, A.5 e A.6), estão os valores medidos nas idades ensaiadas.

Em relação aos AR, para ambos os ligantes, era esperada a diminuição da sua capacidade de resposta por comparação com as amassaduras de AN. Foi descrito no subcapítulo 2.1 que a substituição de AN por AR originaria uma matriz menos densa devido às características do betão proveniente e da consequente pasta aderida às partículas. As conclusões alcançadas estão de acordo com Nuaklong et al. (2016) que advogam a relevância das propriedades intrínsecas dos AR. O elevado volume de vazios provoca uma argamassa porosa e com uma relação a/l menor. Dessa forma, a quantidade de água efetiva reduz-se e inviabiliza-se a progressão das reações de hidratação. Embora o estudo seja referente a CVAA, é possível transpor o mesmo comportamento para as CFRSU.

Nas amassaduras que têm como ligante as CV, conclui-se que a melhor hipótese para as condições de cura iniciais é 70°C durante 48 horas. No entanto, este efeito não tem o mesmo impacto do que na resistência à compressão, uma vez que, ao comparar as amassaduras de CV-AN, aos 91 dias, não ocorre uma variação significativa entre as condições de cura, chegando-se a obter-se melhores resultados com $90^{\circ}\text{C}/24$ horas. Por outras palavras, o desenvolvimento após a cura térmica de $70^{\circ}\text{C}/48$ horas não conduziu a melhorias de resistência, uma vez que a longo prazo é possível alcançar valores semelhantes com cura inicial de $90^{\circ}\text{C}/24$ horas.

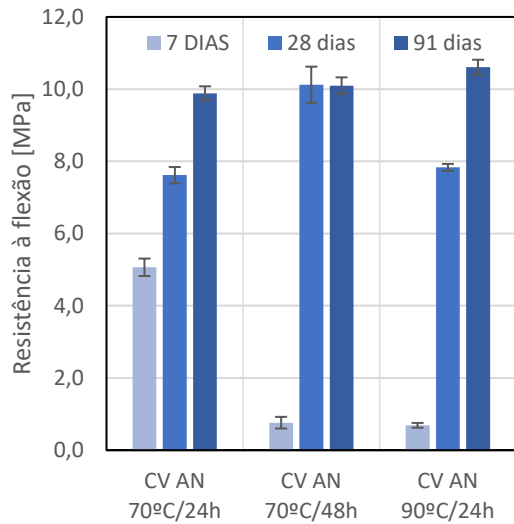


Figura 4.5 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CV AN

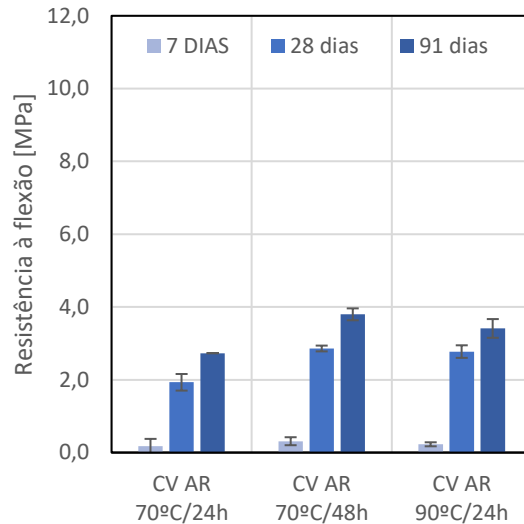


Figura 4.6 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CV AR

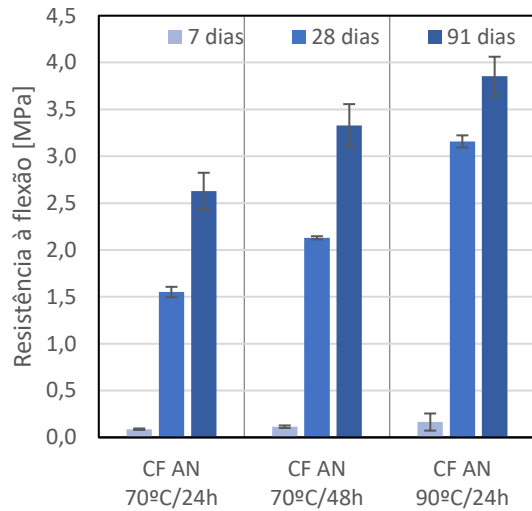


Figura 4.7 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CF AN

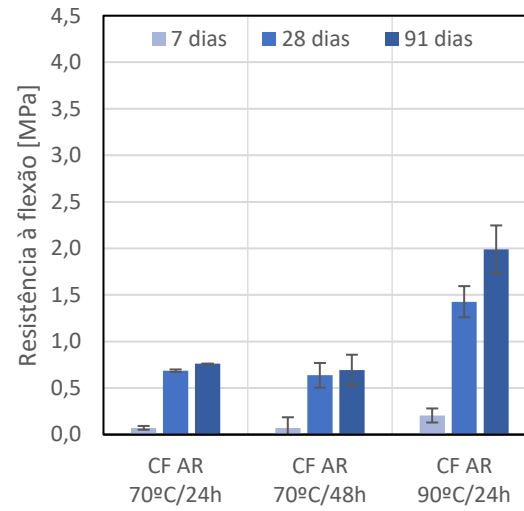


Figura 4.8 Relação entre a resistência à flexão e as diferentes condições de cura nas argamassas CF AR

Desse modo, com exceção das amassaduras discriminadas, as restantes vão ao encontro das conclusões de Fernandez-Jimenez et al. (2007). Os autores observaram, tal como na resistência à compressão, um crescimento gradual ao longo do tempo. Apesar de o AA utilizado na investigação ser composto por Na_2SiO_3 , a tendência verificada é equivalente. O uso de um AA composto ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$) fomenta a dissolução da sílica amorfa, bem como a promoção de um meio alcalino eficiente.

Em relação às condições de cura, como visto no subcapítulo 4.5.1, os resultados estão conforme os de Atiş et al. (2015). Para a mesma temperatura de cura, aquela que for durante um maior período delinea melhores capacidades resistentes; e, para o mesmo tempo de exposição, o que estiver sob temperatura superior tem um maior desenvolvimento das suas reações químicas. Assim, a variante que conduz a amassaduras mais resistentes é a quantidade de energia introduzida inicialmente, uma vez que as reações envolvidas são endotérmicas.

Neste subcapítulo, é possível identificar a cura a 90 °C durante 24 horas como a que conduziu a melhores valores para todas as hipóteses avaliadas. Este aspeto não corresponde, de igual modo, à resistência à compressão das

argamassas com CV. No subcapítulo 4.5.1, conclui-se que, quanto maior a quantidade de energia envolvida na mistura, melhores os valores obtidos e que, apenas a longo prazo, as misturas submetidas a 70 °C durante 48 horas como a 90 °C durante 24 horas se iriam equiparar. Neste parâmetro de estudo, as amassaduras a 90 °C durante 24 horas conduziram a maiores capacidades resistentes. Neste ensaio, não se alcançou melhores, ou semelhantes, capacidades resistentes nas amassaduras com AR em algumas idades ensaiadas, tal como aconteceu na resistência à compressão para CF-AN e CF-AR 90/24. Aos 28 dias, as argamassas CF-AR mostraram valores idênticos a 91 dias aos das CF-AN. Para a resistência à flexão, há uma progressão linear nos valores obtidos, similar à do subcapítulo anterior, quando se utiliza AN que não se verifica nos AR. Nas CFRSU, os AN permitem um desenvolvimento constante ao longo do tempo enquanto as misturas com AR tendem, numa fase inicial, a alcançar grande parte da sua resistência ao fim de 91 dias. Uma possível justificação advém das propriedades intrínsecas dos AR. Já foi mencionado que não é possível garantir que a água de compensação seja totalmente absorvida, pelo que os agregados podem absorver AA ao longo do processo de mistura. As argamassas REF mostraram valores de 5,3, 6,9 e 6,8 para 7, 28 e 91 dias, respetivamente. Ao confrontar estes valores com os obtidos na campanha experimental, é evidente que apenas as composições de CV com AN conseguem alcançar valores superiores ao de referência.

4.5.4 Módulo de elasticidade

Como referido no subcapítulo 3.5.3, inicialmente é necessário registar a massa para determinar a densidade aparente de cada provete. Os resultados obtidos na determinação da densidade aparente das argamassas ensaiadas são apresentados nas Figura 4.9 e Figura 4.10. Uma vez que o módulo de elasticidade corresponde à rigidez do material, é interessante confrontar os valores deste parâmetro com as respetivas densidades aparentes. Em anexo, na Tabela A.7, estão os valores do módulo de elasticidade para cada um dos provetes ensaiados ao longo da campanha experimental.

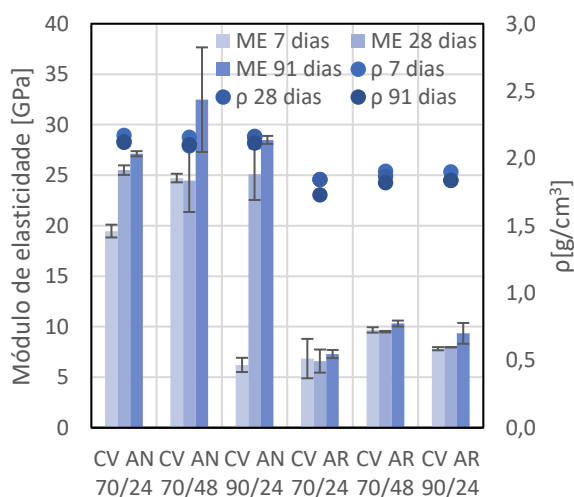


Figura 4.9 Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CV

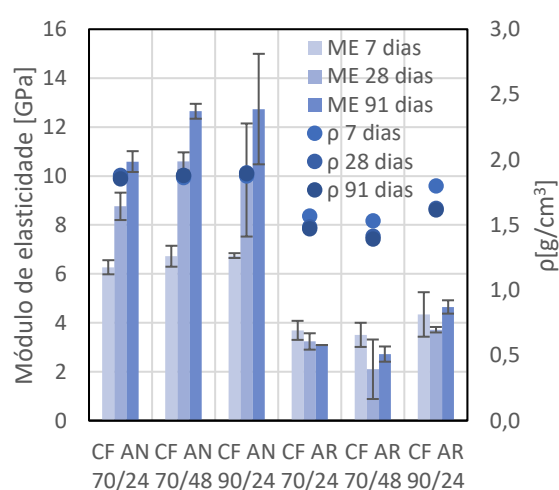


Figura 4.10 Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade das famílias com CFRSU

Observando as **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** figuras **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, verifica-se que, quanto maior a densidade aparente, maior o seu módulo de elasticidade. Para as CV, um decréscimo próximo de 12% em densidade aparente nas amassaduras CV-AR traduz uma diminuição de

quase 70% no parâmetro em análise. Por outras palavras, é possível confirmar a discrepância de valores ao introduzir AR na mistura. Tal comportamento deve-se às propriedades intrínsecas dos AR que criam uma pasta enfraquecida devido ao grande volume de vazios. Os valores obtidos para este ligante são coerentes com os resultados do subcapítulo 4.5.1, isto é, a amassadura que revelou melhor resposta foi a submetida a 70 °C durante 48 horas, tanto para AN como AR. Houve um aumento desproporcional no módulo de elasticidade de cada uma das misturas de 28 para 91 dias e a respetiva densidade aparente do provete diminuiu, embora não significativamente, devido à perda de água intersticial ao longo do tempo.

Para as CFRSU, este parâmetro revela uma melhor nitidez quanto ao seu crescimento gradual nas amassaduras com AN. Embora a densidade aparente destas misturas se mantenha constante entre condições de cura, o seu módulo de elasticidade revela as consequências da cura inicial. Assim, quando se submete os provetes a 90 °C durante 24 horas, estes desenvolvem melhor capacidade resistente. Este resultado está em concordância com o obtido no subcapítulo 4.5.1. Contudo, para menor temperatura mas durante mais tempo, os resultados ao longo do tempo tornam-se semelhantes. Para os AR, as cinzas não se relacionam do mesmo modo e não é possível confirmar nenhuma tendência certa. No entanto, a mistura que demonstra melhores resultados é equivalente.

Na Tabela 4.15, apresenta-se os valores para cada umas das amassaduras as três idades ensaiadas, e o respetivo desvio padrão. Excluiu-se o valor a 7 dias para CV-AN 90/24 (*outlier*) uma vez que não se encontra no mesmo intervalo de valores das famílias CV-AN. No entanto, não se encontra justificação plausível para este resultado visto que o procedimento entre todos os provetes ensaiados foi semelhante e os próprios não exibiam incoerências.

Tabela 4.15 Módulo de elasticidade de cada umas das famílias estudadas aos 7, 28 e 91 dias

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	0,70	25,1	2,56	28,5	0,39
CV AR 70/24	6,8	1,95	6,6	1,15	7,3	0,40
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	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	0,30
CF AN 90/24	6,7	0,10	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

Em relação à REF, os valores obtidos para 7, 28 e 91 dias foram 35,6, 38,4 e 40,7 MPa respetivamente. Uma vez mais, são as composições CV- AN que mais se aproximam dos valores de referência. As CFRSU com AN e AR apresentam um decréscimo cerca de 70 e 88% face aos valores da argamassa REF.

4.5.5 Retração

Na produção de betão, é usual a introdução de uma pequena fração de CV como parte de ligante devido à sua estabilidade química e dimensional que mitigam a retração da matriz cimentícia. Por conseguinte, é também necessário o estudo das composições com CFRSU para conhecimento da sua influência na estabilidade dimensional de MAA. Em contrapartida, no âmbito do ensaio, a reduzida rigidez dos AR é uma desvantagem e incrementa a variação dimensional dos materiais que os incorporam. O ensaio de retração foi realizado de acordo com o

descrito na norma LNEC E 398 (1993). A retração causada nas amassaduras compostas por CV e CFRSU está apresentada na Figura 4.11 e na Figura 4.12. Em anexo, na Tabela A.8, estão os valores correspondentes à variação dimensional das várias famílias estudadas na campanha experimental. Na representação gráfica houve um avanço de um dia nos resultados das famílias com uma duração de exposição de 48 uma vez que o segundo dia das famílias 70 °C / 24 horas e 90 °C / 24 horas equivale ao primeiro dia das famílias 70 °C / 48 horas. Assim, todas as famílias representam o seu valor para um dado dia do ensaio tornando-os equiparáveis.

Ao confrontar os resultados obtidos dos dois ligantes utilizados, CV e CFRSU, há uma maior dispersão nas composições de CFRSU, o que era inicialmente expectável. De acordo com Pera *et al.* (1997), justifica-se esta variação pela presença do alumínio e das respetivas reações de corrosão assim como a instabilidade física e química das cinzas. Quanto à adição de AR na sua mistura, ao comparar as condições de cura iniciais, a variação dimensional destas argamassas é superior. De acordo com a afirmação anterior, o expectável seria que todas as amassaduras de CF-AR apresentassem uma progressão superior em relação à CF-AN para as mesmas condições cura. No entanto, a família de CF-AN 90/24 corrobora esta afirmação e foge às conclusões do subcapítulo 4.5.4 sem justificação aparente. Se há uma discrepância entre os módulos de elasticidades de CF-AN e CF-AR 90/24 perto de 40%, o provável seria ocorrer o mesmo efeito na retração.

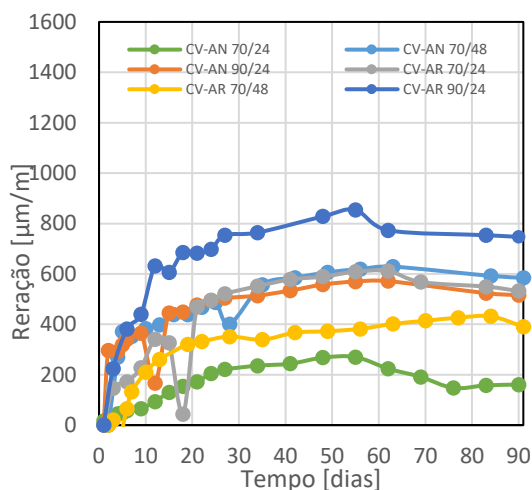


Figura 4.11 Retração das famílias com CV

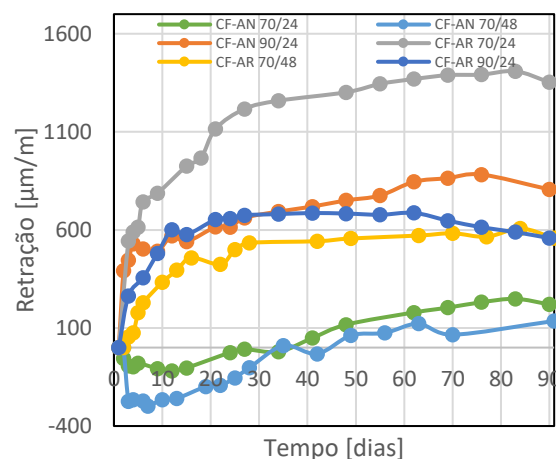


Figura 4.12 Retração das famílias com CFRSU

Por último, as CV têm melhores resultados face à retração devido à sua estabilidade dimensional e correta granulometria. O seu elevado grau de finura torna a porosidade da pasta mais fina, dificultando a saída de água da amassadura. No entanto, é relevante estudar a influência que os agregados têm nas amassaduras de CV, uma vez que algumas composições com AR se comportam melhor. O expectável seria que todas as composições com incorporação de AR apresentassem uma retração superior à das famílias com AN, independentemente das condições de cura impostas. Nas três condições de cura estudadas, apenas as amostras que foram submetidas a 90 °C/24 horas exibem curvas de acordo com essa tendência. Neno *et al.* (2014) afirmam que uma secagem excessiva do material, por causa do poder de absorção de água dos AR, resulta num aumento de retração. Por outras palavras, as propriedades intrínsecas dos AR (baixa densidade, porosidade) influenciam o comportamento do ligante utilizado. Não

há justificação plausível para a melhoria significativa das argamassas CV-AR 70/24 e CV-AR 70/24.

4.5.6 Carbonatação

Uma das principais causas da diminuição da durabilidade do betão armado é a sua carbonatação. Sendo as argamassas em estudo na presente investigação consideradas como um microbetão, é importante determinar o seu desempenho à carbonatação, de modo a compreender a influência das CV, CFRSU e dos ARF, tanto individualmente como em simultâneo. Em anexo, nas Tabelas A.9 e A.10, estão os valores obtidos dos ensaios de resistência à flexão e compressão aos 28 e 91 de carbonatação de todas as famílias.

Para a amostra REF, ao contrário dos dois ligantes ensaiados, que carbonataram na totalidade logo aos 28 dias, a frente de carbonatação correspondeu a 3,7 mm para 28 dias e 4,4 mm para 91 dias. Estes provetes também foram sujeitos aos ensaios de resistência à flexão e compressão de modo a ter um valor de comparação após as condições de cura do ensaio. Assim, para 28 dias, a mistura de referência atingiu 2,0 MPa para a flexão e 69,2 MPa para a compressão. Para 91 dias, estes resultados aumentaram para 2,2 e 71,1 MPa, respetivamente.

Uma vez que a 28 dias já era possível confirmar as conclusões de investigações anteriores, decidiu-se manter os provetes nas condições de acordo com a norma LNEC E391 (1993) e realizou-se os ensaios de resistência à flexão e compressão.

Nas Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16, apresenta-se os valores relativos à resistência à flexão. Através das figuras, é possível concluir que a tendência verificada no subcapítulo 4.5.1 não se reflete do mesmo modo quando os provetes estão sob as condições do ensaio de carbonatação. Contudo, continua-se a ocorrer menores valores quando as amassaduras são produzidas com AR. Em concordância com Zhu et al. (2019), ao substituir a fração de AN por AR, há uma redução da densidade da matriz, deixando-a mais suscetível à ação do CO₂ e a pasta aderida aos agregados garante os reagentes necessários para a carbonatação.

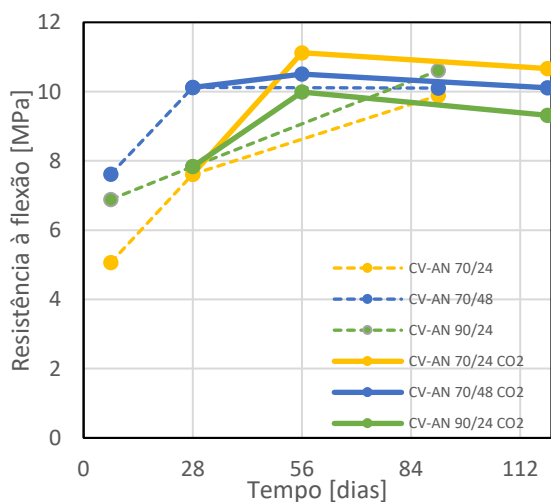


Figura 4.13 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AN

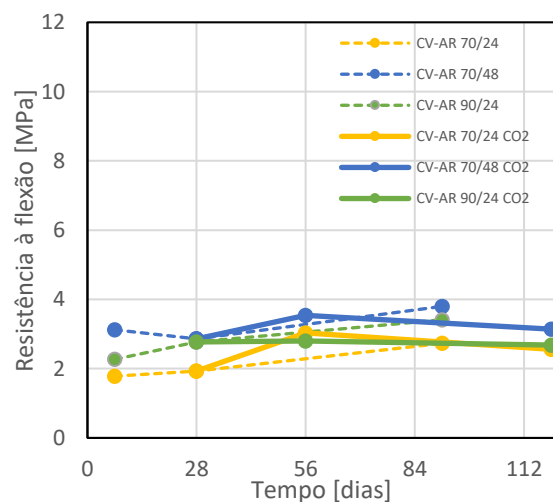


Figura 4.14 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AR

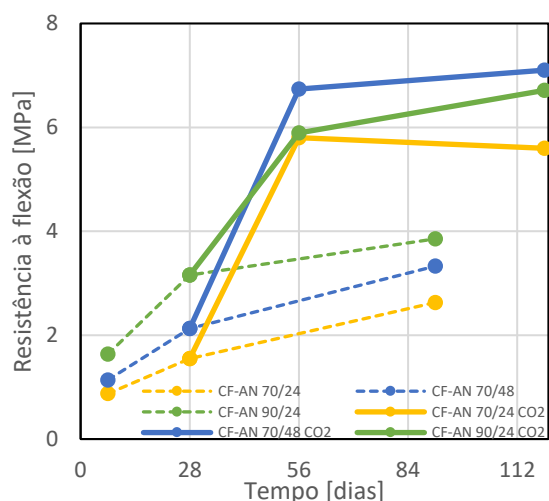


Figura 4.15 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AN

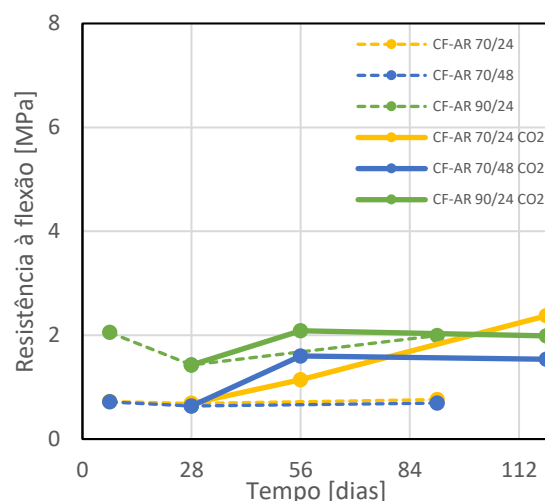


Figura 4.16 Relação entre a resistência à flexão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AR

Com exceção das CF-AN 70/24, CF-AN 70/48 e CF-AR 70/24, as restantes amassaduras avaliadas apresentaram um decréscimo entre as duas idades. Este pode ser justificado com base na microfissuração que está presente no interior do provete. Esta fissuração ocorre nas zonas carbonatadas, em volta das partículas que não reagiram, devido à retração que a carbonatação provoca. Após a ação da carbonatação, os resultados obtidos não vão ao encontro das conclusões retiradas para o ensaio de resistência à flexão. Para ambas as composições com o ligante de CV, a solução mais viável era através da opção que concedia maior quantidade energia ao sistema (70 °C/48 horas). Aqui apenas se valida o mesmo efeito para as amassaduras com AR, uma vez que, com os AN, observa-se o oposto. Por outras palavras, a melhor solução é aquela que traduz menor quantidade de energia, 70°C/24 horas, ao contrário do que seria expectável. Para o mesmo período de tempo, as amassaduras com menor temperatura resultaram em melhores valores e, para a mesma temperatura, o de menor duração é mais eficaz. É importante ter em consideração que nem todos os provetes de CV, AN e AR, foram submetidos do mesmo modo às condições da câmara de carbonatação. Na câmara de carbonatação em uso, devido à sua sobrelotação, os provetes não garantiram uma distância mínima entre eles durante todo o período de cura, de modo a que a difusão ocorresse por toda a superfície livre do provete. Sendo assim, os resultados obtidos podem não corresponder a valores de resistência corretos. Para as CFRSU, todos os valores obtidos após o ensaio da carbonatação foram superiores aos dos provetes não carbonatados avaliados à resistência à flexão a 7, 28 e 91 dias. Assim, é importante avaliar no futuro a ação da carbonatação acelerada para maiores capacidades resistentes.

Os valores da resistência à compressão são apresentados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20. Uma vez que os valores de resistência à flexão e compressão são correlacionáveis, era esperado um comportamento semelhante entre os dois parâmetros para cada uma das famílias. Por exemplo, para as famílias CV-AN, entre as duas idades estudadas houve um decréscimo na sua resistência à flexão contraditório com o incremento de resistência à compressão. Para ambos os ligantes, as amassaduras com AN desenvolveram-se significativamente em comparação com os provetes que foram ensaiados a 7, 28 e 91 dias e, em quase todas, houve um aumento entre as duas idades estudadas o que vai ao encontro do esperado. No entanto, é importante lembrar que não se deve

efetuar uma comparação direta entre as medições dos 28 e 91 dias do ensaio de carbonatação e de resistência à flexão e compressão. Na verdade, os 28 e 91 dias do ensaio de carbonatação equivalem a 56 e 119 dias nos ensaios de resistência mecânica. Os provetes sob as condições do ensaio em análise estão inicialmente 28 dias na câmara seca antes de serem colocados na câmara de carbonatação e é a partir desse instante que se vai avaliar os provetes nas idades pretendidas, 28 e 91 dias. A medição de carbonatação é realizada através da solução de fenolftaleína e representa-se em função da profundidade. Neste caso, todos os provetes aos 28 dias encontravam-se carbonatados e seria inconclusivo. Contudo, realizou-se o ensaio de resistência à compressão e flexão para todos os provetes e obteve-se resultados adicionais que geralmente não são recolhidos. Assim, nos gráficos apresenta-se as curvas de progressão da resistência à compressão para o ensaio realizado aos 7, 28 e 91 dias bem como o de carbonatação aos 28 e 91 dias.

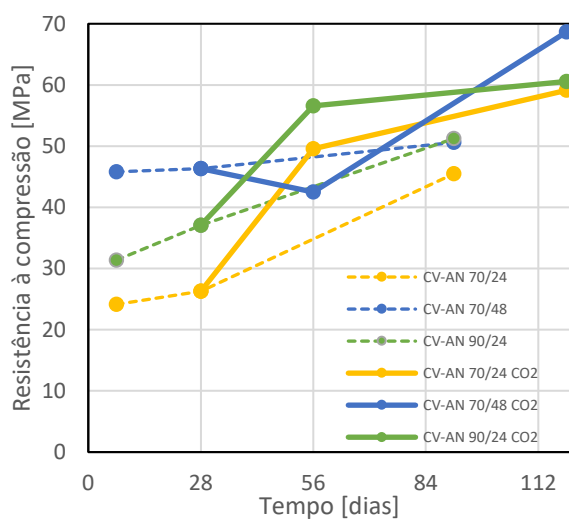


Figura 4.17 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AN

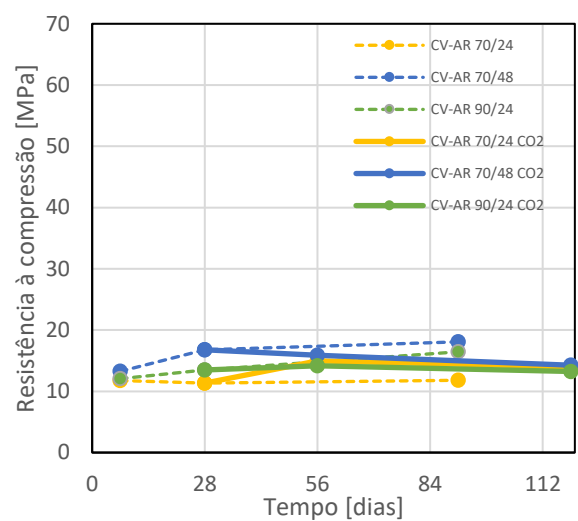


Figura 4.18 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CV-AR

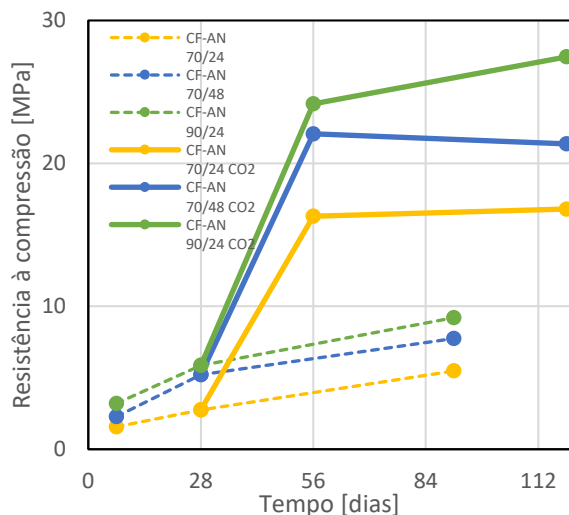


Figura 4.19 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AN

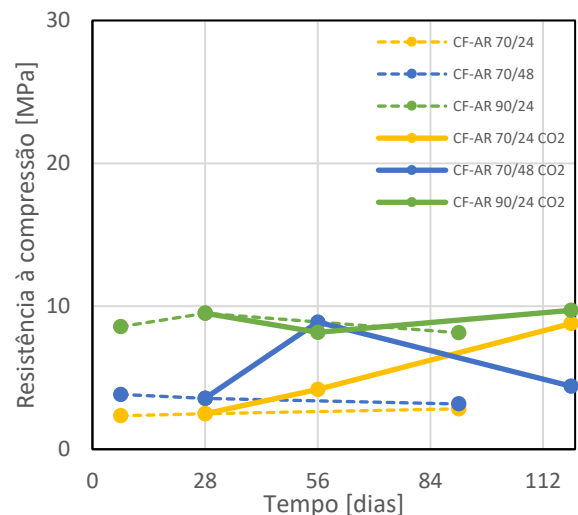
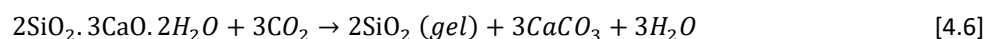
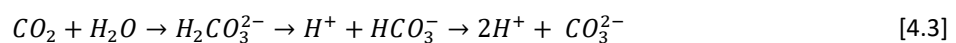


Figura 4.20 Relação entre a resistência à compressão a todas as idades ensaiadas das famílias das argamassas CF-AR

Tanto para a resistência à flexão como à compressão, as composições de destaque são as CF-AN que chegam a apresentar um aumento de cerca de 300% para a resistência à compressão. Este incremento advém das reações químicas

que se desenvolvem dentro da mistura, que se inicia com a dissolução do CO_2 (Equação 4.3). Posteriormente, dá-se início à reação com os hidróxidos de metais alcalinos, hidróxido de cálcio, assim como os silicatos e aluminatos do ligante (Equações 4.4, 4.5 e 4.6) (Simas, 2007). No interior do betão, o pH é elevado (aproximadamente 13) devido à dissociação de HCO_3^- em H^+ e CO_3^{2-} . O aumento de prótons confere acidez à solução intersticial da argamassa.

Os iões carbonato na presença de iões de cálcio da pasta irão formar os cristais de carbonato de cálcio. Este elemento pode apresentar-se sob três diferentes formas cristalinas, mas a mais corrente denomina-se de calcite. O processo de carbonatação desencadeia a diminuição de iões Ca^{2+} existentes na solução porosa, o que proporciona a dissolução do $Ca(OH)_2$ e, conseqüentemente, uma difusão do interior para a superfície de Ca^{2+} . Esta migração tende a equilibrar-se na frente de carbonatação onde a presença destes elementos é diminuída pela baixa solubilidade da $CaCO_3$. Por sua vez, esta migração conduz à precipitação do $CaCO_3$ em cristais que se alojam nos vazios da mistura, tornando-a mais densa e, assim, mais lenta a difusão do CO_2 . Por este motivo, as misturas que eram caracterizadas pela sua elevada porosidade, de ligante CFRSU, apresentam melhorias significativas após as condições de cura do ensaio de carbonatação. No entanto, é preciso ter em atenção que, para além de $CaCO_3$, a formação de gel de SiO_2 poderá ter um papel predominante no aumento da resistência mecânica da microestrutura (Li et al., 2018). Era expectável que com os AR também fosse visível essa melhoria, uma vez que com os AR há maior concentração de $Ca(OH)_2$ proveniente da pasta aderida aos agregados. A reação de carbonatação do $Ca(OH)_2$ pode finalizar-se ainda no decorrer do ensaio de carbonatação e, desse modo, inicia-se a reação inversa. Por outras palavras, finalizado este reagente, deixa de haver desenvolvimento da resistência mecânica e, ao longo do tempo, ocorre uma diminuição gradual. Contudo, também é provável que o $Ca(OH)_2$ presente nos AR já esteja totalmente carbonatado pelo que a sua adição não acrescenta uma melhoria na formação do $CaCO_3$.



No fim da campanha experimental foram realizados ensaios de DRX aos provetes de CFRSU, com ambos os agregados, correspondentes aos 91 dias dos ensaios mecânicos, com e sem a ação do CO_2 , com o intuito de observar diferenças nas fases cristalinas. Os diagramas DRX obtidos encontram-se nos anexos (Figuras A.3 e A.4).

4.5.7 Absorção de água por capilaridade

Tal como a carbonatação, a absorção por capilaridade é um parâmetro de interesse quanto à durabilidade do material. Em ambos, os resultados relacionam-se com a porosidade da mistura. Em anexo, nas Tabelas A.11 até A.22, estão os valores retirados ao longo do ensaio assim como o respetivo coeficiente. Como no subcapítulo 4.5.6, este parâmetro apresenta melhores resultados na REF. Para a absorção de água por capilaridade, o seu coeficiente para 3 horas corresponde a $0,01 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$. Na

Tabela 4.16, apresenta-se os coeficientes de absorção de água ao fim de 3 horas. Considerando apenas a influência dos ARF, tanto nas CV como nas CFRSU, os valores obtidos estão de acordo com as conclusões de Nuaklong et al. (2016). O pior comportamento face à absorção de água provém da baixa densidade dos AR que influenciam na

porosidade do material.

Tabela 4.16 Coeficientes de absorção de água e quantidade de massa de água absorvida ao fim de 72 horas

Misturas	C_{4320} [kg/(m ² .min ^{0,5})]	Desvio padrão	Massa de água absorvida em 72 horas [g]	Desvio padrão
CV AN 70/24	0,08	0,04	8,63	3,68
CV AN 70/48	0,10	0,10	11,08	6,74
CV AN 90/24	0,10	0,13	10,97	13,63
CV AR 70/24	0,19	0,06	20,31	6,46
CV AR 70/48	0,15	0,03	16,05	2,65
CV AR 90/24	0,17	0,05	17,67	5,44
CF AN 70/24	0,09	0,22	9,90	23,55
CF AN 70/48	0,08	0,14	7,95	14,94
CF AN 90/24	0,09	0,05	9,77	5,48
CF AR 70/24	0,21	0,14	21,60	14,94
CF AR 70/48	0,20	0,19	20,88	19,87
CF AR 90/24	0,17	0,17	18,03	18,12

Quanto aos dois ligantes utilizados, o expectável seria que os valores entre CV e CFRSU, independentemente do tipo de agregado utilizado, fossem distintos. No entanto, os valores são similares, chegando as CFRSU a apresentarem melhor comportamento face a este parâmetro. Os resultados do ensaio não podem ser considerados válidos para as argamassas de CFRSU. Através da Figura 4.21, é possível observar que os provetes tiveram uma perda de massa no decorrer da experiência. Este comportamento foi evidente nas famílias CF-AN enquanto, nas amassaduras CF-AR, esta perda foi inferior. Desse modo, os valores correspondentes a estas duas composições são indicativos e, dos quais, não é plausível retirar conclusões. Confrontando os valores tabelados com investigações anteriores, Leitão (2017), os resultados obtidos pelo autor, apenas com 50% de CFRSU como parte de ligante, são cinco vezes superiores.



Figura 4.21 Ensaio de absorção de água por capilaridade com as famílias de CF-AN e CF-AR

Por último, em relação às CV, os valores alcançados revelam a densidade da matriz e confirmam, uma vez mais, que, ao submeter os provetes a 70 °C durante 48 horas, obtém-se uma argamassa com melhor capacidade mecânica. A diferença entre esta condição de cura e os 90 °C durante 24 horas é desprezável e, uma vez mais, verificou-se o comportamento semelhante destas duas famílias a longo prazo.

5 Conclusões

5.1 Considerações finais

Nas últimas décadas, o setor da Construção tem desempenhado um papel importante nas economias europeias, nomeadamente em Portugal. Apesar da crise com que se tem vindo a confrontar, a Construção em Portugal voltou a crescer. Segundo o Eurostat, a produção neste setor subiu 1,8% entre os meses de dezembro de 2017 e 2018, 1,7% na Zona Euro e 2,0% na União Europeia (Eurostat, 2018). Em contrapartida, dado que a indústria da Construção gera grandes quantidades de emissões poluentes e consome grandes quantidades de recursos, o seu crescimento e desenvolvimento é prejudicial a nível ambiental. Assim, é fundamental para a sustentabilidade do setor que sejam estabelecidas alternativas que permitam tanto a redução dessas emissões, como a diminuição dos recursos consumidos. Por isso, é importante a existência de estudos e investigações que incentivem a reciclagem e reutilização dos materiais e que identifiquem possíveis materiais competitivos em termos de qualidade e custo face aos materiais tradicionais, mas cujo impacte seja inferior. É neste contexto que a presente investigação se insere. Ao longo do tempo, têm existido diversos estudos sobre a utilização de AR nos betões e argamassas devido à diminuição do impacte ambiental que a mesma provoca. Mais recentemente, iniciaram-se estudos relativamente aos polímeros inorgânicos ou materiais ativados alcalinamente e a utilização de diferentes ligantes, principalmente CV e escória, em conjunto com um ativador alcalino que traduzem desempenhos semelhantes aos de misturas produzidas com cimento Portland. Contudo, a grande inovação desta investigação é a utilização total de CFRSU como ligante de argamassa. Até à atualidade, os estudos referentes a este material focaram-se na substituição de agregados naturais ou então como fração parcial de ligante em argamassas e betões. Deste modo, pretendeu-se avaliar a viabilidade deste ligante auxiliado pela ativação alcalina, já conhecida para CV, em argamassas e determinar se esta inovação é competitiva com os materiais cimentícios tradicionais. A análise das argamassas incluiu a sua avaliação a nível mecânico e de durabilidade. Todos os parâmetros foram estudados com recurso a ensaios descritos em normas europeias, de modo a que haja possibilidade de comparação com outras investigações e reprodutibilidade por terceiros.

5.2 Conclusões gerais

A presente dissertação teve três fases principais distintas. A primeira, denominada Estado da arte, permitiu entender as conclusões das investigações anteriores, tanto quanto à utilização de ARF como de CV e CFRSU no processo de polimerização e, deste modo, refletir sobre os possíveis resultados que se pode obter com a utilização dos três materiais estudados. Na segunda parte, denominada Campanha experimental, foram descritos todos os procedimentos de cada ensaio, tendo em conta as normas europeias adotadas. Por último, na terceira parte, identificada como Resultados e discussão, foram apresentados e analisados todos os resultados obtidos, tendo sempre presente a comparação com os estudos já efetuados e referidos no Estado de arte.

Antes do início da campanha experimental, estabeleceu-se um limite específico de valores para a consistência da argamassa. Desse modo, para cada uma das composições estudadas, foi necessário adaptar o procedimento de mistura para obter a trabalhabilidade requerida. Numa fase anterior, foram realizados diversos testes com as

CFRSU em relação à quantidade de AA/I para que estas se enquadrassem no intervalo de consistência. O objetivo inicial era manter a relação AA/I para os dois ligantes estudados; no entanto, as CFRSU com uma relação de 0,50, mesmo com recurso a superplastificante, não respondiam da forma desejada. Deste modo, as composições que fossem sujeitas às mesmas condições de cura e de ligantes diferentes não poderiam ser comparadas uma vez que exibiriam graus de compactação diferentes. Assim, definiu-se uma relação de AA/I de 0,50 para as CV e 0,65 para as CFRSU. Daí resultou que o tempo de mistura entre os dois ligantes também foi distinto. A morfologia arredondada das partículas das CV ajudou a uma mistura homogénea e rápida com os agregados, ao contrário das CFRSU. Para ajudar a mistura das CFRSU, estas sofreram um processo de moagem com o fim de aumentar a sua reatividade e aproximarem-se da granulometria do cimento. Contudo, a presença do alumínio metálico provoca a libertação de hidrogénio e, por isso, foi necessário esperar mais 45 minutos além dos 15 minutos de mistura iniciais antes de se colocar a mistura das CFRSU nos moldes, de modo a evitar a formação de bolhas de gás após a compactação das argamassas. Esta particularidade apenas foi respeitada em misturas de CFRSU com NA, uma vez que com AR a mistura resultante apresentava de imediato a consistência inicialmente estabelecida. Para ambos os ligantes, os AR foram saturados durante os primeiros 10 minutos com o intuito de estes não absorverem AA devido à sua porosidade intrínseca. Tanto nas CV como nas CFRSU, a incorporação de AR provocou uma diminuição do seu espalhamento pelo fato de estes agregados terem um maior poder de absorção e por terem um formato mais irregular do que os AN.

No ensaio de massa volúmica, comprovou-se a melhoria da matriz das CFRSU após 1 hora de se ter começado a fazer a amassadura. O aumento deste valor em 5% demonstra que, ao longo desse período, houve uma libertação contínua de hidrogénio que capacitou uma mistura mais densa. Como no ensaio de consistência, da substituição dos AN por AR resultaram misturas menos densas devido à menor densidade destes agregados que é conferida pela pasta que têm aderida.

Relativamente às propriedades mecânicas, os ligantes responderam a cada um dos parâmetros analisados de forma distinta. Quanto à resistência à compressão e flexão, as soluções ótimas foram coerentes entre si. Nas CV, a condição de cura a 70 °C durante 48 horas revelou-se como a ideal. Uma vez que o processo da ativação alcalina tem como base uma reação endotérmica, ao traduzir as respetivas condições de cura em energia, esta opção era a que concedia maior quantidade de energia, sob a forma de calor, às misturas. No entanto, caso seja necessário reduzir o período a que a amassadura é submetida, ao aumentar a temperatura, também se consegue alcançar valores semelhantes a longo prazo, como se observou nas misturas submetidas a 90 °C/24h. Para as CFRSU e para uma temperatura mais elevada (90 °C) e durante um menor período de tempo (24 horas), foi possível produzir uma matriz mais resistente. É importante enfatizar que as CFRSU alcançaram valores inferiores aos das CV-AR, ou seja, este material ainda precisa de grandes melhorias para se tornar competitivo no mercado da Construção. Neste material, o mecanismo de reação é mais lento do que o das CV devido à baixa reatividade das partículas. Um aspeto inesperado foi a semelhança de resposta das amassaduras de CFRSU com AN e AR, algo que não era esperado, uma vez que a substituição por AR torna os provetes mais porosos devido às suas propriedades intrínsecas. Adicionalmente, nas argamassas com AR, a libertação inicial de bolhas de hidrogénio foi menos acentuada. A razão para este fenómeno não ficou clara e deverá ser investigado no futuro.

Para o módulo de elasticidade, uma vez mais, chegou-se às mesmas conclusões do que para a resistência à compressão e flexão. O módulo de elasticidade aumentou sempre até aos 90 dias exceto nas famílias de CF-AR 70/24 e 70/48, devido a complicações no desmolde. As condições de cura ideais para os ligantes, independentemente do tipo de agregados, foram a 70 °C/48 h para as CV, que introduz o maior valor de energia, e a 90 °C/24h para as CFRSU.

Ao nível da retração, os valores das CV corresponderam ao que era inicialmente esperado. As CV são conhecidas pela sua estabilidade química e dimensional de modo que mitigam a retração em misturas cimentícias convencionais. Em contrapartida, as CFRSU demonstram uma maior dispersão de resultados causada pela presença de alumínio e das reações de corrosão consequentes. Por isso, enfatiza-se a importância de remover a fração metálica das CFRSU com o fim de melhorar a sua estabilidade.

O estudo destas misturas face à carbonatação mostrou um comportamento positivo e uma possível alternativa capaz de melhorar a capacidade resistente destes dois ligantes. Ao fim de 28 dias, todas as misturas se encontravam totalmente carbonatadas. Contudo, ao avaliar o comportamento mecânico, verificou-se que, para a resistência à flexão, algumas argamassas com CV obtiveram um aumento próximo de 20% face às não carbonatadas, chegando a obter valores superiores às misturas de cimento. No caso das com CFRSU, este valor foi de 44%. Todavia, os resultados obtidos para as condições de cura que tinham sido estabelecidas como soluções ótimas para ambos os ligantes, 70 °C/48 horas para CV e 90 °C/24 horas para CFRSU, são incoerentes com os resultados neste parâmetro. Nas misturas com CV, aquelas curadas a 70 °C/24h demonstraram um melhor desenvolvimento da matriz e, nas CFRSU, foi a 70 °C/48h. A substituição total dos agregados por AR traduziu-se no aumento da porosidade das misturas. Apesar de promover a penetração do CO₂ na mistura, que se torna benéfico para o desenvolvimento da resistência mecânica da amassadura, os próprios AR são pouco densos e frágeis criando assim pontos menos resistentes no provete. Na resistência à compressão, apesar do aumento de todos os valores por comparação com os obtidos até aos 91 dias, as CFRSU com AN ocupam um lugar de destaque com um aumento perto de 300% com uma condição de cura ótima equivalente a 90 °C durante 24 horas.

Em suma, nas Tabela 5.1 e 5.2, apresentam-se as tendências verificadas ao longo da campanha experimental das CV e CFRSU em comparação com a argamassa de referência em quadros resumo. Para além de estarem representados os valores médios para cada um dos parâmetros, encontra-se uma seta que assinala o comportamento face à amassadura de referência: caso a cor da seta seja vermelha, significa que a família apresenta um pior comportamento por comparação à REF (diferença superior a 10%); em caso de laranja, o valor, embora inferior, é similar à argamassa de referência (diferença até 10%); por fim, em caso de cor verde, a respetiva família apresenta uma resposta superior à REF no parâmetro estudado (todos os casos que seja mais vantajoso e uma diferença superior a 10%).

Tabela 5.1 Quadro resumo das família de CV

	Referência	CV-AN 70/24	CV-AN 70/48	CV-AN 90/24	CV-AR 70/24	CV-AR 70/48	CV-AR 90/24
Espalhamento [mm]	223	189 ↓	178 ↓	189 ↓	149 ↓	149 ↓	159 ↓
Massa volúmica [g/dm ³]	2248		2260 ↗			1970 ↓	
Resistência à compressão, 7 dias [MPa]	43,9	24,1 ↓	45,8 ↗	31,4 ↓	11,7 ↓	13,3 ↓	12,1 ↓
Resistência à compressão, 28 dias [MPa]	55,2	26,3 ↓	46,3 ↓	37,5 ↓	11,3 ↓	16,8 ↓	13,5 ↓
Resistência à compressão, 91 dias [MPa]	66,2	45,5 ↓	50,6 ↓	51,2 ↓	11,8 ↓	18,1 ↓	16,4 ↓
Resistência à flexão, 7 dias [MPa]	5,3	5,07 ↗	7,62 ↗	6,89 ↗	1,78 ↓	3,12 ↓	2,27 ↓
Resistência à flexão, 28 dias [MPa]	6,9	7,62 ↗	10,12 ↗	7,83 ↗	1,93 ↓	2,86 ↓	2,77 ↓
Resistência à flexão, 91 dias [MPa]	6,8	9,88 ↗	10,10 ↗	10,61 ↗	2,73 ↓	3,80 ↓	3,41 ↓
Velocidade de Ultrassons, 7 dias [m/s]	4126	-	3597 ↓	2939 ↓	2341 ↓	2521 ↓	2132 ↓
Velocidade de Ultrassons, 28 dias [m/s]	4586	3613 ↓	3743 ↓	2632 ↓	1755 ↓	2181 ↓	2127 ↓
Velocidade de Ultrassons, 91 dias [m/s]	4565	3584 ↓	3813 ↓	3756 ↓	2439 ↓	2561 ↓	1972 ↓
Módulo de Elasticidade, 7 dias [GPa]	35,6	19,5 ↓	24,7 ↓	6,2 ↓	6,8 ↓	9,7 ↓	7,8 ↓
Módulo de Elasticidade, 28 dias [GPa]	38,4	25,5 ↓	24,5 ↓	25,1 ↓	6,6 ↓	9,5 ↓	8,0 ↓
Módulo de Elasticidade, 91 dias [GPa]	40,7	27,1 ↓	32,5 ↓	28,5 ↓	7,3 ↓	10,3 ↓	9,3 ↓
R. Compressão CO ₂ , 28 dias[MPa]	69,2	49,6 ↓	42,5 ↓	56,6 ↓	15,0 ↓	15,9 ↓	14,2 ↓
R. Compressão CO ₂ , 91 dias[MPa]	71,1	59,1 ↓	68,7 ↓	60,6 ↓	14,1 ↓	14,3 ↓	13,2 ↓
R.Flexão CO ₂ , 28 dias [MPa]	2,0	11,1 ↗	10,5 ↗	10,0 ↗	3,0 ↓	3,5 ↓	2,8 ↓
R.Flexão CO ₂ , 91 dias [MPa]	2,2	10,7 ↗	10,1 ↗	9,3 ↗	2,6 ↓	3,1 ↓	2,7 ↓
Abs. de água, 72 horas [kg/(m ² .min ^{0,5})]	0,01	0,08 ↓	0,10 ↓	0,10 ↓	0,19 ↓	0,15 ↓	0,17 ↓

Tabela 5.2 Quadro resumo das famílias de CFRSU

	Referência	CF-AN 70/24	CF-AN 70/48	CF-AN 90/24	CF-AR 70/24	CF-AR 70/48	CF-AR 90/24
Espalhamento [mm]	223	171/152 ↓	172/166 ↓	172/163 ↓	165 ↓	164 ↓	164 ↓
Massa volúmica [g/dm ³]	2248		1901/2004 ↓			1744 ↓	
Resistência à compressão, 7 dias [MPa]	43,9	1,6 ↓	2,3 ↓	3,2 ↓	2,3 ↓	3,8 ↓	8,6 ↓
Resistência à compressão, 28 dias [MPa]	55,2	2,8 ↓	5,2 ↓	5,9 ↓	2,5 ↓	3,6 ↓	9,5 ↓
Resistência à compressão, 91 dias [MPa]	66,2	5,5 ↓	7,7 ↓	9,2 ↓	2,8 ↓	3,2 ↓	8,1 ↓
Resistência à flexão, 7 dias [MPa]	5,3	0,87 ↓	1,14 ↓	1,64 ↓	0,72 ↓	0,71 ↓	2,05 ↓
Resistência à flexão, 28 dias [MPa]	6,9	1,55 ↓	2,13 ↓	3,16 ↓	0,69 ↓	0,64 ↓	1,43 ↓
Resistência à flexão, 91 dias [MPa]	6,8	2,63 ↓	3,33 ↓	3,85 ↓	0,76 ↓	0,69 ↓	1,99 ↓
Velocidade de Ultrassons, 7 dias [m/s]	4126	1982 ↓	2830 ↓	2068 ↓	1623 ↓	1543 ↓	2362 ↓
Velocidade de Ultrassons, 28 dias [m/s]	4586	2183 ↓	-	2379 ↓	1590 ↓	1860 ↓	2147 ↓
Velocidade de Ultrassons, 91 dias [m/s]	4565	-	-	-	-	-	-
Módulo de Elasticidade, 7 dias [GPa]	35,6	6,3 ↓	6,7 ↓	6,7 ↓	3,7 ↓	3,5 ↓	4,3 ↓
Módulo de Elasticidade, 28 dias [GPa]	38,4	8,8 ↓	10,6 ↓	9,8 ↓	3,2 ↓	2,1 ↓	3,7 ↓
Módulo de Elasticidade, 91 dias [GPa]	40,7	10,6 ↓	12,6 ↓	12,7 ↓	3, ↓	2,7 ↓	4,6 ↓
R. Compressão CO ₂ , 28 dias[MPa]	69,2	16,3 ↓	22,1 ↓	24,2 ↓	4,2 ↓	8,9 ↓	8,2 ↓
R. Compressão CO ₂ , 91 dias[MPa]	71,1	16,8 ↓	21,3 ↓	27,5 ↓	8,8 ↓	4,4 ↓	9,7 ↓
R.Flexão CO ₂ , 28 dias [MPa]	2,0	5,8 ↑	6,7 ↑	5,9 ↑	1,1 ↓	1,6 ↓	2,1 ↑
R.Flexão CO ₂ , 91 dias [MPa]	2,2	5,6 ↑	7,1 ↑	6,7 ↑	2,4 ↓	1,5 ↓	2,0 ↓
Abs. de água, 72 horas [kg/(m ² .min ^{0,5})]	0,01	0,09 ↓	0,08 ↓	0,09 ↓	0,21 ↓	0,20 ↓	0,17 ↓

5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros

A presente dissertação permitiu investigar a viabilidade da utilização de ARF e CV e CFRSU como parte ligante de argamassas que podem ser consideradas microbetões. Uma vez que a utilização de CFRSU como ligante de argamassas é um material inovador, existem diversas sugestões de trabalhos futuros de modo a aprofundar a investigação feita.

As propostas de futuros desenvolvimentos são as seguintes:

- análise de misturas com os ARF saturados na totalidade inicialmente para promover a reação do AA; na campanha experimental, apenas se introduziu a água de compensação equivalente à absorção após 10 minutos; contudo, não há certezas de que essa água tenha sido absorvida de modo equivalente por todas as partículas; assim, ao saturar na totalidade os AR, estes já não têm a capacidade de absorver o AA;
- analisar outras composições do AA utilizado; ao longo da dissertação, várias investigações revelaram a importância do rácio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ para fomentar as reações intrínsecas da mistura;
- submeter as CFRSU a tratamentos específicos para retirar a fração metálica e, desse modo, tentar reduzir a formação de bolhas de hidrogénio e criar uma matriz mais densa;
- avaliar outras condições de cura, tanto a nível da temperatura como o tempo de exposição dos provetes;
- submeter as CFRSU a um processo de carbonatação acelerada; apesar de estas cinzas se apresentarem totalmente carbonatadas ao fim de 28 dias, a nível da capacidade resistente demonstrou resultados significativamente superiores que evoluíram até aos 91 dias;
- avaliar outros ligantes que reúnam as características necessárias da ativação alcalina; este mecanismo de reação está em expansão e conseguiu-se confirmar o seu poder nas duas tipologias de cinzas estudadas que por si só não tinham a capacidade de formar uma matriz resistente.

Referências

- Ambiente, 2019. Resíduos de Construção e Demolição. Disponibilizado em www.apambiente.pt (data de acesso 5/05/2019)
- Angulo-Ramírez, D.E., Mejía de Gutiérrez, R., Puertas, F., 2017. Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Construction and Building Materials* 140, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092>
- Antoni, Satria, J., Sugiarto, A., Hardjito, D., 2017. Effect of variability of fly ash obtained from the same source on the characteristics of geopolymer. *MATEC Web Conference* 97, 01026. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20179701026>
- Atiş, C.D., Görür, E.B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., Luga, E., 2015. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials* 96, 673–678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>
- Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A.Q., Collepardi, M., 2004. MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement Concrete Research*. 34, 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.001>
- Boca Santa, R.A.A., Kessler, J.C., Soares, C., Riella, H.G., 2018. Microstructural evaluation of initial dissolution of aluminosilicate particles and formation of geopolymer material. *Particuology* 41, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.12.007>
- Brito, J. de, 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. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4286.0566>
- Che Amat, R., Ismail, K.N., Mohamed Noor, N., Mohamad Ibrahim, N., 2017. The effects of bottom ash from MSWI used as mineral additions in concrete. *MATEC Web Conference* 97, 01053. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20179701053>
- Chen-Tan, N.W., Riessen, A. van, 2009. Determining the reactivity of a fly ash for production of geopolymer. *American Ceramic Society*. 92, 881–887. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.02948.x>
- Cheng, A., 2012. Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. *Materials and Design* 36, 859–864. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.003>
- Chimenos, J.M., Segarra, M., Fernández, M.A., Espiell, F., 1999. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials* 64, 211–222. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00246-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00246-5)
- Criado, M., Palomo, A., Fernández-Jimenez, A., 2005. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel* 84, 2048–2054. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>
- Atis, C.D., Gorur, E.B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., Luga, E., 2015. Very high strength (120 MPa) class F fly

ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials* 96, 673-678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>

Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M.A., Serna, P., Castaño-Tabares, J.O., 2009. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23, 2545–2553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018>

Elyamany, H.E., Abd Elmoaty, A.E.M., Elshaboury, A.M., 2018. Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. *Construction and Building Materials* 187, 974–983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.025>

Eurostat, 2018. Waste statistics in Europe. Disponibilizado em epp.eurostat.ec.europa.eu (data de acesso 5/05/2019)

Evangelista, L., de Brito, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* 29, 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>

Fang, G., Ho, W.K., Tu, W., Zhang, M., 2018. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials* 172, 476–487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008>

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.083>

Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., Palomo, A., 2007. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science* 42, 3055–3065. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0584-8>

Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T., 2018. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. *Engineering Structures* 157, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.015>

Huank, G., Ji, Y., Li, J., Zhang, L., Liu, X., Liu, B., 2019. Effect of activated silica on polymerization mechanism and strength development of MSWI bottom ash alkali-activated mortars. *Construction and Building Materials* 201, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.125>

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., Rangan, B.V., 2015. Fly ash-based geopolymer concrete. *Australian Journal of Structural Engineering* 6(1), 77-86. <https://doi.org/10.1080/13287982.2005.11464946>

Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding Y., Ling, T.C., Zhang, H., Wang, Y., 2018. Durability of recycled aggregate concrete- A review. *Cement and Concrete Composites* 89, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>

Topçu, I.B., Toprak, M.U., Uygunoglu, T., 2014. Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production* 81, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.037>

- Garcia-Lodeiro, I., Carcelen-Taboada, V., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., 2016. Manufacture of hybrid cements With fly ash and Bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Construction and Building Materials* 105, 218–226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.079>
- Jurič, B., Hanžič, L., Ilić, R., Samec, N., 2006. Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management* 26, 1436–1442. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.016>
- Khatib, J.M., 2005. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* 35, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.01>.
- Behfarnia, K., Rostami, M., 2017. An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete. *Journal of Cleaner Production* 157, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.097>
- Kurda, R., de Brito, J., Silvestre, J.D., 2019. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. *Cement and Concrete Composites* 95, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.004>
- Leitão, J., 2017. Misturas binárias de betão auto-compactável com incorporação de cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 159 p.
- Li, Z., He, Z., Shao, Y., 2018. Early age carbonation heat and products of tricalcium silicate paste subject to carbon dioxide curing. *Materials*. 11. <https://doi.org/10.3390/ma11050730>
- López, M., Beltrán, M.G., Cabrera, M., Agrela, F., Rosales, J., 2017. Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. *Journal of Cleaner Production* 154, 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024>
- Braga, M., de Brito, J., Veiga, R., 2012. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials* 36, 960–968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031>
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L., 2015. Durability performance of concrete With recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials* 77, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.075>
- Saikia, N., Mertens, G., Balen, K.V., Elsen, J., Gerven, T.V., Vandecasteele, C., 2015. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilization in cement mortar. *Construction and Building Materials* 96, 76–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.185>
- 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, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>

- Neno, C., Brito, J. De, Veiga, R., 2014. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials Research* 17(1), 168-177. [http:// dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000164](http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000164)
- Nørgaard, 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 CO₂ level. *Waste Management* 85, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.019>
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P., 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production* 112, 2300–2307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.109>
- Olivia, Monita, Sarker, P.K., Olivia, M., 2008. Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete durability related properties of fly ash based geopolymer concrete view project soil slope stability techniques: A comprehensive analysis view project water penetrability of low calcium fly ash. *International Conference on Construction and Building Technology* 46, 517-530. <https://www.researchgate.net/publication/267995738>
- Omary, S., Ghorbel, E., Wardeh, G., Nguyen, M.D., 2018. Mix design and recycled aggregates effects on the concrete's properties. *International Journal of Civil Engineering* 16, 973–992. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0247-y>
- Pedro, D., de Brito, J., Evangelista, L., 2017. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials* 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>
- Rangan, B. V, 2008. Fly ash-based geopolymer concrete. Curtin University of Technology, 1-44.
- Rodrigues, F., Evangelista, L., de Brito, J., 2013. A new method to determine the density and Water absorption of fine recycled aggregates. *Materials Research*, 16(5), pp. 1045–1051
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials* 47, 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Kenai, S., 2018. Recycled aggregates. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. : <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00003-1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.046>
- Sanjayan, J., Rajeev, P., Berndt, M., Pasupathy, K., Cheema, D.S., 2018. Durability Performance of Precast Fly Ash–Based Geopolymer Concrete under Atmospheric Exposure Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30, 04018007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002165](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002165)
- Severo, C.G.S., Costa, D.L., Bezerra, I.M.T., Menezes, R.R., Neves, G.A., 2013. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais. e Processos* 82, 55–67.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Shi, X.S., Collins, F.G., Zhao, X.L., Wang, Q.Y., 2012. Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *Journal of Hazardous Materials* 237–238, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.070>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>
- Silva, R. V., De Brito, J., Dhir, R.K., 2016. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials* 105, 400–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Silva, R. V., de Brito, J., Lynn, C.J., Dhir, R.K., 2019. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
- Simas, M. da S., 2007. Sistemas de protecção do betão face à carbonatação. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, 81
- Torii K., Kawamura M, 1991. Effective utilization of coal ashes in road construction. *Studies in Environmental Science* 48, 561–568.
- Whittaker, M., Taylor, R., Li, Q., Li, S., Black L., 2009. The behaviour of finely ground bottom ash in Portland cement. 29th Cement and Concrete Science Conference
- Xiao, J., 2018. Recycled aggregates, em *Recycled Aggregate Concrete Structures*, Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, 39–63. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3_3
- Xu, G., Shi, X., 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. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>
- Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B., 2014. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites* 46, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>
- Zhu, P., Chen, K., Hu, K., 2019. Carbonation behavior of repeated recycled fine aggregate concrete under bending

load. KSCE Journal of Civil Engineering 23, 729–736. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0348-4>

NormasLNEC E 391, 1993. Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Especificação Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-393, 1993. Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Especificação Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-398, 1993. Betões. Determinação da retração e da expansão, Especificação Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

ASTM 1876, 2010. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, American Society for Testing and Materials (ASTM), Estados Unidos da América.

EN 1015-1, 1998. Methods of test for mortar for masonry - Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis), Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 1015-3, 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 1015-6, 1998. Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 1015-11, 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 1097-3, 1998. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids, Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

EN 12504-4, 2004. Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, Comité Européu de Normalização (CEN), Bruxelas, Bélgica.

ANEXOS

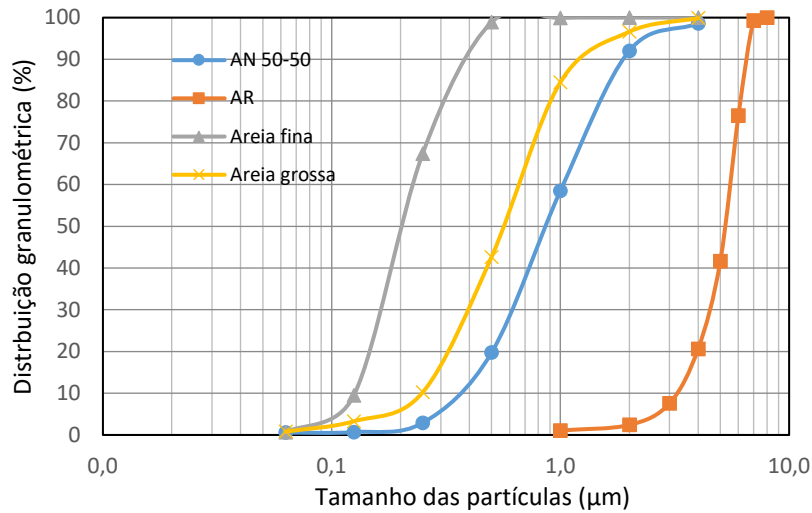


Figura A.1 Curva granulométrica da areia fina, areia grossa, 50%-50% agregados naturais e AR

Tabela A.1 Ensaio da balança hidrostática para se calcular a absorção de água aos 10 minutos dos AR

Massa inicial [gr]	1138.4		
WA [%], 24h	9		
Meq [gr]	2113		
Tempo (min)	Massa (g)	M _{sub}	W _{asub}
0	2551,6	438,6	0,0%
2	2207,0	94,0	-873,0%
4	2209,0	96,0	-867,9%
6	2431,0	318,0	-305,6%
8	2493,0	380,0	-148,5%
10	2584,0	471,0	82,0%
15	2590,0	477,0	97,2%
20	2590,0	477,0	97,2%
25	2590,0	477,0	97,2%
30	2590,0	477,0	97,2%
40	2590,0	477,0	97,2%
50	2590,0	477,0	97,2%
60	2590,0	477,0	97,2%
75	2590,0	477,0	97,2%
90	2590,0	477,0	97,2%
105	2590,8	477,8	99,2%
120	2590,8	477,8	99,2%
180	2590,9	477,9	99,5%
240	2590,9	477,9	99,5%
300	2591,0	478,0	99,7%
360	2591,0	478,0	99,7%
420	2591,0	478,0	99,7%
480	2591,0	478,0	99,7%
540	2591,0	478,0	99,7%
1440	2591,1	478,1	100,0%

Tabela A.2 Valores dos ensaios do estado fresco (espalhamento e massa volúmica) das CV com AN e AR

Cinzas Volantes [CV]	Agregados Naturais	70°C/24h	Espalhamento [mm]					Massa Volúmica [gr]					
			Valores				Valor Médio	Desvio Padrão	M2		M1	Valor Final	Desvio Padrão
Cinzas Volantes [CV]	Agregados Naturais	70°C/24h	188	186	NA	NA	189	2,1	3478		1180	2260	38,1
			193	189	NA	NA			3402				
			189	188	NA	NA			3440				
		70°C/48h	178	176	NA	NA	178	1,2	3420		1180	2232	8,0
			178	179	NA	NA			3404				
			179	179	NA	NA			3412				
	90°C/24h	192	185	NA	NA	189	4,3	3463		1180	2289	5,6	
		191	186	NA	NA			3474					
		196	184	NA	NA			3469					
	Agregados Reciclados	70°C/24h	154	NA	147	153	149	5,6	3110	3127	1180	1939	6,9
			150	NA	145	156			NA	3119			
			154	NA	139	142			3119				
		70°C/48h	159	152	139	141	149	7,0	3150	3174	1180	1978	14,9
			162	149	143	146			3138	3170			
			155	152	141	146			3158				
		90°C/24h	166	149	164	160	159	5,9	3181	3206	1180	1995	26,6
			162	150	164	159			3180	3133			
			160	148	162	158			3175				

Tabela A.3 Valores dos ensaios do estado fresco (espalhamento e massa volúmica) das CFRSU com AN e AR

Cinzas de Fundo [CFRSU]	Agregados Naturais	70°C/24h	Espalhamento [mm]											Massa Volúmica [gr]																
			Após amassadura					Valor Médio	Desvio Padrão	Após 1 hora					Valor Médio	Diferença [%]	Desvio Padrão	M _{2, após amassadura}			M _{1, após amassadura}	Valor Final	Desvio Padrão	M _{2, após 1 hora}			M _{1, após 1 hora}	Valor Final	Diferença [%]	Desvio Padrão
Cinzas de Fundo [CFRSU]	Agregados Naturais	70°C/24h	176	166	174	159	176	171	6	NA	143	160	147	157	152	-11	8,1	3218	2999	3036	1180	1880	107	-	3171	3142	1180	1990	6	22,9
			178	166	177	162	175			NA	143	163	142	157				2912	3137	NA				-	3198	-				
			175	165	179	162	172			NA	142	162	150	161				3060						3170						
		70°C/48h	177	178	188	187	164	177	8	171	164	181	165	147	166	-7	9,6	3158	3006	3060	1180	1888	51	3147	3167	3186	1180	1987	5	27,6
			175	177	184	182	160			167	160	177	167	149				3035	3083	NA				3128	3207	-				
			174	179	188	183	166			172	168	177	165	152				3068						3167						
	90°C/24h	184	175	168	165	NA	172	7	169	166	154	153	NA	163	-5	6,9	3146	3127	NA	1180	1934	46	3226	3232	-	1180	2036	5	29,6	
		183	179	165	165	NA			173	166	160	158	NA				3035	3147	NA				3240	3165	-					
		175	173	165	166	NA			175	161	160	157	NA				3114						3216							
	Agregados Reciclados	70°C/24h	174	165	167	NA	148	165	10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	3002	2783	2863	1180	1722	75	-	-	-	-	-	-	-
			183	165	168	NA	152			NA	NA	NA	NA	NA				NA	2912	2952				-	-	-				
			178	163	166	NA	150			NA	NA	NA	NA	NA				2902						-						
		70°C/48h	163	163	171	154	170	164	6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	2971	2810	2920	1180	1719	47	-	-	-	-	-	-	-
			166	166	175	153	167			NA	NA	NA	NA	NA				2900	2898	2894				-	-	-				
			165	162	170	153	166			NA	NA	NA	NA	NA				2899						-						
	90°C/24h	176	169	155	-	-	164	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	2943	3047	NA	1180	1792	58	-	-	-	-	-	-	-	
		173	166	152	-	-			NA	NA	NA	NA	NA				2896	3004	NA				-	-	-					
		172	164	153	-	-			NA	NA	NA	NA	NA				2972						-							

Tabela A.4 Valores medidos para todas as composições para os 7 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes

	Massa [gr]		Resistência à flexão [KN]			Resistência à compressão [KN]		Velocidade de ultrassons [m/s]	
	Valores [gr]	Valor Médio	Valores	Desvio Padrão	Valor Médio	Valores	Valores	Valor Médio	
CV AN 70°C/24h	557,85	555,75	2,49	0,24	2,16	46,51	34,70	-	NA
	553,75		2,09			38,51	31,68	-	
	555,65		1,91			39,37	41,02	-	
CV AN 70°C/48h	542,1	551,80	3,031	0,16	3,25	75,4	76,89	3645	3596,67
	559,7		3,415			70,34	69,36	3712	
	553,6		3,305			75,14	72,61	3433	
CV AN 90°C/24h	555,7	553,53	2,855	0,07	2,94	46,97	47,97	2855	2938,67
	553,5		3,016			50,64	51,88	3016	
	551,4		2,945			52,24	51,5	2945	
CV AR 70°C/24h	473	471,5	-	0,20	0,76	17,99	17,76	2454	2341,33
	476,7		0,563			9,37 ⁽¹⁾	9,38	2171	
	464,7		0,958			18,74	20,62	2399	
CV AR 70°C/48h	478,3	487,2	1,447	0,11	1,33	26,34	27,63	2492	2521,33
	488,7		1,184			21,67	19,43	2516	
	494,5		1,362			17,1	15,11	2556	
CV AR 90°C/24h	488,6	485,9	0,907	0,05	0,97	19,77	19,52	1990	2132,67
	481,7		1,04			19,96	17,92	2189	
	487,4		0,956			18,67	19,96	2219	
CF AN 70°C/24h	474,2	476,5	0,384	0,01	0,37	3,39	3	2010	1982,00
	473,1		0,369			2,24	2,16	1958	
	482,1		0,366			2,29	2,03	1978	
CF AN 70°C/48h	478,4	476,6	0,478	0,01	0,49	3,8	3,51	1935	1830,33
	481,3		0,475			3,37	3,61	1598	
	470,1		0,505			3,97	3,7	1958	
CF AN 90°C/24h	494,6	479,6	0,639	0,09	0,70	4,96	5,22	2028	2067,67
	467,7		0,627			4,76	4,52	2108	
	476,4		0,827			5,47	5,86	2067	
CF AR 70°C/24h	407,4	401,0	0,324	0,02	0,31	3,65	3,59	1651	1622,67
	398,1		0,323			3,71	3,93	1602	
	397,6		0,28			3,74	3,88	1615	
CF AR 70°C/48h	388	391,7	0,143	0,11	0,30	5,83	6,43	1342	1542,67
	398,6		0,393			6,58	6,66	1621	
	388,6		0,378			5,44	5,9	1665	
CF AR 90°C/24h	457,4	460,2	0,883	0,08	0,88	13,28	13,27	2346	2362,00
	461,3		0,779			13,67	13,87	2428	
	462		0,964			14,42	13,84	2312	

(1) os valores referentes a este provete não foram considerados na média

Tabela A.5 Valores medidos para todas as composições para os 28 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes

	Massa [gr]		Resistência à flexão [KN]		Resistência à compressão [KN]		Velocidade de ultrassons [m/s]	
	Valores [gr]	Valor Médio	Valores	Valor Médio	Valores	Valor Médio	Valores	Valor Médio
CV AN 70°C/24h	548,10	544,77	3,52	3,25	42,26	44,02	3579,00	3613,00
	535,90		3,27		50,44	46,66	3712,00	
	550,30		2,97		42,62	35,45	3548,00	
CV AN 70°C/48h	528,7	535,23	4,894	4,32	76,73	73,33	3730	3743,33
	547,4		3,671		74,20	73,24	3770	
	529,6		4,39		75,45	75,70	3730	
CV AN 90°C/24h	531,5	552,33	3,414	3,34	57,74	57,86	2443	2632,00
	547,55		3,406		60,44	58,53	3049	
	577,95		3,206		59,3	61,62	2404	
CV AR 70°C/24h	480,8	471,5	1,123	0,82	20,87	20,64	1164	1755,00
	472,9		0,778		15,11	15,96	1942	
	460,8		0,57		10,48 ⁽¹⁾	10,69	2159	
CV AR 70°C/48h	477,1	477,5	1,18	1,22	27,4	25,45	1954	2181,00
	484		1,064		28,1	25,12	2339	
	471,4		1,258		26,2	28,8	2250	
CV AR 90°C/24h	466,5	470,6	1,417	1,18	19,43	21,96	2102	2126,67
	461,3		1,004		23,03	21,83	2142	
	484		1,13		21,31	21,9	2136	
CF AN 70°C/24h	464,9	480,9	0,68	0,66	3,89	4,24	2305	2183,33
	490,7		0,719		3,98	4,33	2086	
	487,1		0,586		5,34	4,69	2159	
CF AN 70°C/48h	480	480,4	0,909	0,91	7,24	8,61	-	-
	480,7		0,929		8	8,79	-	
	480,4		0,888		8,14	9,32	-	
CF AN 90°C/24h	497,7	486,0	1,345	1,35	9,85	9,63	2477	2379,00
	473,8		1,428		9,6	10,33	2552	
	486,5		1,27		8,84	8,02	2108	
CF AR 70°C/24h	384,1	379,9	0,276	0,29	4,27	4,33	1623	1589,67
	386,1		0,292		3,95	4,17	1638	
	369,4		0,31		3,21	3,92	1508	
CF AR 70°C/48h	346,6	361,7	0,459	0,27	2,46 ⁽³⁾	2,37	1878	1860,67
	359,7		0,189		2,59	2,64	1800	
	378,9		0,167		4,77	6,65	1904	
CF AR 90°C/24h	396,3	416,4	0,476	0,61	9,63 ⁽²⁾	9,87	2086	2147,33
	408,9		0,845		15,36	15,07	2346	
	443,9		0,506		8,57	8,39	2010	

(1) certos moldes desta família foram difíceis de desmoldar e ficou massa nos respectivos moldes deixando os moldes com deficiências

(2) foram os últimos moldes a serem feitos e houve dificuldades na sua descofragem

(3) falhas de amassadura e houve também uma amassadura em que os valores do espalhamento foram inferiores aos restantes

Tabela A.6 Valores medidos para todas as composições para os 91 dias de resistência à flexão e compressão, velocidade de ultrassons e massa para a densidade dos provetes

	Densidade		Resistência à flexão [KN]		Resistência à compressão [KN]		Velocidade de ultrassons [m/s]		
	Valores [gr]	Valor Médio	Valores	Valor Médio	Valores		Valores	Valor Médio	
CV AN 70°C/24h	539,50	542,37	4,29	4,22	75,05	71,15	72,78	3620,00	3584,00
	544,30		3,95		72,42	72,51		3661,00	
	543,30		4,41		74,63	71,28		3471,00	
CV AN 70°C/48h	530,3	538,03	4,291	4,31	82,72	83,66	80,97	3774	3812,67
	550,1		4,596		81,51	78,01		3960	
	533,7		4,04		80,3	79,6		3704	
CV AN 90°C/24h	535,65	541,12	4,812	4,53	82,05	82,23	81,99	3893	3756,33
	549,1		4,324		77,56	79,6		3756	
	538,6		4,44		82,72	87,76		3620	
CV AR 70°C/24h	453,8	442,6	1,165	1,17	17,6	15,07	18,89	2439	2439,00
	431,3		0,791 ⁽¹⁾		20,72	22,15		1810 ⁽³⁾	
	-		-		-	-		-	
CV AR 70°C/48h	462	465,7	1,403	1,62	29,6	29,27	28,92	2524	2561,00
	470,7		1,661		26,9	28,34		2532	
	464,3		1,797		29,08	30,34		2627	
CV AR 90°C/24h	478,6	469,4	1,756	1,46	26,5	27,27	26,31	1990	1972,00
	479,2		1,481		27,93	26,36		1954	
	450,5		1,128		25,21	24,61		1885 ⁽⁴⁾	
CF AN 70°C/24h	468,3	473,9	1,068	1,12	7,46	8,24	8,77	466	495,00
	474		1,189		9,2	9,66		469	
	479,5		1,109		8,83	9,2		550	
CF AN 70°C/48h	476,7	481,2	1,348	1,42	11,83	13,37	12,40	655	636,67
	487,4		1,544		12,75	11,38		634	
	479,5		1,369		12,06	13		621	
CF AN 90°C/24h	484,5	484,4	1,594	1,64	15,21	14,85	14,73	687	663,33
	488,7		1,679		14,46	16,34		662	
	480,1		1,66		14,05	13,46		641	
CF AR 70°C/24h	378,2	376,3	0,33	0,32	4,63	5	4,53	287 ⁽⁴⁾	354,00
	374,3		0,319		4,22	4,25		354	
	-		-		-	-		-	
CF AR 70°C/48h	364,2	356,1	0,246	0,30	5,51	6,32	5,07	349	346,00
	347,4		0,272		2,6 ⁽²⁾	3,19 ⁽²⁾		343	
	356,7		0,371		4,22	4,23		410 ⁽⁴⁾	
CF AR 90°C/24h	427,8	413,5	0,885	0,85	14,88	12,87	13,04	541	533,33
	406,4		0,885		12,21	12,91		524	
	406,2		0,777		12,62	12,74		535	

- (1) falha da máquina; o ensaio foi feito a uma velocidade elevada
 (2) provete com falha de massa e demasiado poroso em comparação com as outras amostras
 (3) uma das faces apresentava-se irregular
 (4) provete com falta de pasta no canto ('valor falso')

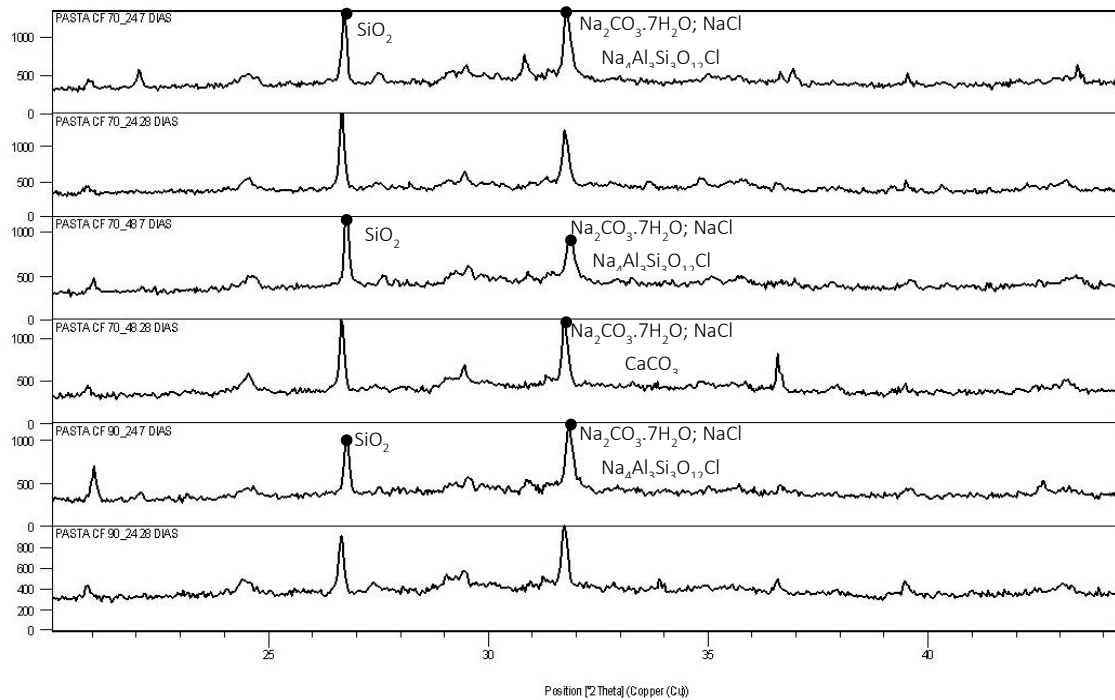


Figura A.2 Análise DRX das pastas de CFRSU; NaCl (halite); SiO₂ (quartzo); Na₄Al₃Si₃O₁₂Cl (sodalite); Na₂CO₃·7H₂O (carbonato de sódio hidratado); CaCO₃ (calcite)

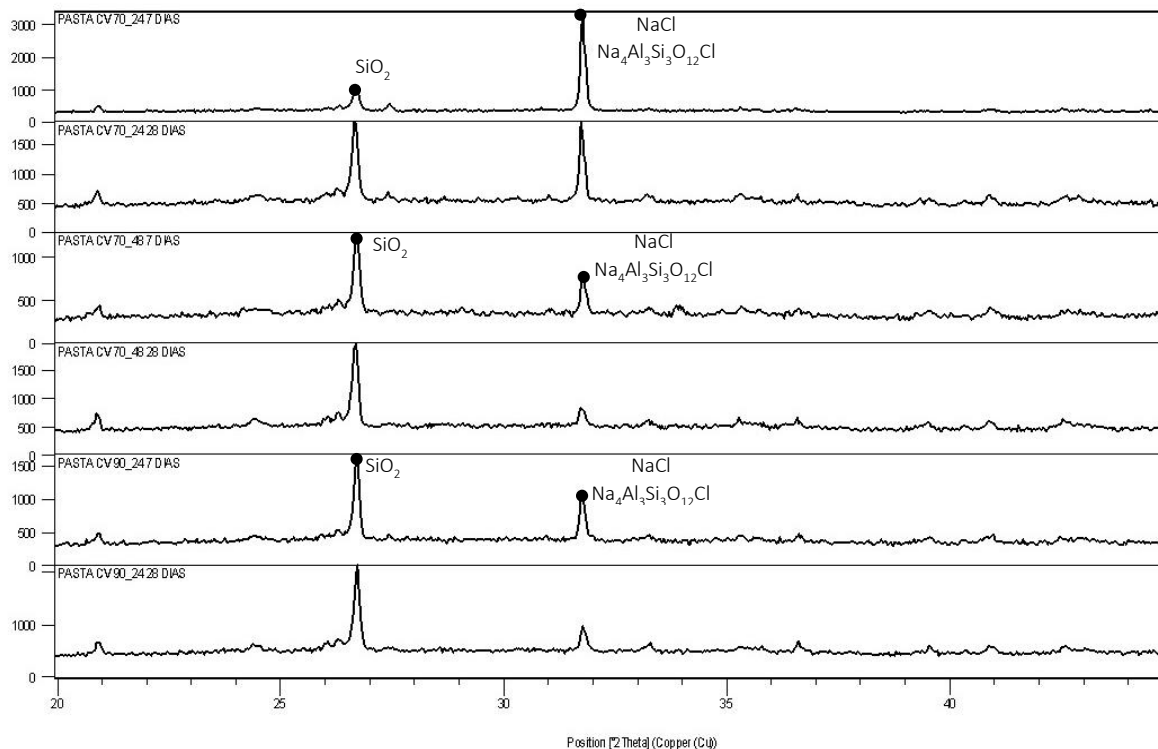


Figura A.3 Análise de DRX das pastas de CV; NaCl (halite); SiO₂ (quartz); Na₄Al₃Si₃O₁₂Cl (sodalite)

Tabela A.0.7 Valores do módulo de elasticidade de todas as composições ensaiadas aos 7, 28 e 91 dias

	7 Dias				28 Dias				91 Dias									
	Valores [GPa]	Valor médio [GPa]	Desvio padrão	Densidade [g/cm ³]	Valores [GPa]	Valor médio [GPa]	Desvio padrão	Densidade [g/cm ³]	Valores [GPa]	Valor médio [GPa]	Desvio padrão	Densidade [g/cm ³]						
CV AN 70/24	19,67	18,76	19,98	19,47	0,63	2,17	26,03	25,12	25,36	25,50	0,47	2,13	27,06	27,41	26,91	27,13	0,26	2,12
CV AN 70/48	6,66 ⁽¹⁾	25,02	24,42	24,72	0,42	2,16	6,71 ⁽¹⁾	22,27	26,67	24,47	3,11	2,09	29,53	29,45	38,46	32,48	5,18	2,10
CV AN 90/24	6,88	6,29	5,48	6,22	0,70	2,16	23,97	23,31	28,03	25,10	2,56	2,16	28,43	28,92	28,14	28,50	0,39	2,11
CV AR 70/24	8,20	4,61	7,72	6,84	1,95	1,84	5,42	6,66	7,71	6,60	1,15	1,84	7,01	7,58	-	7,30	0,40	1,73
CV AR 70/48	9,38	9,77	9,89	9,68	0,27	1,90	9,42	9,55	9,55	9,51	0,08	1,87	9,98	10,49	10,48	10,32	0,29	1,82
CV AR 90/24	7,77	8,00	7,70	7,82	0,16	1,90	7,97			7,97	0,00	1,84	9,92	9,95	8,15	9,34	1,03	1,83
CF AN 70/24	6,53	5,96	6,32	6,27	0,29	1,86	8,64	9,37	8,27	8,76	0,56	1,88	11,03	10,18	10,56	10,59	0,43	1,85
CF AN 70/48	6,53	7,21	6,42	6,72	0,43	1,86	10,24	10,98	10,57	10,60	0,37	1,88	12,41	12,54	12,99	12,65	0,30	1,88
CF AN 90/24	6,86	6,69	6,69	6,75	0,10	1,87	7,23	11,64	10,64	9,84	2,31	1,90	13,57	14,46	10,18	12,74	2,26	1,89
CF AR 70/24	4,12	3,36	3,59	3,69	0,39	1,57	2,86	3,35	3,50	3,24	0,33	1,48	3,09	3,09	-	3,09	0,00	1,47
CF AR 70/48	3,68	3,89	2,95	3,51	0,49	1,53	1,23	1,58	3,49	2,10	1,22	1,41	2,54	3,08	2,54	2,72	0,31	1,39
CF AR 90/24	4,89	4,84	3,29	4,34	0,91	1,80	3,76	3,80	3,59	3,72	0,11	1,63	4,86	4,74	4,34	4,65	0,27	1,62

(1) valor não utilizado para o valor médio

Tabela A.0.8 Variação dimensional das composições estudadas ao longo da campanha experimental

Tempo [dias]	CV-AN 70/48	CV-AN 90/24	CV-AR 70/24	CV-AR 70/48	CV-AR 90/24	CF-AN 70/24	CF-AN 70/48	CF-AN 90/24	CF-AR 70/24	CF-AR 70/48	CF-AR 90/24
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	NA	296,1	NA	21,1	NA	-55,9	-273,4	392,2	NA	53,9	NA
3	269,5	NA	146,1	-126,6	223,4	-92,2	-265,2	445,3	544,1	75,8	263,7
4	371,9	292,2	NA	-15,6	NA	-98,4	NA	529,7	589,8	177,3	NA
5	357,8	319,9	NA	65,6	NA	-79,7	-272,3	NA	614,1	228,1	NA
6	352,7	341,0	172,3	132,0	382,0	NA	-298,0	503,1	743,4	NA	355,5
9	383,2	365,6	227,7	210,2	439,5	-107,0	-265,2	491,4	787,1	332,8	480,1
12	398,0	166,4	341,4	260,9	632,4	-118,8	-259,4	569,9	NA	394,5	600,4
15	439,1	445,7	326,6	NA	606,6	-103,5	NA	540,2	925,0	457,8	575,8
18	438,7	448,4	43,4	321,1	685,5	NA	-198,8	NA	966,0	NA	NA
21	467,6	477,3	469,1	332,0	682,8	NA	-193,0	614,8	1115,2	424,2	653,5
24	487,1	494,5	495,3	NA	697,7	-25,4	-154,3	614,1	NA	499,2	658,2
27	401,2	504,3	521,1	351,6	753,5	-8,2	-102,7	661,3	1216,8	533,6	674,6
34	557,0	514,1	551,6	339,1	764,1	-21,5	9,8	693,4	1258,6	NA	680,5
41	584,8	534,0	578,1	367,2	NA	48,4	-31,6	718,8	NA	542,2	685,9
48	606,3	557,8	589,5	372,7	828,1	116,8	62,1	750,4	1301,6	556,3	683,2
55	619,5	569,9	608,6	382,0	854,7	NA	74,6	775,0	1344,5	NA	677,3
62	628,9	571,5	611,7	401,6	773,4	178,9	122,3	845,3	1369,1	571,1	686,7
69	NA	NA	568,0	414,1	NA	203,5	65,6	863,7	1388,7	582,8	647,3
76	NA	NA	NA	426,6	NA	231,3	NA	882,0	1391,8	564,8	613,3
83	592,2	523,8	549,6	432,0	753,9	248,4	NA	NA	1409,0	607,0	588,7
90	584,8	515,6	532,4	390,6	747,0	220,3	135,5	806,2	1353,1	558,6	558,2

Tabela A.0.9 Valores medidos nos ensaios de resistência à flexão e compressão aos 28 dias do ensaio de carbonatação

	Flexão [kN]			Compressão [kN]			
	Valores	Valor Médio	Desvio Padrão	Valores		Valor Médio	Desvio Padrão
CV AN 70C/24h	5,03	4,7	0,2	68,38	79,50	79,3	5,3
	4,51			80,71	85,00		
	4,70			83,33	79,11		
CV AN 70C/48h	5,06	4,5	0,5	71,38	75,06	68,0	5,6
	4,56			57 ⁽¹⁾	70,18		
	3,82			64,14	59,2		
CV AN 90C/24h	4,10	4,3	0,3	83,95	88,65	90,6	5,1
	4,06			96,55	95,31		
	4,63			94,42	84,48		
CV AR 70C/24h	1,32	1,3	0,1	26,56	24,47	23,9	1,7
	1,34			24,88	23,32		
	1,22			21,13	23,3		
CV AR 70C/48h	1,47	1,5	0,0	27,4	27,47	25,5	2,0
	1,49			26,86	25,55		
	1,57			22,33	23,13		
CV AR 90/24h	1,30	1,2	0,1	28,9	20,78	22,7	3,6
	1,15			19,67	21,32		
	1,13			11,46 ⁽²⁾	16,82 ⁽²⁾		
CF AN 70C/24	2,65	2,5	0,2	24,52	28,27	26,1	1,4
	2,54			24,51	25,22		
	2,24			26,81	27,28		
CFAN 70C/48h	2,73	2,9	0,1	35,93	38,07	35,3	2,6
	3,01			36,14	37,58		
	2,89			30,4	33,76		
CFAN 90C/24h	2,53	2,5	0,1	38,73	37,31	38,7	2,2
	2,42			37,94	40,23		
	2,60			35,48	42,28		
CF AR 70C/24h	0,55	0,5	0,0	6,48	6,73	6,7	0,1
	0,48			6,83	6,76		
	0,44			6,84	6,64		
CF AR 70C/48h	0,91	0,7	0,2	14,62	14,78	14,2	0,6
	0,51			14,4	13,14		
	0,63			7,76 ⁽²⁾	7,14 ⁽²⁾		
CF AR 90C/24h	1,03	0,9	0,1	10,12	10,08	13,1	3,0
	0,75			15,87	16,29		
	-			NA	NA		

(1) na flexão não foi bem colocado pelo que não deu duas metades semelhantes

(2) sem justificção para a discrepância de valores

Tabela A.0.10 Valores medidos nos ensaios de resistência à flexão e compressão aos 91 dias do ensaio de carbonatação

	Flexão [kN]			Compressão [kN]			
	Valores	Valor Médio	Desvio Padrão	Valores		Valor Médio	Desvio Padrão
CV AN 70C/24h	4,96	4,55	0,3	90,25	88,24	94,59	4,1
	4,26			94,49	99,24		
	4,43			96,74	98,59		
CV AN 70C/48h	4,543	4,31	0,2	110,78	104,99	109,83	3,6
	4,082			73,12	113,73		
	4,314			65,5	63,37		
CV AN 90C/24h	4,152	3,97	0,2	101,11	102,2	96,91	5,0
	4,033			97,4	99,53		
	3,734			93,38	87,85		
CV AR 70C/24h	1,023	1,09	0,1	21,83	21,16	22,41	0,9
	1,003			22,17	22,02		
	1,253			23,42	23,88		
CV AR 70C/48h	1,414	1,34	0,1	21,85	23,92	22,82	1,1
	1,302			24,63	21,82		
	1,306			21,99	22,7		
CV AR 90/24h	1,081	1,14	0,1	21,61	18,51	21,19	2,4
	1,293			21,99	22,63		
	1,058			15,8	19,23		
CF AN 70C/24	2,308	2,39	0,1	28,76	26,91	26,89	1,1
	2,502			26,1	27,43		
	2,358			27,07	25,08		
CFAN 70C/48h	2,98	3,03	0,1	34,69	34,78	34,18	1,1
	3,011			33,9	31,77		
	3,099			34,9	35,01		
CFAN 90C/24h	2,73	2,86	0,1	40,88	41,29	43,92	3,3
	2,952			41,95	50,53		
	2,91			45,51	43,36		
CF AR 70C/24h	0,923	1,01	0,1	13,35	14,43	14,07	0,5
	0,981			13,44	13,87		
	1,133			14,68	14,66		
CF AR 70C/48h	0,553	0,66	0,2	7,57	7,88	7,05	3,7
	0,486			5,88	6,86		
	0,931			14,94	14,45		
CF AR 90C/24h	0,687	0,85	0,1	9,87	10,43	15,55	2,6
	0,834			15,73	15,88		
	1,018			15,17	15,43		

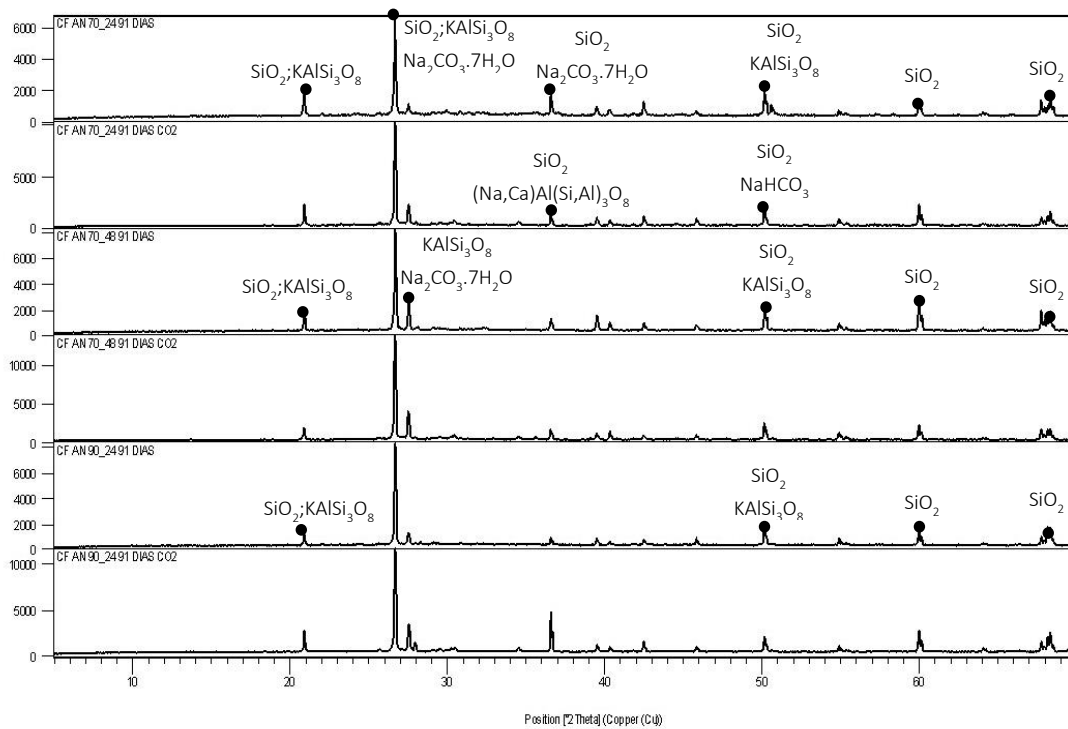


Figura A-0.1 Análise de DRX dos provetes de CF-AN aos 91 dias com e sem a ação de carbonatação; SiO_2 (quartzo); KAlSi_3O_8 (microlina); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (carbonato de sódio hidratado); NaHCO_3 (nahcolite); $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ (albite, calcian)

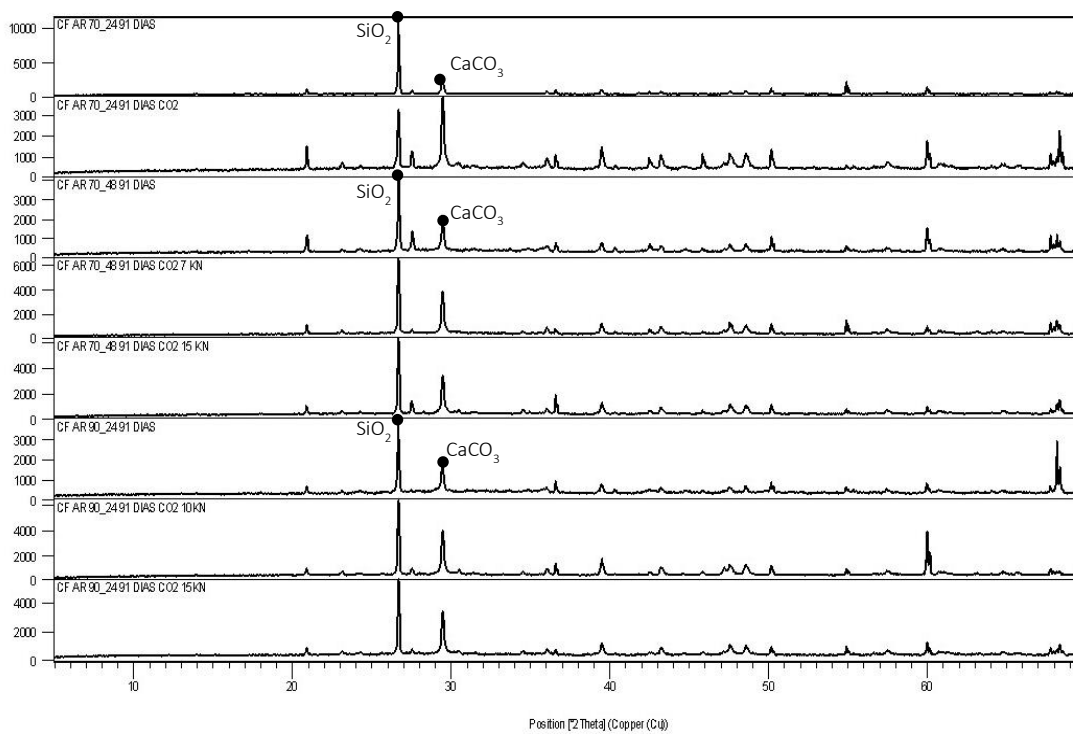


Figura A.2 Análise de DRX dos provetes de CF-AR aos 91 dias com e sem a ação de carbonatação; SiO_2 (quartzo); CaCO_3 (calcite)

Tabela A.0.11 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 70/24

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70ºC/24h	00:00	261.3	0.00	0.000	0.00	0.00
		274.2	0.00	0.000		
		263.3	0.00	0.000		
		275.7	0.00	0.000		
		283.2	0.00	0.000		
	268.7	0.00	0.000			
	00:10	263.5	2.20	0.435	0.02	0.41
		276.2	2.00	0.395		
		265.5	2.20	0.435		
		277.8	2.10	0.415		
		285.1	1.90	0.376		
	270.6	1.90	0.376			
	00:30	264.3	3.00	0.342	0.09	0.29
		276.8	2.60	0.297		
		266.3	0.80	0.091		
		278.9	3.20	0.365		
		286.3	3.10	0.354		
	271.4	2.70	0.308			
	03:00	267.3	6.00	0.280	0.07	0.23
		279.5	5.30	0.247		
		268.5	2.20	0.102		
		282.4	6.70	0.312		
		288.2	5.00	0.233		
	273.5	4.80	0.224			
	06:00	269.1	7.80	0.257	0.07	0.20
		280.5	6.30	0.208		
		270.2	1.70	0.056		
		283.4	7.70	0.254		
		289.9	6.70	0.221		
	275	6.30	0.208			
	24:00:00	271.4	10.10	0.166	0.05	0.14
		283.4	9.20	0.152		
		271.6	1.40	0.023		
		286.4	10.70	0.176		
		292.5	9.30	0.153		
	277.4	8.70	0.143			
	72:00:00	272	10.70	0.102	0.04	0.08
		284.6	10.40	0.099		
		272.1	0.50	0.005		
		286.8	11.10	0.106		
		292.6	9.40	0.089		
	278.4	9.70	0.092			

Tabela A.0.12 Valores massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 70/48

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70ºC/48h	00:00	273.1	0.00	0.000	0.0	0.0
		271.3	0.00	0.000		
		266.8	0.00	0.000		
		268.6	0.00	0.000		
		258.2	0.00	0.000		
	263.1	0.00	0.000			
	00:10	261.1	-12.00	-2.372	1.8	0.6
		265.8	-5.50	-1.087		
		276.0	9.20	1.818		
		271.4	2.80	0.553		
		274.0	15.80	3.123		
	269.9	6.80	1.344			
	00:30	272.7	-0.40	-0.046	0.8	0.5
		277.6	6.30	0.719		
		262.5	-4.30	-0.491		
		267.4	-1.20	-0.137		
		271.2	13.00	1.483		
	275.6	12.50	1.426			
	03:00	276.4	3.30	0.154	0.3	0.4
		280.8	9.50	0.443		
		266.4	-0.40	-0.019		
		271.4	2.80	0.130		
		274.9	16.70	0.778		
	278.9	15.80	0.736			
	06:00	277.9	4.80	0.158	0.2	0.3
		282.4	11.10	0.366		
		267.5	0.70	0.023		
		273.2	4.60	0.152		
		276.1	17.90	0.590		
	280.4	17.30	0.570			
	24:00:00	279.0	5.90	0.097	0.1	0.2
		283.6	12.30	0.203		
		268.7	1.90	0.031		
		281.9	13.30	0.219		
		277.1	18.90	0.311		
	273.3	10.20	0.168			
	72:00:00	279.7	6.60	0.063	0.1	0.1
		284.5	13.20	0.126		
		269.2	2.40	0.023		
		274.0	5.40	0.051		
		277.6	19.40	0.184		
	282.6	19.50	0.185			

Tabela A.0.13 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AN 90/24

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
90ºC/24h	00:00	258.1	0.00	0.000	0.000	0.000
		269.3	0.00	0.000		
		259.3	0.00	0.000		
		274.3	0.00	0.000		
		279.9	0.00	0.000		
	267.4	0.00	0.000			
	00:10	281.2	23.10	4.566	2.81	0.34
		261	-8.30	-1.640		
		270.7	11.40	2.253		
		269.5	-4.80	-0.949		
		260	-19.90	-3.933		
	276.3	8.90	1.759			
	00:30	261	2.90	0.331	1.22	0.30
		277.1	7.80	0.890		
		270.4	11.10	1.267		
		271.6	-2.70	-0.308		
		262.1	-17.80	-2.031		
	282.1	14.70	1.677			
	03:00	280.2	22.10	1.030	0.63	0.26
		273.5	4.20	0.196		
		284.4	25.10	1.169		
		264.7	-9.60	-0.447		
		274.2	-5.70	-0.266		
	264.2	-3.20	-0.149			
	06:00	281.5	23.40	0.771	0.44	0.22
		275	5.70	0.188		
		285.5	26.20	0.863		
		266	-8.30	-0.273		
		275.4	-4.50	-0.148		
	265.4	-2.00	-0.066			
	24:00:00	284.9	26.80	0.441	0.22	0.18
		278.3	9.00	0.148		
		289.6	30.30	0.499		
		269.4	-4.90	-0.081		
		279.7	-0.20	-0.003		
	269.3	1.90	0.031			
	72:00:00	284.8	26.70	0.254	0.13	0.10
		278.9	9.60	0.091		
		290	30.70	0.292		
		269.5	-4.80	-0.046		
		279.2	-0.70	-0.007		
	268.7	1.30	0.012			

Tabela 0.14 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 70/24

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70ºC/24h	00:00	227.05	0.00	0.000	0.000	0.000
		236.1	0.00	0.000		
		223.65	0.00	0.000		
		225.05	0.00	0.000		
		228.2	0.00	0.000		
	222.5	0.00	0.000			
	00:10	238.95	11.90	2.352	1.06	0.96
		230.6	-5.50	-1.087		
		230.65	7.00	1.383		
		232.95	7.90	1.561		
		232.15	3.95	0.781		
	226.55	4.05	0.800			
	00:30	240.45	13.40	1.529	0.558	0.88
		234.55	-1.55	-0.177		
		232.7	9.05	1.033		
		237.3	12.25	1.398		
		234.7	6.50	0.742		
	229.1	6.60	0.753			
	03:00	246.8	19.75	0.920	0.31	0.75
		238.55	2.45	0.114		
		245.3	21.65	1.009		
		246.3	21.25	0.990		
		244	15.80	0.736		
	238	15.50	0.722			
	06:00	-	NA	NA	NA	NA
		-	NA	NA		
		-	NA	NA		
		-	NA	NA		
		-	NA	NA		
	24:00:00	254.95	27.90	1.300	0.29	0.95
		243.3	7.20	0.335		
		246.8	23.15	1.078		
		248	22.95	1.069		
		249.15	20.95	0.976		
	242.3	19.80	0.922			
	72:00:00	255.1	28.05	0.267	0.06	0.19
		243.2	7.10	0.068		
		246.92	23.27	0.221		
		247.95	22.90	0.218		
		249.05	20.85	0.198		
	242.2	19.70	0.187			

Tabela A.0.15 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 70/48

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70°C/48h	00:00	238	0,00	0,000	0,000	0,000
		236,05	0,00	0,000		
		238,35	0,00	0,000		
		238,1	0,00	0,000		
		240,25	0,00	0,000		
	00:10	236,15	0,00	0,000	0,406	0,553
		242,55	4,55	0,899		
		238,6	2,55	0,504		
		241,15	2,80	0,553		
		241,05	2,95	0,583		
	00:30	239	-1,25	-0,247	0,226	0,609
		241,35	5,20	1,028		
		244,8	6,80	0,776		
		241	4,95	0,565		
		243,85	5,50	0,628		
	03:00	243,6	5,50	0,628	0,094	0,439
		241,7	1,45	0,165		
		243,95	7,80	0,890		
		248,5	10,50	0,489		
		245	8,95	0,417		
	06:00	247,8	9,45	0,440	NA	NA
		248	9,90	0,461		
		245,8	5,55	0,259		
		248,35	12,20	0,568		
		-	NA	NA		
	24:00:00	-	NA	NA	0,116	0,746
		254,3	16,30	0,759		
		251,4	15,35	0,715		
		253,45	15,10	0,703		
		255,85	17,75	0,827		
	72:00:00	252	11,75	0,547	0,025	0,153
		256	19,85	0,925		
		254,9	16,90	0,161		
		252,15	16,10	0,153		
		253,8	15,45	0,147		

Tabela A.0.16 Valores massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CV-AR 90/24

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
90°C/24h	00:00	233,95	0,00	0,000	0,000	0,000
		233,4	0,00	0,000		
		234	0,00	0,000		
		248,2	0,00	0,000		
		237,3	0,00	0,000		
	00:10	232,3	0,00	0,000	1,188	0,919
		239,45	5,50	1,087		
		238,6	5,20	1,028		
		237,5	3,50	0,692		
		242	-6,20	-1,225		
	00:30	251,75	14,45	2,856	0,680	0,887
		237,75	5,45	1,077		
		242,5	8,55	0,976		
		241,9	8,50	0,970		
		240,6	6,60	0,753		
	03:00	245,2	-3,00	-0,342	0,257	0,717
		254,75	17,45	1,991		
		240,85	8,55	0,976		
		249,75	15,80	0,736		
		249,65	16,25	0,757		
	06:00	247,85	13,85	0,645	NA	NA
		254,05	5,85	0,273		
		262,1	24,80	1,155		
		248,1	15,80	0,736		
		-	NA	NA		
	24:00:00	-	NA	NA	0,269	0,826
		251,65	17,70	0,825		
		251,55	18,15	0,846		
		250	16,00	0,745		
		256,6	8,40	0,391		
	72:00:00	265,5	28,20	1,314	0,052	0,17
		250,25	17,95	0,836		
		251,75	17,80	0,169		
		251,55	18,15	0,173		
		250,1	16,10	0,153		

Tabela A.0.17 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 70/24

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70°C/24h	00:00	226,8	0,00	0,000	0,000	0,000
		227,5	0,00	0,000		
		232,8	0,00	0,000		
		245,2	0,00	0,000		
		217,5	0,00	0,000		
	00:10	252,7	0,00	0,000	3,033	0,784
		221,1	-5,70	-1,127		
		256,4	28,90	5,712		
		231	-1,80	-0,356		
		230,8	-14,40	-2,846		
	00:30	237,9	20,40	4,032	2,626	0,652
		249,1	-3,60	-0,712		
		249,5	22,70	2,590		
		239,6	12,10	1,381		
		232,9	0,10	0,011		
	03:00	232,7	-12,50	-1,426	1,088	0,280
		258,7	41,20	4,701		
		223,4	-29,30	-3,343		
		247,8	21,00	0,978		
		241,5	14,00	0,652		
	06:00	229,9	-2,90	-0,135	0,753	0,184
		232,3	-12,90	-0,601		
		261,5	44,00	2,050		
		225,5	-27,20	-1,267		
		248,1	21,30	0,702		
	24:00:00	239,4	11,90	0,392	0,406	0,163
		231,1	-1,70	-0,056		
		231	-14,20	-0,468		
		260,2	42,70	1,407		
		226,3	-26,40	-0,870		
	72:00:00	254,7	27,90	0,460	0,224	0,094
		244,9	17,40	0,287		
		234,5	1,70	0,028		
		234,8	-10,40	-0,171		
		266,2	48,70	0,802		

Tabela A.0.18 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 70/48

	Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min0.5)]	Desvio Padrão	Valor Médio
70°C/48h	00:00	223,2	0,00	0,000	0,000	0,000
		233,9	0,00	0,000		
		250,6	0,00	0,000		
		230,9	0,00	0,000		
		244,1	0,00	0,000		
	00:10	239,2	0,00	0,000	2,063	0,843
		247,6	24,40	4,822		
		237,9	4,00	0,791		
		255,3	4,70	0,929		
		235,3	4,40	0,870		
	00:30	242,6	-1,50	-0,296	1,413	0,668
		228,8	-10,40	-2,055		
		231,2	8,00	0,913		
		256,9	23,00	2,625		
		239	-11,60	-1,324		
	03:00	248,8	17,90	2,043	0,583	0,402
		236,9	-7,20	-0,822		
		244,2	5,00	0,571		
		234	10,80	0,503		
		259,8	25,90	1,207		
	06:00	241,6	-9,00	-0,419	0,436	0,200
		252,1	21,20	0,988		
		239,8	-4,30	-0,200		
		246,4	7,20	0,335		
		233,2	10,00	0,329		
	24:00:00	259,9	26,00	0,856	0,201	0,137
		240,4	-10,20	-0,336		
		247,1	16,20	0,534		
		233,8	-10,30	-0,339		
		243,9	4,70	0,155		
	72:00:00	230,6	7,40	0,122	0,142	0,08
		259,2	25,30	0,417		
		242,8	-7,80	-0,128		
		252,1	21,20	0,349		
		239	-5,10	-0,084		

Tabela A.0.19 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AN 90/24

Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min ^{0.5})]	Desvio Padrão	Valor Médio			
00:00	237.3	0.00	0.000	0.000	0.000			
	254.2	0.00	0.000					
	250	0.00	0.000					
	247.4	0.00	0.000					
	240.5	0.00	0.000					
	237.6	0.00	0.000					
	00:10	241.2	3.90			0.771	1.147	0.919
		253.9	-0.30			-0.059		
		246.1	-3.90			-0.771		
		259.1	11.70			2.312		
		252.5	12.00			2.372		
		242.1	4.50			0.889		
00:30	242	4.70	0.536	0.634	0.614			
	254.9	0.70	0.080					
	247.3	-2.70	-0.308					
	259.5	12.10	1.381					
	253.1	12.60	1.438					
	242.5	4.90	0.559					
03:00	244	6.70	0.312	0.213	0.292			
	257.3	3.10	0.144					
	248.3	-1.70	-0.079					
	256.9	9.50	0.443					
	253.1	12.60	0.587					
	245	7.40	0.345					
06:00	238.6	1.30	0.043	0.188	0.130			
	252.3	-1.90	-0.063					
	246.4	-3.60	-0.119					
	256.9	9.50	0.313					
	252	11.50	0.379					
	244.5	6.90	0.227					
24:00:00	244.3	7.00	0.115	0.100	0.135			
	256.5	2.30	0.038					
	249.2	-0.80	-0.013					
	261.6	14.20	0.234					
	256.6	16.10	0.265					
	248	10.40	0.171					
72:00:00	245.8	8.50	0.081	0.052	0.09			
	259.1	4.90	0.047					
	251.5	1.50	0.014					
	263.2	15.80	0.150					
	257.2	16.70	0.159					
	248.8	11.20	0.107					

Tabela A.20 Valores massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AR 70/24

Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min ^{0.5})]	Desvio Padrão	Valor Médio
00:00	191.6	0.00	0.000	0.000	0.000
	211.3	0.00	0.000		
	175.5	0.00	0.000		
	188.7	0.00	0.000		
	197.6	0.00	0.000		
	193.5	0.00	0.000		
00:10	216.4	24.80	4.902	3.133	1.258
	198.3	-13.00	-2.569		
	200	24.50	4.842		
	204	15.30	3.024		
	195.5	-2.10	-0.415		
	182.2	-11.30	-2.233		
00:30	216.4	24.80	2.830	1.764	0.688
	197.3	-14.00	-1.598		
	198.7	23.20	2.647		
	202.6	13.90	1.586		
	196.3	-1.30	-0.148		
	183.1	-10.40	-1.187		
03:00	220.6	29.00	1.351	0.709	0.435
	201.4	-9.90	-0.461		
	201	25.50	1.188		
	205.1	16.40	0.764		
	199.6	2.00	0.093		
	186.5	-7.00	-0.326		
06:00	220.6	29.00	0.955	0.509	0.326
	200.2	-11.10	-0.366		
	202.1	26.60	0.876		
	206.1	17.40	0.573		
	200.9	3.30	0.109		
	187.6	-5.90	-0.194		
24:00:00	229.2	37.60	0.619	0.254	0.316
	208.5	-2.80	-0.046		
	211.4	35.90	0.591		
	216	27.30	0.450		
	209.9	12.30	0.203		
	198.3	4.80	0.079		
72:00:00	231.9	40.30	0.383	0.142	0.205
	211.9	0.60	0.006		
	212.7	37.20	0.354		
	217.4	28.70	0.273		
	213.8	16.20	0.154		
	200.1	6.60	0.063		

Tabela A.0.20 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AR 70/48

Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min ^{0.5})]	Desvio Padrão	Valor Médio
00:00	187.7	0.00	0.000	0.000	0.000
	168.6	0.00	0.000		
	165.5	0.00	0.000		
	199.5	0.00	0.000		
	-	0.00	0.000		
	-	0.00	0.000		
00:10	170.6	-17.10	-3.380	3.896	1.265
	204.7	36.10	7.135		
	175.9	10.40	2.055		
	195.7	-3.80	-0.751		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		
00:30	172.1	-15.60	-1.780	2.205	0.784
	204.8	36.20	4.131		
	176.2	10.70	1.221		
	195.7	-3.80	-0.434		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		
03:00	173.1	-14.60	-0.680	0.924	0.452
	207.8	39.20	1.826		
	179.7	14.20	0.662		
	199.5	0.00	0.000		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		
06:00	173.3	-14.40	-0.474	0.646	0.324
	207.5	38.90	1.281		
	179.8	14.30	0.471		
	200	0.50	0.016		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		
24:00:00	177.9	-9.80	-0.161	0.322	0.258
	212.1	43.50	0.716		
	187	21.50	0.354		
	206.9	7.40	0.122		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		
72:00:00	181.8	-5.90	-0.056	0.189	0.199
	217.7	49.10	0.467		
	191.3	25.80	0.245		
	214	14.50	0.138		
	-	NA	NA		
	-	NA	NA		

Tabela A.0.21 Valores de massa medidos e respectivos coeficientes de absorção de água ao longo do ensaio das CF-AR 90/24

Horas	Massa [gr]	Δmassa [gr]	C [kg/(m ² .min ^{0.5})]	Desvio Padrão	Valor Médio
00:00	193.7	0.00	0.000	0.000	0.000
	200.1	0.00	0.000		
	213.9	0.00	0.000		
	196.1	0.00	0.000		
	225.5	0.00	0.000		
	201.6	0.00	0.000		
00:10	229.8	36.10	7.135	3.755	1.100
	218.5	18.40	3.637		
	203.2	-10.70	-2.115		
	208.8	12.70	2.510		
	204.8	-20.70	-4.091		
	199.2	-2.40	-0.474		
00:30	229.4	35.70	4.074	2.117	0.622
	217.6	17.50	1.997		
	202.5	-11.40	-1.301		
	208.3	12.20	1.392		
	206	-19.50	-2.225		
	199.8	-1.80	-0.205		
03:00	231.4	37.70	1.756	0.864	0.363
	219.7	19.60	0.913		
	205.8	-8.10	-0.377		
	211.5	15.40	0.717		
	207.7	-17.80	-0.829		
	201.5	-0.10	-0.005		
06:00	232.4	38.70	1.275	0.607	0.280
	220	19.90	0.656		
	206.7	-7.20	-0.237		
	211.9	15.80	0.520		
	208.9	-16.60	-0.547		
	202	0.40	0.013		
24:00:00	238.1	44.40	0.731	0.299	0.242
	224.8	24.70	0.407		
	213	-0.90	-0.015		
	219.7	23.60	0.389		
	215.8	-9.70	-0.160		
	207.8	6.20	0.102		
72:00:00	241.5	47.80	0.455	0.172	0.171
	227.6	27.50	0.261		
	215.8	1.90	0.018		
	223.5	27.40	0.261		
	219.6	-5.90	-0.056		
	211.1	9.50	0.090		