

**Caracterização mecânica, retração e fluência de betões com
cimento reciclado e agregados reciclados**

Pedro Henrique dos Santos Delgado Fortes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Doutora Sofia Alexandra de Carvalho Ferreira Real

Júri

Presidente: Professor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Professor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Pedro Miguel Raposeiro da Silva

Novembro de 2022

DECLARAÇÃO

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

Caracterização mecânica, retração e fluência de betões com cimento reciclado e agregados reciclados

Pedro Henrique dos Santos Delgado Fortes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projeto FCT EcoHydB

Eco – efficient hydraulic binders produced from waste cement – based materials

Task 3 – Mechanical and durability characterisation of concrete produced with recycled low-carbon cement

Projeto FCT PTDC/ECI-CON/28308/2017



FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

AGRADECIMENTOS

Acabo com a entrega desta dissertação, mais uma etapa. Do Instituto Superior Técnico saio uma pessoa melhor a todos os níveis e com um sentimento de orgulho que dificilmente se explica. Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, me acompanharam nesta caminhada.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Bogas por toda a ajuda e suporte que prestou, sempre com o grande sentido de humor e energia que o definem. Mesmo com pouco tempo, tudo fez para que esta dissertação se desse por terminada. Muito Obrigado.

À minha coorientadora, Dra. Sofia Real por ser a guia durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sempre prestável e disponível, dando sempre o *push* para continuarmos fortes.

Deixo também um grande apreço pelas investigadora Ana Chambel e Susana Hu, pelo apoio na parte laboratorial.

Quero agradecer também aos técnicos de laboratório, Pedro Costa, Francisco Baptista e Jorge Pontes, pela ajuda fulcral no manuseamento de equipamentos e disponibilidade quando era necessária uma força extra.

Agradeço ao LNEC e aos seus investigadores pelo acolhimento e ajuda prestada no decorrer dos ensaios no estabelecimento.

À Secil pelo fornecimento de cimento que é a base de todo este projeto.

Ao meu colega e amigo David Miranda, cuja ajuda, alegria e vontade foram imprescindíveis para que completássemos as atividades laboratoriais. Foi duro, mas conseguimos.

Aos meus pais e irmã (e Luna), por serem a minha motivação, o meu porto de abrigo, os meus melhores amigos nos bons e maus momentos, puxando sempre pela minha melhor pessoa. O meu sucesso é fruto da minha família.

A todos os meus verdadeiros amigos, os quais não preciso de nomear, agradeço a presença, o apoio, ajuda e carinho durante todo este percurso. Levo memórias incríveis, as quais espero continuar a criar. Aqueles que ainda não compreenderam o tema, espero que este documento vos elucide.

RESUMO

Atualmente, a indústria da construção não é sustentável. Os materiais são utilizados em grande escala, causando uma elevada extração de recursos naturais. O betão é o material mais utilizado na indústria devido à sua elevada funcionalidade e custo de produção reduzido. O cimento é um dos principais constituintes deste material, sendo o elemento de ligação. Este é responsável por cerca de 7% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂). O uso de agregados naturais também causa problemas de sustentabilidade, sendo cerca de 80% da constituição do volume de betão. Para além do elevado consumo de recursos naturais, o desperdício é elevado, não sendo os resíduos reaproveitados. Dado isto, estão a ser estudadas várias formas de mitigar o impacto do setor, sendo um dos principais focos o betão e os seus constituintes.

O objetivo do presente trabalho é analisar a influência do cimento, agregados e areias recicladas nas características mecânicas, retração e fluência do betão. O betão foi estudado no estado fresco, efetuando ensaios de trabalhabilidade e massa volúmica fresca, e no estado endurecido com ensaios à massa volúmica seca, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração e fluência. Primeiramente, foi efetuada a produção dos cimentos reciclados de pasta (CRP) e de betão (CRB), e os agregados reciclados britados (ARB) e termicamente tratados (ART). Seguidamente, foram produzidos betões com diferente relação água/ligante (a/l) (0,65 e 0,70), CR e AR. Com base na análise dos resultados foi feita uma avaliação e comparação da incorporação dos diferentes ligantes e agregados.

No geral, a substituição do ligante por CR demonstrou perdas nas características analisadas do betão. O maior volume de pasta das misturas com CR, derivado da elevada exigência de água, condicionou a performance dos betões produzidos, nomeadamente em propriedades como a retração, fluência e módulo de elasticidade. Apesar do maior volume de pasta e uso de Superplastificante (SP), a menor trabalhabilidade dos betões causou dificuldade na compactação dos mesmos, o que condicionou o desempenho de propriedades mecânicas como a resistência. Os agregados finos não tiveram influência significativa nos ensaios efetuados, tendo o método de separação utilizado para a produção de areia separada (AS) sido efetivo. Estes agregados aparentaram ser uma alternativa sustentável confiável. A substituição total de agregados naturais, por agregados reciclados britados e tratados termicamente conduziu a reduções importantes em algumas características analisadas no trabalho experimental. A presença de pasta nestes agregados é a maior condicionante, tendo o tratamento (térmico e moagem) sido pouco efetivo na separação de pasta dos agregados e melhoria das suas características. Foi possível produzir um betão 100% reciclado, com cimento reciclado de pasta (CRP), agregados grosso britado e areia separada. O betão atingiu

resistências consideráveis, tendo sido condicionantes fenômenos como a pré-hidratação e pré-carbonatação devido ao elevado tempo de produção dos componentes.

Palavras-chave: Betão 100% reciclado; Cimento reciclado; Agregados reciclados; Comportamento no estado fresco; Caracterização mecânica; Retração e fluência.

ABSTRACT

Currently, the construction industry is not sustainable. Materials are used on a large scale, causing a high extraction of natural resources. Concrete is the most used material in the industry due to its high functionality and low production cost. Cement is one of the main constituents of this material, being the binding element. It is responsible for about 7% of the world's carbon dioxide (CO₂) emissions. The use of natural aggregates also causes sustainability problems, being about 80% of the constitution of the volume of concrete. In addition to the high consumption of natural resources, waste is high and is not reused. Given this, several ways to mitigate the impact of the sector are being studied, one of the main focuses being concrete and its constituents.

The objective of this work is to analyse the influence of cement, aggregates and recycled sands in the mechanical characteristics and shrinkage of concrete. The concrete was studied in the fresh state, with tests of workability and fresh density, and in the hardened state with tests of dry density, ultrasonic propagation velocity, compressive strength, tensile strength by diametrical compression, modulus of elasticity, shrinkage and creep. Firstly, was made the production of the recycled paste (CRP) and concrete (CRB) cements, and the recycled crushed (ARB) and thermally treated (ART) aggregates. Then, concretes with different water/binder ratio (a/l) (0.65 and 0.70), CR and AR were produced. Based on the analysis of the results, an evaluation and comparison of the incorporation of different binders and aggregates was made.

In general, the replacement of the binder with CR showed losses in the analysed characteristics of concrete. The higher paste volume of the mixtures with CR, derived from the high water demand, conditioned the performance of the produced concretes, namely in properties such as shrinkage, creep and modulus of elasticity. Despite the higher paste volume and the use of Superplasticizer (SP), the lower workability of the concretes caused difficulties in their compaction, which conditioned the performance of mechanical properties such as strength. The fine aggregates had no significant influence in the tests performed, and the separation method used for the production of separated sand (AS) was effective. These aggregates appeared to be a reliable sustainable alternative. The total replacement of natural aggregates with crushed and thermally treated recycled aggregates led to important reductions in some characteristics analysed in the experimental work. The presence of paste in these aggregates is the major constraint, and the treatment (thermal and grinding) was not very effective in separating paste from the aggregates and improving their characteristics. It was possible to produce a 100% recycled concrete, with recycled paste cement (CRP), coarse crushed aggregates and separated sand. The concrete reached considerable strengths, having been conditioning

phenomena such as pre-hydration and pre-carbonation due to the high production time of the components.

Keywords: 100% Recycled concrete; Recycled cement; Recycled aggregates; Fresh behaviour; Mechanical characterisation; Shrinkage and creep.

1. INDÍCE GERAL

Declaração	iii
Agradecimentos	vii
Resumo	viii
Abstract	x
Índice de Figuras	xiv
Índice de Tabelas	xvii
Símbolos e Abreviaturas	xix
Abreviaturas	xix
Compostos químicos	xix
Simbologia	xix
Unidades	xix
1. Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivos e Metodologias	2
1.3 Organização do trabalho	4
2. Estado da arte	5
2.1 O impacto do betão no ambiente	5
2.2 Agregados reciclados	6
2.3 Cimento reciclado	9
2.4 Betão reciclado	12
3. Campanha experimental	15
3.1 Introdução	15
3.2 Visão global da campanha experimental	15
3.3 Produção do betão e pasta de origem	16
3.4 Produção de agregados reciclados	19
3.4.1 Produção de ARB	19
3.4.2 Produção de ART	20
3.4.3 Produção de AS	21
3.4.4 Caracterização dos agregados reciclados	21
3.5 Produção de cimento reciclado	26
3.5.1 Britagem e moagem	26
3.5.2 Separação magnética	27
3.5.3 Termoativação	29
3.5.4 Caracterização do cimento reciclado	30

3.6	Produção e caracterização dos betões	32
3.6.1	Composições.....	32
3.6.2	Produção, moldagem e cura do betão.....	34
3.6.3	Caracterização do betão no estado fresco	35
3.6.4	Caracterização do betão no estado endurecido.....	36
4.	Apresentação e discussão de resultados.....	41
4.1	Caracterização do betão no estado fresco	41
4.1.1	Trabalhabilidade	42
4.1.2	Massa volúmica fresca	45
4.2	Caracterização do betão no estado endurecido	47
4.2.1	Massa volúmica seca.....	49
4.2.2	Resistência à compressão	51
4.2.3	Resistência à tração	56
4.2.4	Módulo de elasticidade.....	59
4.2.5	Velocidade de propagação de ultrassons	61
4.3	Retração.....	63
4.3.1	Retração por secagem.....	64
4.3.2	Retração autogénea.....	71
4.3.3	Fluência	72
5.	Conclusão	75
5.1	Conclusões Finais.....	75
5.2	Desenvolvimentos Futuros	78
	Referências.....	79
	Documentos normativos.....	85
	Anexos.....	87
	Anexo 1 - Resistência à compressão	87
	Anexo 2 – Resistência à Tração.....	89
	Anexo 3 – Módulo de Elasticidade.....	90
	Anexo 4 – Velocidade de Propagação de Ultrassons	91
	Anexo 5– Retração	92
	Secagem.....	92
	Autogénea	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Correlação pasta aderida, absorção de água e massa volúmica seca. Adaptado de Akbarnezhad et al. (2011)	8
Figura 2.2 - Diagrama de técnicas de melhoria da qualidade dos AR de betão pela remoção da pasta aderida. Adaptado de Soomro e Evangelista (2021)	9
Figura 2.3 – Materiais cimentícios termoativados a partir de resíduos de materiais à base de cimento, economia circular. Adaptado de Carriço et al. (2020a)	10
Figura 3.1 - Betoneira de eixo vertical utilizada para a produção de betão	18
Figura 3.2 - Produção da pasta de cimento.....	18
Figura 3.3 - Britadeira de Maxilas do LC.....	20
Figura 3.4 - Interior da Britadeira de Maxilas.....	20
Figura 3.5 - Forno Horizontal.....	20
Figura 3.6 - Moinho para realização da autogénea dos ART.....	20
Figura 3.7 – Peneiro.....	20
Figura 3.8 - Britadeira de Maxilas do GeoLab	27
Figura 3.9 - Moinho de Rolos do GeoLab	27
Figura 3.10 - Moinho de Bolas do GeoLab	27
Figura 3.11 - Equipamento de separação magnética	28
Figura 3.12 - Forno rotativo da ThermoLab Scientific Equipments	30
<i>Figura 3.13- Curva de termoativação do cimento</i>	<i>30</i>
Figura 3.14 - Curva granulométrica do OPC, NTCP, CRP	32
Figura 3.15 - Ensaio de Abaixamento	36
Figura 3.16 - Ensaio à compressão na prensa TONI PACT 3000	38
Figura 3.17 - Medição da velocidade de propagação de ultrassons.....	38
Figura 3.18 - Ensaio à tração por compressão diametral na prensa TONI PACT 3000	38
Figura 3.19 - Módulo de Elasticidade.....	40
Figura 3.20 - Retração Axial no LNEC.....	40
Figura 3.21 - Fluência.....	40
Figura 4.1 - Abaixamento das misturas com CEM I, CRP e CRB.....	44
Figura 4.2 - Abaixamento dos betões com CEM I produzidos com agregados finos AN, AB e AS.....	44
Figura 4.3 - Abaixamento das misturas com AN, ARB e ART.....	45
Figura 4.4 - Abaixamento de misturas com AN e ARB+AS e CRP	45
Figura 4.5 - Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com a/l 0,65 e 0,70 e diferentes tipos de cimento (CEM I, CRP, CRB)	46
Figura 4.6 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com agregados finos AN, AB e AS	46
Figura 4.7 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com agregados AN, ARB e ART	47
Figura 4.8 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com CRP e agregados AN e ARB+AS.....	47
Figura 4.9 – Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com a/l 0,65 e 0,70 e diferentes tipos de cimento (CEM I, CRP, CRB).....	50
Figura 4.10 - Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com agregados finos AN, AB e AS.....	50
Figura 4.11– Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com agregados AN, ARB e ART	51
Figura 4.12– Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com CRP e agregados AN e ARB+AS	51
Figura 4.13 - Resistência à compressão (f_{cm}) de betões com diferentes tipos de cimento	52
Figura 4.14 - Resistência à compressão média (f_{cm}) de betões com diferentes tipos de agregados finos (AN, AB e AS)	54
Figura 4.15 - Resistência à compressão média (f_{cm}) nos betões com AN, ARB ou ART	56
Figura 4.16 - Resistência à compressão média (f_{cm}) nos betões com CRP e AN ou ARB+AS.....	56

Figura 4.17 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com CEM I e CRP	57
Figura 4.18 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com diferentes tipos de agregados finos (AN, AB e AS).....	57
Figura 4.19 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com agregados grossos e finos de ARB e ART	58
Figura 4.20 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com agregados com CRP e AN ou ARB+AS..	58
Figura 4.21 - Relação entre a resistência à tração (f_{ctm}) e compressão (f_{cm}) média dos betões.....	58
Figura 4.22 – Relação entre os valores de cálculo (f_{ctm}) e experimentais ($f_{ctm\text{experimental}}$) da resistência média à tração. Valores de cálculo determinados com base na NP EN 1992-1-1.....	59
Figura 4.23 - Módulo de elasticidade (E_c) em função do tipo de cimento (CEM I e CRP)	60
Figura 4.24 - Módulo de elasticidade (E_{c28d}) em função dos agregados finos (AN, AB e AS).....	60
Figura 4.25 - Relação entre os valores de cálculo (E_{cm}) e experimentais (E_c) do módulo de elasticidade. Valores de cálculo determinados com base na NP EN 1992-1-1.....	60
Figura 4.26 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de cimento	62
Figura 4.27 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de agregado fino (AN, AB e AS).....	62
Figura 4.28 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de agregado (AN, ARB, ART)	62
Figura 4.29 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com CRP e AN ou ARB+AS	62
Figura 4.30 – Relação entre a velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) e a resistência à compressão e massa volúmica seca ($k \cdot f_{cm}^{0,15} \cdot \rho_{seca}^{0,5}$).....	63
Figura 4.31 - Perda de massa de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante.....	66
Figura 4.32 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante....	66
Figura 4.33 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante	66
Figura 4.34 - Perda de massa de betões 0,65, para diferentes tipos de agregados finos	67
Figura 4.35 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos	68
Figura 4.36 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos.....	68
Figura 4.37 - Perda de massa de betões com CRP, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)	68
Figura 4.38 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)	69
Figura 4.39 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)	69
Figura 4.40 – Relação entre a perda de massa e a retração dos vários betões analisados	71
Figura 4.41 - Retração axial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante	72
Figura 4.42 - Retração superficial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante	72
Figura 4.43 - Retração superficial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos	72
Figura 4.44 - Extensão de fluência, ϵ_c , de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante, durante o ensaio de fluência (início de carregamento aos 28 dias – idade zero)	73
Figura 4.45 - Retração, ϵ_s , de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante, durante o ensaio de fluência (a partir dos 28 dias de idade)	73

Figura 4.46 - Coeficiente de fluência (ϕ) ao longo do tempo de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Agregados reciclados (E 471, 2006)	7
Tabela 3.1 - Propriedades dos Agregados Naturais (AN)	17
Tabela 3.2 - Composição do Betão de Origem (BO)	18
Tabela 3.3 - Caracterização do Betão de Origem (BO)	19
Tabela 3.4 - Caracterização da Pasta de Origem (PO)	19
Tabela 3.5 - Propriedades dos Agregados Reciclados Britados (ARB)	22
Tabela 3.6 - Estimativa de pasta nos Agregados Reciclados Britados (ARB)	23
Tabela 3.7 - Propriedades dos Agregados Reciclados Tratados (ART)	24
Tabela 3.8 - Estimativa de pasta nos Agregados Reciclados Tratados (ART)	25
Tabela 3.9 - Propriedades da Areia Reciclada Separada (AS)	25
Tabela 3.10 - Estimativa de pasta na Areia Reciclada Separada (AS)	26
Tabela 3.11 - Caracterização dos vários cimentos reciclados, CRP e CRB, bem como do resíduo de cimento não tratado (NTCP)	31
Tabela 3.12 - Composição das misturas de betão	33
Tabela 3.13 - Ensaio, idades dos ensaios e procedimentos de cura	35
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização do betão no estado fresco	41
Tabela 4.2 - Resultados da caracterização do betão no estado endurecido	48
Tabela A1 - Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 28 e 90 dias para as diferentes misturas	87
Tabela A2 - Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 28 e 90 dias para as diferentes misturas (continuação)	88
Tabela A3- Valores do ensaio de resistência à tração aos 28 dias para as diferentes misturas	89
Tabela A4- Valores do ensaio do módulo de elasticidade aos 28 dias para misturas de referência, com CRP e com agregados finos reciclados (AB e AS)	90
Tabela A5- Valores do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons aos 28 dias para as diferentes misturas	91
Tabela A6- Valores do ensaio de retração, $ecst(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas	92
Tabela A7- Valores do ensaio de retração, $ecst(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas (continuação)	93
Tabela A8- Valores do ensaio de retração, $ecst(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas (continuação)	94

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas

AN - Agregado natural

AR - Agregado reciclado

ARB - Agregado reciclado britado

ARF - Agregado reciclado fino

ART - Agregado reciclado termicamente tratado

AS - Areia reciclada separada

BO - Betão de origem

CR - Cimento Reciclado

CRB - Cimento reciclado proveniente de betão

CRP - Cimento reciclado proveniente de pasta

GeoLab - Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST

HR - Humidade relativa

IST - Instituto Superior Técnico

LA - Los Angeles

LC - Laboratório de Civil do Instituto Superior Técnico

LERM - Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Instituto Superior Técnico

NTCP - Cimento reciclado de pasta não tratado

PO - Pasta de origem

SP - Superplastificante

Compostos químicos

Al₂O₃ - Alumina

CH - Hidróxido de cálcio

CaO - Óxido de cálcio

CO₂ - Dióxido de Carbono

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

Fe₂O₃ - Óxido de Ferro

MgO - Óxido de magnésio

SiO₂ - Sílica

Simbologia

a/l - Relação água/ligante

a/c - Relação água/cimento

CV - Coeficiente de variação

D_{max} - Diâmetro máximo do agregado

d_{min} - Diâmetro mínimo do agregado

E_{cm} - Valor médio do módulo de elasticidade

ecst - Valor da retração

f_{cm} - Valor médio da resistência à compressão

f_{ctm} - Valor médio da resistência à tração

V_{us} - Velocidade de propagação de ultrassons

Unidades

m - Metro

cm - Centímetro

mm - Milímetro

µm - Micrómetro

h - Hora

min - Minuto

Mt - Mega tonelada

t - tonelada

kg - Quilograma

g - Grama

MPa - Mega pascal

GPa - Giga pascal

J - Joule

GJ - Giga joule

°C - Celsius

L - Litro

1 .INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A construção é um setor da indústria reconhecido por contribuir de forma decisiva para o desenvolvimento mundial. Segundo os estudos da Comissão Europeia (2012), este setor é responsável por 10% do produto interno bruto da União Europeia (UE) e cerca de 26% do da China (Zheng et al., 2017). Dado que, na EU, a indústria da construção cria cerca de mais de 20 milhões de postos de trabalho (Comissão Europeia, 2012), a evolução e desenvolvimento da mesma tem um grande impacto na economia e também na qualidade de vida dos seus cidadãos.

O material mais utilizado na indústria da construção, e que contribui para o desenvolvimento das populações, é o betão, associado a baixo custo e elevada versatilidade e resistência. Em 2017, estimam-se que tenham sido produzidas ≈ 27 GT ($1 \text{ GT} = 1 \times 10^9 \text{T}$) de betão (Li et al., 2019). Tendo em consideração composições média de betão, isso corresponde a um consumo de cerca de ≈ 19 GT de agregados, ≈ 4 GT de cimento Portland e 2 a 3 GT de água (Miller et al., 2018). De acordo com uma das últimas pesquisas de crescimento económico mundial, a área construída irá duplicar nos próximos 40 anos e a produção de betão aumentar em 25% até 2030 (Miller et al., 2018).

Em geral, a construção não é uma atividade sustentável. Os materiais utilizados implicam o consumo de uma elevada quantidade de recursos naturais, exercendo uma forte pressão ambiental (Tam et al., 2021). A excessiva necessidade de agregados contribui para o esgotamento destes recursos. Segundo a Agência Europeia do Ambiente (2008), alguns países europeus reportaram alguma escassez inicial de agregados naturais (areia, cascalho, etc.), e o Programa Ambiental das Nações Unidas (UN, 2010) alertou para um possível esgotamento destes materiais.

Para além do problema relacionado com o elevado consumo de recursos, a produção de cimento tem uma grande responsabilidade na emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera, sendo este um elemento fundamental para a produção do betão, na função de material ligante. Na realidade, mais de 85% das emissões de CO_2 associadas à produção do betão resultam do fabrico do cimento (Carriço et al., 2020). As emissões da indústria do cimento são bastante preocupantes e uma solução para este problema deverá ser urgentemente encontrada, de forma a reduzir os impactos irreversíveis (Assi et al., 2018). A produção de cimento é a terceira atividade responsável por mais emissões de CO_2 , para além de também produzir monóxido de carbono e outros metais pesados (Lei et al., 2011). Como referido anteriormente, espera-se ainda um aumento do seu consumo a curto prazo, sendo importante encontrar uma solução mais sustentável como alternativa a este ligante.

A acrescentar aos problemas da indústria da construção e em específico do betão, existe também uma preocupação crescente na gestão da enorme quantidade de resíduos que são gerados e não reutilizados durante as atividades de construção e demolição. Do total de resíduos produzidos pela UE, 36% são provenientes da construção e demolição (Eurostat, 2021). Mas esta questão pode ser evitável, recorrendo à reutilização destes resíduos e criando políticas para a sua diminuição. Desta forma, haveria um menor impacto na ocupação de aterros, no consumo de recursos naturais e na poluição da água e ar, devido a extrações e despejos ilegais. Atualmente, existem incentivos e exigências para a reciclagem destes resíduos. No entanto, ainda existe um longo caminho a percorrer, como por exemplo, disponibilizar para a indústria da construção ligantes e agregados alternativos que diminuam os vários impactos referidos.

Em 2016, foi iniciada uma nova linha de investigação no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (IST), com o objetivo de encontrar uma solução alternativa à utilização excessiva de cimento, visando-se desenvolver um novo ligantes hidráulico de baixo carbono, obtido por termoativação de resíduos de materiais cimentícios – o cimento reciclado (CR) (CDWvalue) As atividades realizadas até ao momento foram essencialmente focadas na produção e caracterização do CR, no desenvolvimento de uma metodologia inovadora de separação dos constituintes de betão para obtenção de fração cimentícia adequada à produção de CR, bem como a caracterização de materiais de base cimentícia produzidos com CR, essencialmente produzido a partir de pastas de cimento artificiais (Bogas et al., 2022a; Bogas et al., 2019, 2020; Carriço et al., 2021; Carriço et al., 2022; Carriço et al. 2020; Real et al., 2021; Real et al., 2020). Este trabalho foi iniciado e tem sido desenvolvido no âmbito do projeto de investigação FCT PTDC/ECI-COM-28308/2017, *EcoHydB - Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials*, visando caminhar para a produção de betões de maior sustentabilidade. No entanto, no âmbito deste projeto, ainda não foi possível progredir no sentido de produzir e caracterizar betões totalmente reciclados, em que se faça a combinação simultânea da incorporação de cimento e agregados reciclados. Este objetivo ambicioso permite responder de forma mais cabal aos 3 grandes desafios da indústria da construção: reciclagem; neutralidade carbónica; conservação de recursos naturais. Nesse sentido, foi desenvolvido o presente trabalho, que também se insere no âmbito do projeto *EcoHydB*.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIAS

O presente trabalho tem como objetivo principal a produção e caracterização de betões com diferentes tipos de ligante e de agregado reciclado, caminhando-se para o desenvolvimento de uma nova geração de betões 100% reciclados, de elevada sustentabilidade e circularidade. Para tal, é

considerada a incorporação de cimento reciclado produzido a partir de pasta (CRP) ou diretamente do betão (CRB), recorrendo ao método de separação desenvolvido no âmbito do *EcoHydB*, bem como de agregados grossos e finos reciclados de diferente natureza: obtidos de britagem primária (ARB); obtidos de britagem e tratamento térmico (ART) seguido de moagem autogénea; areias obtidas a partir do método de separação referido, em que se permite uma eliminação mais efetiva da pasta aderida ao agregado (AS). Os betões produzidos com estes materiais foram posteriormente caracterizados no estado fresco e endurecido, em termos de comportamento mecânico e resposta a ações diferidas, analisando-se a influência de cada um destes materiais no desempenho do betão.

Basicamente, o trabalho foi desenvolvido em 3 fases, envolvendo a produção de materiais reciclados, produção e moldagem de provetes de betão e a sua subsequente caracterização. Os vários tipos de agregado, bem como a fração cimentícia utilizada para a produção de CR, foram obtidos de betões (BO) e pastas de origem (PO). Assim, inicialmente, foram produzidos os BO e PO, que, posteriormente, foram sujeitos a etapas de britagem, moagem e eventual separação, conduzindo à obtenção de agregados reciclados e de fração cimentícia. Numa fase seguinte, parte dos agregados reciclados foram sujeitos a pré-tratamentos de remoção da pasta aderida (ART e AS), visando melhorar a sua qualidade, enquanto a fração cimentícia foi termoativada de modo a se obter o CR.

Numa segunda etapa do trabalho, procedeu-se à produção dos betões com os diferentes tipos de ligante e agregados reciclados, considerando distintas relações água/cimento (a/c) (0,65-0,7), de modo a se atingirem soluções de composição semelhante numa dada gama de trabalhabilidade. Em paralelo, foram igualmente produzidos betões de referência, utilizando cimento tipo I (CEM I) e agregados grossos e finos naturais.

Finalmente, os betões foram caracterizados no estado fresco e endurecido. A caracterização no estado fresco envolveu ensaios de trabalhabilidade e massa volúmica fresca e no estado endurecido ensaios de massa volúmica, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração autogénea e por secagem e fluência. Em paralelo a este trabalho, encontra-se em fase de desenvolvimento um outro estudo que visa a caracterização destes betões em termos de durabilidade, também realizado no âmbito do projeto *EcoHydB*.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O documento é composto por cinco capítulos e cinco anexos. O primeiro e presente capítulo é dedicado à introdução, enquanto os restantes capítulos encontram-se organizados do seguinte modo:

No segundo capítulo, apresenta-se o Estado da arte, onde é feito o enquadramento do tema da dissertação. Inicialmente, são abordados os impactos ambientais da produção do betão e dos seus componentes. De seguida, é destacado potencial do tratamento de resíduos de betão e da sua utilização como agregado reciclado. É ainda focado o estado do conhecimento no domínio do cimento reciclado produzido a partir de resíduos de materiais cimentícios. Por fim, são apresentadas as últimas investigações e conclusões relativas ao comportamento mecânico de betões com incorporação de agregados reciclados e cimentos reciclados.

O terceiro capítulo descreve a campanha experimental, onde são apresentados os materiais utilizados, a produção inicial dos betões e pastas de origem, os diferentes processos de obtenção de cimento reciclado, a produção e tratamento dos agregados reciclados, bem como a sua caracterização, e, finalmente, a produção de betões reciclados e os ensaios efetuados para a sua caracterização no estado fresco e do seu desempenho mecânico.

No quarto capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais, sendo feita a discussão dos mesmos, através da análise da influência do cimento reciclado, dos agregados finos reciclados e os agregados reciclados no desempenho no estado fresco e mecânico do betão.

O quinto capítulo é composto pelas conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e ainda os anexos que completam a informação dos resultados da campanha experimental.

2. ESTADO DA ARTE

No presente capítulo, é efetuado um breve enquadramento geral do tema da dissertação, apresentando os temas principais para o desenvolvimento da mesma. Inicialmente, é abordado o tema da sustentabilidade e os impactos do betão e da indústria da construção. De seguida, são apresentados alguns estudos desenvolvidos sobre cada componente do betão: o desenvolvimento das pesquisas de agregados reciclados de forma a tornarem-se substitutos dos agregados naturais (AN), sendo feita uma incorporação em parte ou total; a apresentação dos trabalhos existentes sobre a incorporação em parte ou total do cimento reciclado; e as conclusões sobre os mesmos. Por fim, apresentam-se alguns trabalhos de betão reciclado com a incorporação tanto de AR como de CR.

2.1 O IMPACTO DO BETÃO NO AMBIENTE

O betão é o material mais utilizado na indústria da construção. De forma geral, resulta da mistura de agregados, ligante e água. O seu custo reduzido, a sua multifuncionalidade e o facto de ser de fácil produção tornam o material económica e funcionalmente viável (Barcelo et al., 2014). No entanto, existem consequências ambientais associadas ao fabrico do betão, nomeadamente ao nível do ligante. A produção de cimento Portland consome muita energia, sendo esta atualmente responsável por 7% das emissões de CO₂ em todo o mundo (Assi et al., 2018). Dado o impacto no ambiente e o aumento da sua produção, que se espera ser 4 vezes superior daqui a 30 anos, têm sido investigadas formas de reaproveitar os componentes do betão de forma a reduzir o desperdício e a emissão de gases nocivos (Assi et al., 2018). Os métodos tradicionais a ser investigados para mitigar os efeitos da produção são: o aumento da eficiência energética; a procura e utilização de combustíveis alternativos; a substituição parcial do clínquer no cimento (Benhelal et al., 2013).

Para produzir o clínquer, componente principal do cimento, é necessário aquecer calcário e argila a temperaturas de 1450°C. É esta a ação que causa maior consumo energético e emissão de poluentes, representando cerca de 90% das emissões da produção de cimento. A relação entre produção de clínquer e emissões de CO₂ torna este o principal alvo de investigações de forma a reduzir o seu impacto, dado que por cada tonelada de clínquer produzido são emitidas cerca de 0,86 toneladas de CO₂ e o gasto energético estimado é de 4,2GJ por tonelada (Barcelo et al., 2014).

A produção de cimento não é a única atividade associada a questões de sustentabilidade, quando o assunto é betão. Anualmente, estima-se que são produzidos dez biliões de toneladas de betão (Meyer, 2009), com consumo elevado de agregados naturais, cujo volume na composição do betão é de cerca de 80 a 85% (Chi et al., 2003). A extração da sua matéria-prima tem efeitos nocivos diretos

para o ambiente, nomeadamente: a diminuição da qualidade do ar devido às poeiras; a contaminação das águas; a perturbação dos habitats naturais; a alteração da orografia (Estanqueiro et al., 2012).

Por outro lado, atualmente, a indústria da construção cria um elevado desperdício de betão, não sendo a sua maioria reaproveitada. A nível europeu, dos cerca de 350 milhões de toneladas de resíduos provenientes da construção e demolição, apenas 9,4% de resíduos é reutilizado como agregado anualmente (Comissão Europeia, 2012), havendo potencial de evolução. A sua utilização é, maioritariamente, para aplicações de menor exigência, tal como na construção de estradas e pavimentos. No entanto, existem estudos que justificam uma melhor utilização dos agregados reciclados, por exemplo, em betão estrutural (Gebremariam et al., 2020). Com projeções de aumento da produção e uso do betão, devido ao crescimento populacional (Mehta, 2014), é cada vez mais notória a preocupação com o reaproveitamento dos materiais de construção.

2.2 AGREGADOS RECICLADOS

Atualmente, o setor da construção está a evoluir e conseqüentemente o aumento da necessidade de matéria-prima. Dado que os agregados compõem a maior parte do betão corrente, existem problemas de sustentabilidade, devido ao grande consumo de agregados naturais. Por outro lado, existe uma imensa quantidade de material desperdiçado proveniente da construção e demolição que não é utilizado ou reaproveitado. Em 2018, os 28 membros da União Europeia produziram cerca de 372 MT de material de demolições e desperdício (Eurostat, 2021), e que grande parte não foi reaproveitado, tendo sido colocado em aterro. Para que haja um aumento da sustentabilidade destes componentes, existem várias investigações a decorrer de forma que este material seja reutilizado na construção, não só a nível não estrutural, como a nível estrutural (de Juan et al., 2009; Etxeberria et al., 2007a; Evangelista et al., 2015; Tam et al., 2021). O objetivo é que estes materiais da construção e demolição, como argamassas, betão, cerâmicos e outros materiais, possam ser reaproveitados e capazes de fazer parte de misturas de betão viável a nível mecânico e de durabilidade.

Apesar da reduzida utilização de agregados reciclados em materiais de construção, esta encontra-se regulada de acordo alguns documentos normativos (Bravo et al., 2018; Shi et al., 2016). De acordo com a especificação LNEC E 471 (2006), os agregados reciclados podem ser divididos em 3 grupos consoante a sua composição: ARB1, ARB2 e ARC (Tabela 2.1). Os ARB são materiais constituídos na sua grande parte por betão, misturado ou não com os agregados não ligados. Os ARC são constituídos principalmente por betão, agregados não ligados e elementos de alvenaria, sendo que não existe ou não estão determinadas percentagens para cada um dos componentes (E 471, LNEC, 2006).

Tabela 2.1 - Agregados reciclados (E 471, 2006)

Constituintes	ARB1	ARB2	ARC
Betão (%)	≥90	≥70	≥90
Agregados não ligados (%)			
Alvenaria (%)	≤10	≤30	≥90
Materiais betuminosos (%)	≤5	≤5	≤10
Partículas leves (%)	≤1	≤1	≤1
Outros materiais (%)	≤0,2	≤0,5	≤1

Como acontece no presente trabalho, o betão reciclado pode ser produzido com partículas de agregados de diversos tamanhos substituindo os diferentes AN usualmente utilizados (brita, bago de arroz, areia) por AR. No entanto, vários autores têm verificado que, devido ao facto de as propriedades dos AR utilizados serem geralmente mais fracas do que dos AN (Khatib, 2005; Topçu et al., 1995; Zhang et al., 2022), foram observadas diversas alterações nas propriedades do betão, nomeadamente menor trabalhabilidade (Grabiec et al., 2020), massa volúmica (al Ajmani et al., 2019), permeabilidade (Vieira et al., 2020), resistência mecânica (al Ajmani et al., 2019; Carvalho, 2021; Xiao et al., 2005) e módulo de elasticidade (Etxeberria et al., 2007b), bem como aumento da retração por secagem (Zhang et al., 2020) e deformação por fluência (Silva et al., 2015). Isto explica a razão pela qual a sua aplicação em grande escala na construção ainda não é efetuada.

De forma geral, os betões com AR tendem a apresentar um desempenho pior do que os com AN, essencialmente devido à quantidade de pasta aderida nos AR. De acordo com Topçu et al. (1995), a menor trabalhabilidade é explicada pela maior absorção dos AR, problema que pode ser evitado através da adição de água de absorção à mistura. Akbarnezhad (2011) correlacionou a pasta aderida, a absorção de água e a massa volúmica, tendo chegado à mesma conclusão (Figura 2.1).

A presença de pasta nestes agregados também pode causar o decréscimo da sua resistência mecânica caso esta seja fraca. Por exemplo, de acordo com Tam et al. (2021), num ensaio de resistência, caso a pasta aderida aos AR seja fraca, o betão irá sofrer a rotura não pelo agregado, mas pela interface entre a pasta aderida e o agregado. Por outro lado, a britagem do betão de origem para obtenção dos AR também afeta negativamente a resistência destes agregados e, por sua vez, do betão que será produzido (Cardoso et al., 2016). Tal acontece uma vez que os impactos da britadeira criam microfissuração nos agregados.

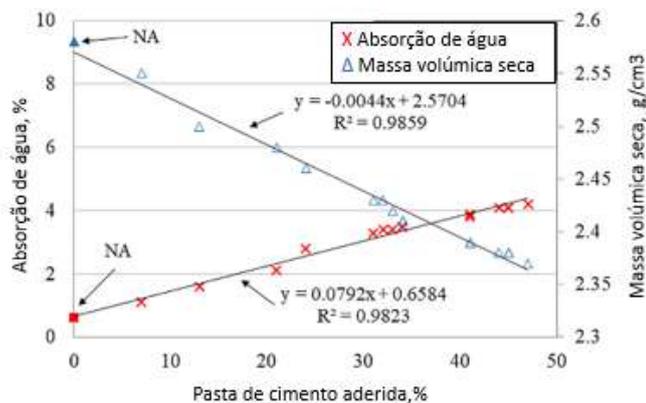


Figura 2.1 – Correlação pasta aderida, absorção de água e massa volúmica seca. Adaptado de Akbarnezhad et al. (2011)

Os trabalhos de investigação no sentido de melhorar as propriedades dos AR têm-se intensificado, focando principalmente o tratamento dos agregados com o principal objetivo de remoção da pasta presente nos AR sem prejudicar as suas características, que como referido anteriormente é um dos principais motivos da menor capacidade mecânica dos betões com este tipo de agregado.

A Figura 2.2 mostra alguns dos tratamentos utilizados de forma a melhorar as propriedades dos AR através da remoção da pasta de cimento aderida. Dado que alguns tratamentos/métodos, como a utilização de micro-ondas, ultrassons e eletricidade, implicam um elevado consumo de energia, no presente trabalho, foram utilizados apenas tratamentos físicos, nomeadamente mecânicos e termomecânicos. Com estes tratamentos foram obtidos agregados reciclados britados (ARB) e agregados reciclados termicamente tratados (ART).

Grande parte dos estudos realizados abrangem essencialmente a substituição de AN por ARB, maioritariamente agregados grossos (Etxeberria et al., 2007b; Pacheco et al., 2019; Rahal, 2007; Raman et al., 2021). Como forma de melhorar os AR destacam-se os ART. Os ART são ARB que depois de realizada a britagem são termicamente tratados. Com o aumento da temperatura ocorrem variações dimensionais diferenciais entre o agregado e a pasta, promovendo assim a separação dos dois componentes. Segundo Hu (2019), a metodologia que apresenta melhores resultados para separação de pasta-agregados é a aplicação de uma temperatura de 400°C, permitindo a remoção de cerca de 20% da pasta aderida sem alterar significativamente as características físicas do material. Algumas patentes, como a CN1857782A, US7258737B2 e CN105271858A, adicionaram procedimentos mecânicos de moagem depois do tratamento térmico, de forma a aproveitar as fragilidades da interface entre o agregado e a pasta aderida e conseguirem a sua separação.

Al-Bayati et al. (2016) avaliaram o efeito do tratamento térmico dos AR a temperaturas entre 250 e 750°C. Os autores constataram que o procedimento que conduzia a um ART com melhores propriedades era o tratamento dos AR a cerca de 350°C, seguido de um curto tratamento mecânico. A aplicação de temperaturas mais elevadas (500 e 750°C) teve efeitos negativos nas propriedades físicas dos ART.

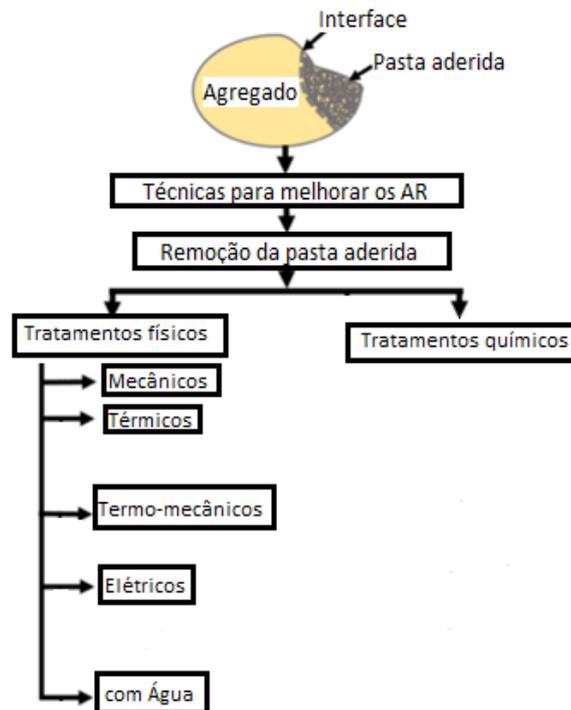


Figura 2.2 - Diagrama de técnicas de melhoria da qualidade dos AR de betão pela remoção da pasta aderida. Adaptado de Soomro e Evangelista (2021)

De referir ainda que a reciclagem de outros componentes que garantam a qualidade do betão e a sustentabilidade (vidro, pneus, plásticos) (Meyer, 2009) também é uma das várias soluções para a diminuição do uso de agregados naturais grossos, embora não seja o foco da presente dissertação.

Ainda que o uso de AR contribua para o reaproveitamento de resíduos de construção e redução do uso de agregados naturais, não resolve o problema das elevadas emissões de CO₂ associadas à produção de betão, que é essencialmente atribuída à produção de cimento, em particular do clínquer.

2.3 CIMENTO RECICLADO

Como referido anteriormente a produção de cimento representa uma parte significativa das emissões globais de CO₂ (WBCSD, 2009). É também um facto que os resíduos de construção e

demolição são cerca de metade dos resíduos industriais, contendo um volume considerável de materiais cimentícios (Kwon et al., 2015).

Ultimamente, várias investigações têm tido como foco a reativação e reidratação do cimento reciclado (Bogas et al., 2019; Carriço et al., 2020; Florea et al., 2014; Serpell et al., 2015; Vyšvařil et al., 2014; Wang et al., 2018; L. Zhang et al., 2018). Estes trabalhos têm como objetivo criar alternativas economicamente viáveis e que originem uma alternativa sustentável aos ligantes atuais intensivos em carbono, como o cimento reciclado (CR). Este novo ligante de baixo carbono é obtido através de ativação térmica do desperdício cimentício a temperaturas inferiores às que são necessárias para produzir o cimento Portland. No entanto, as propriedades deste material dependem de diversos fatores como: as condições do tratamento térmico, origem dos materiais, finura do CR e composição da pasta.

A Figura 2.3 mostra um exemplo adaptado de Carriço et al. (2020) que retrata a utilização e reaproveitamento do material cimentício na indústria da construção. Primeiramente, é feita a britagem dos elementos provenientes dos resíduos de construção e demolição de forma a facilitar os processos seguintes e para que estes sejam eficazes. Seguidamente, é feita a separação dos constituintes, onde é obtida a fração cimentícia e do agregado. O material é reduzido até dimensões semelhantes a partículas de cimento. Por fim, é tratado termicamente para que tenha capacidade de reidratação.

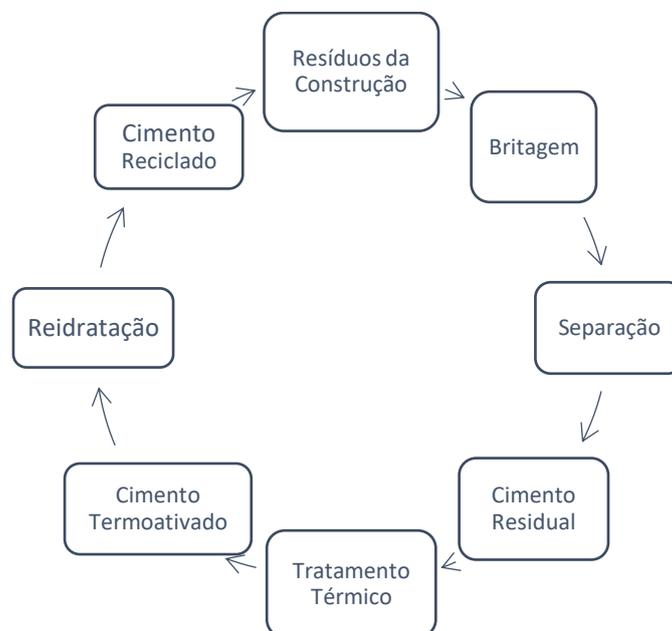


Figura 2.3 – Materiais cimentícios termooativados a partir de resíduos de materiais à base de cimento, economia circular. Adaptado de Carriço et al. (2020a)

Conforme referido em 2.2, existem mecanismos e métodos para ser efetuada a separação dos constituintes do betão, mas estes têm como foco principal a obtenção de agregados reciclados. No entanto, têm surgido métodos de separação com o objetivo de obter a fração cimentícia do betão como, por exemplo, a utilização de rolo magnético permanente, mesa Wilfley ou mesa Mozley (Hu, 2019). Recentemente, no âmbito do projeto *EcoHydB*, foi desenvolvido um método de separação inovador com recurso a um rolo magnético permanente (Patente A116130 (Bogas et al., 2020)) (ver 3.5.2). No entanto, dada a dificuldade de separação dos constituintes do betão, a maioria das investigações foca-se no tratamento de resíduos de pasta para produção de cimento reciclado.

Vários autores têm estudado o efeito da temperatura nas propriedades do CR (Shui et al. 2008, Serpell et al. 2015, Wang et al. 2018, Real et al. 2020). Por razões técnicas, económicas e ambientais, a maior parte dos autores que estudam o tratamento térmico do CR adotam temperaturas de tratamento entre os 600-800°C, dado ser o patamar onde ocorre, normalmente, a desidratação do cimento hidratado, recuperando as propriedades hidráulicas, sem descarbonatação significativa (Carriço et al., 2020; Yu et al., 2013; Zhang et al., 2018).

De forma a encontrar a melhor temperatura de tratamento térmico para o cimento reciclado de pasta (CRP), depois de britar e crivar a uma dimensão de 75 µm, Shui et al. (2008) caracterizaram o cimento depois ter sido sujeito a temperaturas até 900°C. Os autores reportaram que a temperatura ótima seria entre 700 e 800°C. Todavia, a pasta de CRP apresentou uma menor resistência à compressão do que a pasta de CEM I, independentemente da temperatura de tratamento do CRP. De referir que esta investigação foi realizada com pasta de origem com 30 dias e parte significativa de cimento não hidratado terá contribuído para o processo de reidratação.

Por outro lado, Wang et al. (2018) produziram CR a partir de uma pasta de origem com 2 anos. Os autores analisaram o tratamento a temperaturas de 120°C, 450°C, 750°C e 1100°C, tendo constatado que a temperatura de tratamento que proporcionou o CRP com melhores características foi 450°C. A temperatura ótima obteve as melhores pastas de CRP com melhores resistências à compressão e apresentou a maior reatividade quando o CRP era misturado com água. Os 120°C não foram suficientes para o CRP atingir a reatividade e os 1100°C fizeram com que o C-S-H se transformasse em wollastonite e larnite, tornando-o muito pouco reativo. A pasta com CRP tratado a 450°C atingiu a mesma resistência que a pasta com CEM I, mas apresentou uma trabalhabilidade muito baixa. Assim, os autores concluíram ser possível produzir pastas com CRP com uma resistência similar à da pasta de CEM I e ainda reduzir as emissões de CO₂ e o consumo de energia.

Real et al. (2020) também analisaram a influência de temperaturas de tratamento entre 400 e 900°C nas propriedades do CR. Os autores destacaram a despolimerização do C-S-H e formação de um

novo polimorfo de C_2S de reatividade elevada, α'_1-C_2S , a 600-750°C, e formação de $\beta-C_2S$, acima de 800°C. Com base na caracterização mecânica e microestrutural das pastas de CR, os autores concluíram que a temperatura de tratamento ótima era de 600-650°C.

Zhang et al. (2018) e Baldusco et al. (2019) confirmaram a elevada reatividade do CR, que resulta no maior calor de hidratação, que as pastas com CR apresentam nas primeiras idades, tendo sido até cerca de 10-15 vezes superior à do CEM I.

Real et al. (2020) verificaram ainda que a exigência de água dos CR foi até 3 vezes superior à do CEM I. Outros autores também reportaram a necessidade de água elevada do CR, sendo atribuída à sua elevada superfície específica, à absorção de água e à aglomeração das partículas de CR, bem como à presença de CaO livre no CR (Xuan et al., 2011; Yu et al., 2013; Zhang et al., 2018; Baldusco, 2019).

Vários autores destacam o reduzido tempo de presa do CRP (Shui et al. 2009, Yu et al. 2013, Vysvaril et al. 2014, Zhang et al. 2018). Xuan et al. (2011) referem que tal se deve à elevada reatividade do CRP. No entanto, outros autores obtiveram maiores tempos de presa do que os do CEM I, associando os resultados à dimensão das partículas e à possível pré-hidratação do CRP (Bogas et al. 2019; Carriço et al. 2020; Real et al. 2020).

Apesar de geralmente inferior à de pastas de CEM I, de acordo com a literatura, as pastas de CRP podem atingir resistências à compressão de ter 32 MPa aos 28 dias (Wang et al. 2018). Bogas et al. (2020) referem que as pastas de CRP tratado a 600-700°C atingiram resistências à compressão aos 3 dias semelhantes às de pasta de CEM I com a mesma relação a/l (0,72). No entanto, aos 28 dias, a resistência à compressão das pastas de CRP foi cerca de 73% da de CEM I. O rápido desenvolvimento de resistência das pastas de CRP tem sido justificado pela sua elevada superfície específica (Shui et al. 2009; Baldusco et al. 2019). Adicionalmente, Bogas et al. (2020) explicam que, durante a mistura, parte da água é absorvida pelas partículas porosas de CRP, formando produtos de hidratação internos, e reduzindo a água disponível entre partículas. Desta forma, ocorre uma redução da relação água/ligante da pasta e as partículas de CRP aproximam-se, acelerando a coesão entre e, conseqüentemente, melhorando a resistência inicial. No entanto, para idades mais avançadas, as pastas de CEM I tendem a formar maior quantidade de produtos de hidratação externos do que as pastas de CRP.

2.4 BETÃO RECICLADO

Nas últimas décadas, têm sido publicados diversos estudos com incorporação parcial ou total de agregados reciclados obtidos a partir de resíduos de construção e demolição, nomeadamente de betão reciclado.

Yamato et al. (1998) caracterizaram as propriedades mecânicas do betão com AR, tendo observado um decréscimo de 20%, 30% e 45% de resistência mecânica para uma substituição de AN por AR grossos de 30%, 50% e 100%, respetivamente. Concluíram também que a presença de pasta nos agregados e as microfissuras nos AR contribuíam para a menor capacidade resistente.

Etzeberria et al. (2007b) substituíram 100% dos agregados por ARB e a resistência à compressão foi cerca de 20-25% menor do que a do betão de referência com a mesma relação a/c efetiva (0,5) e para a mesma quantidade de cimento (325 kg/m^3). Neste mesmo estudo, também se investigou de que forma seria possível o betão com ARB atingir a mesma resistência que a do betão corrente. Para uma substituição de 50%, foi necessário adicionar 6% de massa de cimento à mistura e para 100% de ARB adicionaram-se 8,3%.

Tabsh et al., (2009) produziram betão com ARB grossos provenientes de betões com diferentes resistências à compressão (30MPa e 50MPa). Os autores verificaram que a redução das propriedades mecânicas era mais acentuada nos betões com ARB provenientes do betão de 30MPa do que nos betões com ARB provenientes do betão de 50MPa e que este último obtinha resistências muito próximas ao betão de referência produzido com AN grossos.

Evangelista (2007) estudou o comportamento mecânico do betão com a incorporação de agregados reciclados finos (ARF) e concluiu, depois de efetuada a campanha experimental, que a resistência à compressão não parecia ser afetada com a incorporação de até 30% de ARF. O autor reportou que os ARF utilizados foram obtidos a partir de misturas de betão produzidas em laboratório, o que levou à britagem e peneiração controladas dos agregados. O autor referiu que os agregados obtidos a partir de construções e demolições, provavelmente terão detritos com capacidade de reduzir o desempenho do betão. Noutro estudo sobre a substituição dos AN por ARF provenientes de resíduos do betão, foi reportado que as frações de menor tamanho apresentavam elevada quantidade de pasta e escassa presença de AN. Por outro lado, os ARF de maiores dimensões apresentam na sua composição uma reduzida fração de pasta (Evangelista et al., 2015).

Khatib (2005) investigou as propriedades do betão com ARF de betão. O autor observou uma redução da resistência quando a areia foi substituída por ARF de betão, tendo atingido um decréscimo da resistência à compressão de até 30% quando o AN fino foi substituído na totalidade.

Num estudo mais recente, Carvalho (2021) obteve uma resistência à compressão de betão com incorporação de agregados grossos reciclados britados (ARB) apenas 7% menor do que a do betão de referência e em betão com agregados grossos reciclados tratados termicamente a 300°C (ART) observou uma diminuição de 2% em relação ao betão de referência.

Apesar de existirem diversos estudos no âmbito da incorporação de AR em betão, o conhecimento no domínio da incorporação de CR em betão ainda é escasso.

Real et al. (2021) analisaram a influência da incorporação de 5-100% de CRP tratado a 650°C em betão no comportamento físico e mecânico do betão, tendo constatado que, em geral, a resistência mecânica não foi influenciada de forma relevante pela incorporação de CRP. No entanto, o módulo de elasticidade diminuiu, devido à menor rigidez das partículas de CRP. Os autores avaliaram ainda o efeito da incorporação de 15-30% de CR obtido a partir da fração cimentícia de betão reciclado (CRB) separada magneticamente, tendo constatado que a resistência mecânica não foi significativamente afetada para percentagens de substituição até 15% de CRB.

Qian et al. (2020) produziram betão de alta resistência com incorporação de CRP tratado a 650°C. Os autores verificaram que a resistência à compressão tendia a diminuir com a percentagem de incorporação de CRP, tendo atribuído os resultados ao maior volume de vazios destes betões, associados a menor trabalhabilidade.

Letelier et al. (2017) investigaram a resistência à compressão de betão produzido com 20-40% de AR e 5-15% de CRB, e concluíram que a combinação ótima, para que não houvesse perda de resistência mecânica, seria uma mistura com 20% de AR e 5% de CRB. Os mesmos relatam que o estudo era pioneiro e que poderiam ser feitas alterações às metodologias utilizadas de forma a criar um betão mais sustentável e parecido com o betão corrente.

Carvalho (2021) caracterizou o comportamento mecânico de betões produzidos com ART e 15-30% de CRP, tendo observado que a resistência à compressão dos betões com ART e até 15% de CRP não foi afetada significativamente, enquanto com a incorporação de 30% de CRP ocorreu um decréscimo de 10% em relação à mistura de referência (AN e CEM I). O autor concluiu assim, que a incorporação de materiais reciclados como os agregados e o cimento podem ser utilizados em simultâneo, obtendo resultados viáveis.

Apesar de existirem alguns estudos de betão produzido com diferentes percentagens de incorporação de AR ou de CR, ainda é escasso o conhecimento do desempenho de betões com incorporação de ambos, caminhando no sentido da produção de betão 100% reciclado.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

De modo a cumprir os objetivos definidos no capítulo 1, foi desenvolvido um extenso trabalho experimental focado na análise da influência da incorporação de cimento reciclado e agregados reciclados de características melhoradas no comportamento mecânico e diferido do betão. O capítulo está organizado de acordo com as várias fases e procedimentos realizados em laboratório, sendo estas a produção do betão e pasta de origem, a produção do cimento e agregados reciclados, a caracterização respetiva dos materiais e a caracterização dos betões no estado fresco e endurecido (massa volúmica, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração autogénea e por secagem e fluência).

O trabalho foi efetuado no Laboratório de Construção (LC), de Estruturas (LERM) e de Geociências e Geotecnologias (GeoLab) do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do IST; bem como no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O trabalho foi realizado no âmbito de um projeto de investigação em curso: *EcoHydB* – “Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials” - PTDC/ECI-COM-28308/2017.

3.2 VISÃO GLOBAL DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado de acordo com 3 etapas essenciais: produção de pasta e betão de origem; produção de agregado reciclado de betão (ARB, ART e AS) e cimento reciclado (CRP e CRB); produção e caracterização de betões com incorporação de CR e agregados reciclados.

Inicialmente, foram produzidos vários provetes de betão, com uma composição representativa de misturas correntes observáveis em betões antigos, bem como provetes com apenas a pasta utilizada na execução dos betões. Os provetes de pasta visam dois objetivos: a produção de cimento reciclado sem contaminação de agregados, de modo a analisar o máximo do seu potencial em misturas de base cimentícia; produção de maiores quantidades de resíduos de pasta de cimento, permitindo a realização atempada dos vários trabalhos experimentais. Os vários provetes foram curados até pelo menos 120 dias de idade, de modo a apresentarem um grau de hidratação que simulasse o de resíduos de betão antigo. Seguidamente, os provetes de pasta foram sujeitos a britagem, moagem, peneiração e termoativação, tendo por base um procedimento previamente definido em outros trabalhos, permitindo obter cimento reciclado de pasta (CRP). Por sua vez, os provetes de betão foram sujeitos a diferentes procedimentos conforme o objetivo: britagem e moagem para a produção direta de

agregados reciclados (ARB); britagem seguida de tratamento térmico e moagem autogénea para obtenção de agregados grossos de melhor qualidade (ART); moagem seguida de implementação de um processo inovador de separação idealizado no âmbito do projeto de investigação em que se insere o presente trabalho, com o objetivo de se obter uma fração cimentícia mais pura e agregados finos de melhor qualidade (AS). Assim, após esta fase foram obtidos os seguintes materiais:

- CRP – Cimento reciclado proveniente de pasta
- CRB – Cimento reciclado proveniente de betão
- ARB – Agregado reciclado obtido de britagem primária do betão
- ART – Agregado reciclado obtido após britagem, tratamento térmico e moagem autogénea
- AS – Areia reciclada de melhor qualidade, após separação dos constituintes de betão, tendo por base uma metodologia idealizada no âmbito do projeto *EcoHydB*.

Posteriormente, procedeu-se à formulação e produção dos vários betões, com inclusão dos vários tipos de cimento e agregado reciclado. Os betões foram moldados em diferentes tipos de provetes, consoante o tipo de ensaio a realizar.

Finalmente, o betão foi caracterizado no estado fresco e endurecido. Para o estado fresco, foram realizados ensaios de abaixamento e massa volúmica fresca. No estado endurecido, foram efetuados ensaios de massa volúmica, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração autogénea e por secagem e fluência.

3.3 PRODUÇÃO DO BETÃO E PASTA DE ORIGEM

Conforme referido, foram produzidos provetes de betão e pasta de origem, para futura reutilização na produção de cimento reciclado e agregados reciclados. Na produção do betão de origem foi utilizado cimento tipo I 42,5 R, cujas principais propriedades físicas, químicas e mecânicas se apresentam na Tabela 3.11, bem como os seguintes agregados naturais (AN): brita 2, brita 1 e bago de arroz de origem calcária, provenientes da Pedreira do Galo em Sesimbra; areia grossa de origem siliciosa proveniente de Pinhal do Conde no Seixal; areia fina siliciosa proveniente da Herdade de Mesquita em Sesimbra. Na Tabela 3.1, resumem-se as principais propriedades físicas, geométrica e de resistência à fragmentação dos agregados utilizados, segundo as normas apresentadas.

O betão de origem foi formulado de modo a apresentar uma relação a/c de 0,55 e uma dosagem de cimento de 360 kg/m³, para um agregado de dimensão máxima de 20 mm. Este betão visa ser representativo de composições médias possíveis em resíduos de betão, para uma classe de resistência C35/45. Em estudo recentes realizados no âmbito do projeto EcoHydb, verificou-se que a composição do betão de origem, para relações a/c entre 0,35 e 0,55, não tem grande influência nas características do cimento reciclado e na capacidade de separação constituintes de betão (Cyrne, 2022; Real et al., 2021). Na Tabela 3.2, encontra-se a composição da mistura do betão de origem.

Tabela 3.1 - Propriedades dos Agregados Naturais (AN)

Propriedade	Norma	Areia	Areia	Bago de	Brita	Brita
		Fina	Grossa	Arroz	1	2
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	NP EN 1097-6 (2016)	2608	2617	2698	2706	2683
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	NP EN 1097-6 (2016)	2598	2599	2669	2683	2650
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	NP EN 1097-6 (2016)	2602	2606	2680	2691	2662
Abs, total 24h (%)	NP EN 1097-6 (2016)	0,15	0,26	0,39	0,31	0,46
Baridade (kg/m ³)	NP EN 1097-3 (2002)	1588	1606	1424	1420	1462
Vazios entre partículas de agregado (%)	NP EN 1097-3 (2002)	39,1	38,4	45,4	47,5	45,5
Índice de achatamento	NP EN 933-3 (2014)	-	-	25,2	15,3	8,1
Fragmentação LA (%)	NP EN 1097-2 (2011)	-	-	-	27	28,8

A produção dos betões foi realizada no LC, recorrendo a uma betoneira de eixo vertical com capacidade de 80 L (Figura 3.1). Antes de se iniciar a betonagem, a misturadora foi barrada com uma argamassa de cimento e areia fina de modo a garantir a sua estanqueidade. Os agregados foram colocados da maior dimensão para a menor, juntamente com metade da água de amassadura. Após 2 minutos de mistura, esta foi parada durante cerca de 1 minuto, retomando de seguida com a adição

do ligante e a restante água. Nesta última fase, o betão foi misturado mais 4 minutos, perfazendo um total de 7 minutos de mistura.

Tabela 3.2 - Composição do Betão de Origem (BO)

Designação	a/c	Brita 2 (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Bago de Arroz (kg/m ³)	Areia Grossa (kg/m ³)	Areia Fina (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Água (L/m ³)
BO	0,55	586	302	195	411	293	360	198



Figura 3.1 - Betoneira de eixo vertical utilizada para a produção de betão



Figura 3.2 - Produção da pasta de cimento

O betão de origem foi moldado em provetes de 300x150x150 mm para posterior britagem e moagem, tendo-se ainda produzido 3 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para caracterização da sua resistência à compressão aos 28 dias. Após 24 horas, os provetes foram desmoldados e curados em ambiente exterior com auxílio de pulverização de água periódica durante os primeiros 7 dias de idade. Os provetes cúbicos foram curados em câmara húmida com humidade relativa (HR) superior a 95% até à idade de ensaio. Na Tabela 3.3, resumem-se os valores obtidos nos ensaios de abaixamento, massa volúmica fresca e resistência média à compressão aos 28 dias do betão de origem. A caracterização foi realizada de acordo com as normas NP EN 12350-2 (2009), NP EN 350-6 (2009) e NP EN 12390-3 (2011), respetivamente.

Tabela 3.3 - Caracterização do Betão de Origem (BO)

Designação	a/c	Abaixamento	M.V. Fresca	Resistência à compressão,28d	CV
BO	0,55	145 mm	2350 kg/m ³	54 MPa	2,35%

Em paralelo, foram produzidos provetes de pasta, com igual composição à utilizada na produção do betão de origem. Como referido, o objetivo foi permitir a obtenção atempada de um maior volume de cimento reciclado, bem como a produção de um ligante reciclado não contaminado por agregado (aumentando o seu potencial e facilitando a análise isolada da sua influência). As pastas foram produzidas com o cimento tipo I 42,5 R apresentado na Tabela 3.11, para uma relação a/l de 0,55. Isso corresponde a uma composição de 1032 kg/m³ de cimento e 568 L/m³ de água.

A pasta de origem foi produzida com auxílio de um berbequim misturador, recorrendo a um recipiente de 50 L (Figura 3.2), tendo o cimento e a água sido adicionados ao longo do tempo da mistura (4 minutos). Tal como para os provetes de betão, após 24 horas, os provetes foram desmoldados e colocados em ambiente exterior, onde foram curados com auxílio de pulverização de água periódica durante os primeiros 7 dias de idade. Em simultâneo, foram produzidos 3 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para caracterização da resistência à compressão, tendo sido curados em câmara húmida até à idade de ensaio. Na Tabela 3.4, resumem-se os valores de massa volúmica fresca e resistência à compressão aos 28 dias da pasta de origem, tendo seguido as normas NP EN 12350-6 (2002) e NP EN 12390-3 (2003), respetivamente.

Tabela 3.4 - Caracterização da Pasta de Origem (PO)

Designação	a/c	M.V. Fresca	Resistência à compressão,28d	CV
PO	0,55	1790 kg/m ³	37,1 MPa	1,92%

3.4 PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Nos próximos pontos, descrevem-se os procedimentos utilizados para a produção dos diferentes tipos de agregado reciclado referidos em 3.1, nomeadamente os ARB, ART e AS, bem como as suas principais propriedades físicas e geométricas.

3.4.1 Produção de ARB

Os agregados reciclados britados (ARB) foram obtidos através da britagem primária do betão de origem, com pelo menos 120 dias de idade. A sua produção consistiu na britagem dos blocos de betão de origem, utilizando uma britadeira de maxilas com uma abertura de 5-6 cm (Figuras 3.3 e 3.4). Após

britagem, os ARB foram peneirados e separados em diferentes frações granulométricas: <1 mm; 1-2 mm; 2-4 mm; 4-8 mm e 8-12,5 mm.



Figura 3.3 - Britadeira de Maxilas do LC



Figura 3.4 - Interior da Britadeira de Maxilas

3.4.2 Produção de ART

A produção de agregados termicamente tratados (ART) iniciou-se com a britagem do betão de origem, de acordo com o procedimento referido para os ARB. Em seguida, o material britado, não dividido por frações granulométricas, foi submetido a tratamento térmico em forno horizontal (Figura 3.5). O objetivo foi promover a libertação mais eficiente dos diferentes constituintes do betão (pasta de cimento e agregado), tirando partido das suas diferentes propriedades térmicas. Para melhorar o nível de libertação, o agregado resultante do tratamento térmico foi ainda sujeito a um processo de moagem autógena, com recurso ao moinho utilizado no ensaio de Los Angeles dos agregados (Figura 3.6).



Figura 3.5 - Forno Horizontal



Figura 3.6 - Moinho para realização da autógena dos ART



Figura 3.7 - Peneiro

Idealmente, tendo em consideração a realização de um trabalho prévio de otimização (Real et al., 2021), previa-se que o tratamento efetuado fosse realizado em forno rotativo a uma temperatura de 400°C durante 3 horas. Isso facilitaria a distribuição uniforme e mais eficiente da temperatura pelos agregados e ainda permitiria uma libertação mais eficiente dos constituintes, em resultado de ocorrer, em simultâneo, moagem autogénea no próprio forno. No entanto, o forno rotativo disponível apenas permitia o tratamento térmico de um pequeno volume de agregados por ciclo. Assim, devido à elevada quantidade de agregados necessária para a produção dos betões, optou-se por realizar o tratamento térmico em forno horizontal, seguido de moagem autogénea numa etapa independente. Porém, apesar do rendimento ser superior, a eficiência de libertação dos constituintes é inferior.

Visto que o forno horizontal é menos eficiente, foi necessário reajustar o procedimento adotado de modo a atingir-se um desempenho semelhante ao reportado em forno rotativo. Após vários testes prévios, recorrendo a diferentes períodos de tratamento térmico e moagem autogénea, optou-se pelo seguinte procedimento: tratamento térmico dos agregados a uma temperatura de 400°C durante cerca de 3 horas; moagem autogénea durante 15 minutos; peneiração em diferentes frações granulométricas, conforme realizado para o ARB (Figura 3.7). A escolha de uma temperatura de tratamento mais elevada teria aumentado o nível de eficiência da libertação. No entanto, para além de aumentar o consumo energético do processo, promove a alteração parcial das características dos agregados.

3.4.3 Produção de AS

A areia reciclada separada (AS) foi obtida através do processo de separação desenvolvido e patenteado no âmbito do projeto *EcoHydB*, em que também se insere o presente trabalho (Bogas et al., 2021). Basicamente, aproveitando as diferentes características magnéticas dos constituintes do betão, procedeu-se à produção de AS através da metodologia apresentada em 3.5.2, recorrendo de forma inovadora a rolos magnéticos de elevada intensidade. Inicialmente, procedeu-se à moagem e crivagem do betão de origem nas seguintes frações granulométricas, para as quais o método de separação é capaz de ser eficiente: 150-250 µm; 250-500 µm; 500-1000 µm. Posteriormente, aplicou-se o método de separação, tendo-se obtido uma fração de pasta de maior pureza e uma areia reciclada com as características indicadas em 3.4.4. A fração de pasta mais pura, foi posteriormente utilizada na produção de cimento reciclado diretamente recuperado de resíduos de betão (CRB).

3.4.4 Caracterização dos agregados reciclados

Os agregados reciclados de betão foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente a massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097-6, 2016), baridade (NP EN 1097-3, 2014), índice de achatamento (NP EN 933-3, 2014) e

resistência à fragmentação (NP EN 1097-2, 2011). Adicionalmente, devido ao facto de o tratamento térmico promover a desidratação parcial dos ART, também foi determinada a absorção de água resultante apenas da reidratação da pasta. Nas Tabelas 3.5, 3.7 e 3.9, apresentam-se os resultados dos ensaios aos ARB, ART e AS, respetivamente. Foi também determinada a eficácia do tratamento térmico e de moagem autogénea na libertação dos agregados dos restantes constituintes do betão e avaliada as porções de agregado limpo de cada fração granulométrica. A porção de agregado limpo dos ART foi determinada por meio de análise visual, onde o agregado foi considerado “limpo”, quando a quantidade de pasta de cimento aderida não foi significativa.

Tabela 3.5 - Propriedades dos Agregados Reciclados Britados (ARB)

Propriedade	Norma	ARB				
		Granulometria (mm)				
		<1	1-2	2-4	4-8	8-12,5
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2185	2193	2269	2324	2330
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2559	2601	2621	2651	2639
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2268	2293	2366	2429	2424
Absorção, total 1h (%)	-	8,44	8,20	6,25	5,39	5,30
Absorção, total 24h (%)	NP EN 1097- 6 (2016)	8,97	9,16	7,12	5,86	5,73
Baridade (kg/m ³)	NP EN 1097- 3 (2002)	1201	1044	1047	1084	1088
Vazios entre partículas de agregado (%)	NP EN 1097- 3 (2002)	42,3	50,3	52,6	52,7	52,5
Índice de Achatamento	NP EN 933-2 (2014)	-	-	-	25,8	20,0
	NP EN 12620 (2004)	FI _{NR}	FI _{NR}	FI _{NR}	FI ₃₅	FI ₂₀
Fragmentação LA (%)	NP EN 1097- 2 (2011)	-	-	-	-	57,3
	NP EN 12620 (2004)	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{Declarado}

Em média, o ARB fino apresentou uma massa volúmica seca em estufa 19,5% menor e uma absorção_{24h} cerca de 45 vezes maior do que a areia natural utilizada na produção do betão de origem (Tabela 3.5 e Tabela 3.1). Esta diferença está relacionada com a elevada quantidade de pasta aderida. Por sua vez, o ARB grosso, acima de 4 mm, apresentou uma absorção média 15 vezes superior à do agregado natural, sugerindo uma menor quantidade de pasta aderida do que na fração fina.

Tendo em consideração as massas volúmicas secas dos agregados naturais (Tabela 3.1) e dos AR (Tabela 3.5), e assumindo 1310 kg/m³ para a massa volúmica seca da pasta, é possível estimar a percentagem de volume de pasta endurecida aderida nos ARB e ART. Na Tabela 3.6, apresentam-se os valores estimados, em percentagem de volume e massa de pasta, assumindo ainda que os agregados naturais apresentam em média 2637 kg/m³ de massa volúmica seca, em face da sua composição no betão de origem (Tabela 3.1). Conforme seria esperado, confirma-se que o teor de pasta aderida ao agregado tende a ser maior nas frações de menor granulometria, onde se concentra o maior teor de cimento do betão.

Tabela 3.6 - Estimativa de pasta nos Agregados Reciclados Britados (ARB)

Parâmetro	ARB (<1mm)	ARB (1-2mm)	ARB (2-4mm)	ARB (4-8mm)	ARB (8-12,5mm)
Massa de pasta (%)	21,4	21,1	17,2	14,5	14,2
Volume de pasta (%)	31,4	30,9	26,4	23,1	22,8

Em relação aos ART, verifica-se uma melhoria geral das várias propriedades analisadas (Tabela 3.7), embora essa melhoria não tenha sido muito significativa face aos ARB. Nos agregados grossos, acima de 4 mm, a redução percentual média de absorção nos ART face aos ARB foi de apenas 10%. Como referido, uma razão deverá estar associada ao facto de neste trabalho não ter sido possível recorrer ao método mais eficiente de tratamento térmico em forno rotativo, com moagem autogénea simultânea. De facto, verificou-se que o tratamento térmico implementado foi pouco eficiente, tendo em consideração o compromisso necessário entre a redução do teor de pasta aderida e o impacto económico-ambiental. Na Tabela 3.7, observa-se ainda que a porção de agregado limpo foi mais importante entre as frações 2 e 8 mm, tal como já tinha sido observado no âmbito da patente de (Bogas et. al, 2020). Para frações maiores, a libertação resultante do processo mecânico e térmico foi menos eficiente.

Tal como realizado para os ARB, na Tabela 3.6, apresentam-se os valores estimados do volume e da massa de pasta nos ART (Tabela 3.8). Para partículas de dimensão superior a 1 mm, confirma-se a obtenção de agregados de melhor qualidade associados a menor teor de pasta aderida. Note-se que os

valores indicados referem-se a uma média, abrangendo desde agregados “limpos”, sem praticamente pasta aderida, a agregados em que a libertação foi ineficiente. Ainda assim, com o tratamento térmico, foi possível reduzir o volume de pasta aderida nos agregados grossos em cerca de 10% face aos ARB. Em relação ao material fino, abaixo de 1 mm, o ART apresentou maior teor de pasta do que o ARB. Isso resulta da ação térmica e mecânica promover uma maior geração de material fino associado a grandes teores pasta. De facto, visto que não se procedeu à peneiração do material abaixo de 1mm, este apresentou também a fração de pasta que foi libertada dos agregados.

Tabela 3.7 - Propriedades dos Agregados Reciclados Tratados (ART)

Propriedade	Norma	ART				
		Granulometria (mm)				
		<1	1-2	2-4	4-8	8-12,5
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2020	2369	2463	2416	2440
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2468	2701	2666	2713	2710
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2045	2378	2412	2468	2468
Absorção, total 1h (%)	-	14,98	6,83	5,83	5,39	5,21
Absorção, total 24h (%)	NP EN 1097- 6 (2016)	16,38	8,69	6,76	6,15	6,10
Absorção devido ao agregado, 24h (%)	-	-	7,56	4,58	5,41	5,01
Absorção devido à reidratação do cimento, 24h (%)	-	-	1,13	2,18	0,74	1,08
Agregado limpo (%)	-	-	-	44	38	25
Baridade (kg/m ³)	NP EN 1097- 3 (2002)	1206	1233	1273	1227	1269
Vazios entre partículas de agregado (%)	NP EN 1097- 3 (2002)	31,4	43,6	43,6	47,2	45,4
Índice de Achatamento	NP EN 933-2 (2002)	-	-	-	13,2	6,6
	NP EN 12620 (2004)	FI _{NR}	FI _{NR}	FI _{NR}	FI ₁₅	FI ₁₅
	NP EN 1097- 2 (2011)	-	-	-	-	61,6
Fragmentação LA (%)	EN 12620 (2004)	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{NR}	LA _{Declarado}

Tabela 3.8 - Estimativa de pasta nos Agregados Reciclados Tratados (ART)

Parâmetro	ART	ART	ART	ART	ART
	<1mm	(1-2mm)	(2-4mm)	(4-8mm)	(8-12,5mm)
Massa de pasta (%)	31,1	14,3	12,7	13,5	12,1
Volume de pasta (%)	41,1	22,8	20,8	21,9	20,0

A AS apresenta uma massa volúmica seca em estufa 12% maior e uma absorção de água às 24h 60% menor do que as partículas de ARB <1mm, provando que o processo de separação foi eficiente para a melhoria geral da qualidade dos agregados finos (Tabela 3.9). Em média, face às areias naturais, a massa volúmica foi 4,9 % inferior. Ainda assim, a absorção medida foi cerca de 10 vezes superior à dos agregados naturais, embora para valores baixos de 3,5%, em média. Estes valores são essencialmente afetados pela menor qualidade da fração 0,5-1 mm, para a qual não se procedeu à aplicação do método de separação, que é apenas eficiente para partículas inferiores a 0,5 mm (Bogas et al., 2020)

Tabela 3.9 - Propriedades da Areia Reciclada Separada (AS)

Propriedade	Norma	Areia Reciclada Separada		
		Granulometria (mm)		
		0,15-0,25	0,25-0,5	0,5-1
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2529	2507	2433
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2589	2574	2606
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	NP EN 1097- 6 (2016)	2456	2411	2500
Absorção, total 1h (%)	-	2,67	3,23	4,41
Absorção, total 24h (%)	NP EN 1097- 6 (2016)	2,72	3,53	4,48
Baridade (kg/m ³)	NP EN 1097- 3 (2002)	1216	1275	1266
Vazios entre partículas de agregado (%)	NP EN 1097- 3 (2002)	48,76	44,73	47,98

Adotando uma metodologia semelhante ao realizado para os restantes agregados, na Tabela 3.10, apresenta-se a proporção de pasta aderida para cada fração granulométrica. Para a frações sujeita a separação (0,15-0,5 mm), verificou-se uma contaminação média de cerca de 6% de pasta, sendo

inicialmente expectável valores menores. De facto, em trabalhos anteriores (Cyrne, 2022; Hu, 2019) foram reportados teores de pasta aderida nos agregados finos separados inferior a 3%, bastante menor do que o obtido no presente estudo. Assim, os valores indiciam que se terá atingido uma menor eficiência de separação neste trabalho. Porém, importa salientar que os valores de massa volúmica e absorção apresentados neste capítulo são baseados na realização de ensaios experimentais de difícil execução, em que a medição dos vários parâmetros não consegue ser muito rigorosa. Acrescenta-se ainda que foi utilizada uma metodologia utilizada para estimar o teor de pasta. Por sua vez, nos trabalhos de (Cyrne, 2022; Hu, 2019), a estimativa do teor de pasta aderida foi mais rigorosa, baseando-se em ensaios de perda de massa sobre várias amostras de pasta pura, agregado e do material separado que se pretendia analisar. Finalmente, como seria de esperar, a percentagem de pasta aderida foi bastante superior na fração 0,5-1 mm, que foi apenas sujeita a processos mecânicos de libertação, mas não ao método patenteado de separação.

Tabela 3.10 - Estimativa de pasta na Areia Reciclada Separada (AS)

Parâmetro	AS	AS	AS
	(0,15-0,25mm)	(0,25-0,5mm)	(0,5-1mm)
Massa de pasta (%)	5,5	6,7	9,7
Volume de pasta (%)	10,1	12,1	16,6

3.5 PRODUÇÃO DE CIMENTO RECICLADO

No presente trabalho, foram utilizados dois tipos de cimento reciclado, cimento proveniente da pasta de origem (CRP) e diretamente proveniente de betão de origem (CRB), ambos produzidos no LC. Nos próximos pontos, descrevem-se as várias etapas consideradas na produção destes materiais.

3.5.1 Britagem e moagem

Após pelo menos 120 dias de idade, procedeu-se o processo de britagem e moagem do betão e da pasta de origem com recurso a uma britadeira de maxilas existente no LC (Figura 3.3). Seguidamente, de modo a obter partículas suficientemente finas, foram realizadas várias etapas de moagem, recorrendo a uma britadeira de maxilas de menor abertura (Figura 3.8) e um moinho de rolos (Figura 3.9) localizado no Laboratório de Geociências e Geotecnologias (GeoLab) do IST. A britadeira de maxilas permitiu obter partículas com dimensão inferior a 2 cm, tendo esta uma abertura mínima de cerca 1 cm. O moinho de rolos permitiu obter partículas de dimensão maioritariamente inferior a 2 mm.

No caso do CR obtido de betão (CRB), os resíduos foram sucessivamente sujeitos a 3 passagens no moinho de rolos, de modo a obter um volume elevado de partículas abaixo de 1 mm (pelo menos 80%). Posteriormente, estes resíduos foram submetidos ao método patenteado de separação magnética descrito em 3.5.2, tendo-se aproveitado a fração de pasta purificada da fração 150-500 μm .

Finalmente, os resíduos de pasta ou os resíduos separados de betão foram moídos em moinho de bolas (Figura 3.10), de modo a atingirem dimensão próxima da considerada em cimentos correntes. A moagem foi realizada com recurso a 525 esferas de aço de diâmetros entre 20 e 30 mm. Antes de se proceder à moagem, procedeu-se à limpeza do moinho de bolas utilizando areia grossa e promoveu-se a secagem a 100°C do material resultante das moagens anteriores, de forma a minimizar a aglomeração das partículas finas de pasta no moinho de bolas. A moagem foi realizada durante 2 horas, a uma velocidade de 40 rotações por minuto, tendo-se recorrido a um aditivo de moagem convencional, gentilmente fornecido pela empresa SECIL.



Figura 3.8 - Britadeira de Maxilas do GeoLab



Figura 3.9 - Moinho de Rolos do GeoLab



Figura 3.10 - Moinho de Bolas do GeoLab

Após a moagem em moinho de bolas, foi efetuada a peneiração de uma amostra num peneiro de 250 μm de modo a verificar se a finura do material obtido era suficientemente elevada. Constatou-se que menos de 2% do material moído foi retido neste peneiro, considerando-se como tal que a moagem foi eficaz face ao realizado em trabalhos anteriores no âmbito do projeto *EcoHydB*.

3.5.2 Separação magnética

O método de separação magnética teve por base a separação dos constituintes de betão, partindo do pressuposto que estes possuem suscetibilidades magnéticas diferentes. De facto, o cimento ao apresentar óxidos de ferro na sua constituição (por exemplo, nos ferroaluminatos de cálcio), distingue-se dos agregados silícios e calcários, de características diamagnéticas (Bogas et al., 2021).

Assim, após a moagem e peneiração dos resíduos de betão nas várias frações granulométricas (3.5.1), este material foi sujeito a lavagem e secagem, de modo a remover as partículas ultrafinas aderidas na sua superfície e que dificultam o processo de separação magnética. Posteriormente, o material seco foi sujeito a pelo menos 2 passagens em rolo magnético (Figura 3.11), onde se promoveu a separação entre a fração de pasta e o agregado. Devido à força magnética aplicada pelo rolo magnético, as partículas de matriz cimentícia têm uma trajetória diferente das restantes, sendo assim possível realizar a separação dos constituintes do betão. A primeira passagem teve por objetivo separar o material de características mais não magnéticas, tendo-se obtido na fração magnética cerca de 40% do material original (Hu, 2019). O material não magnético foi utilizado com areia reciclada de melhor qualidade (AS). Depois, a fração magnética foi sujeita a nova passagem de modo a purificar o produto final, eliminando-se a fração mista associada a uma fraca libertação entre o agregado e a pasta. A descrição mais detalhada do método de separação pode ser encontrada em Hu (2019) e Bogas et al. (2021).



Figura 3.11 - Equipamento de separação magnética

O grau de pureza da fração de pasta separada de betão foi estimado por recurso a um ensaio expedito de quantificação de perda de massa em mufla. Uma amostra da fração de pasta e outra da pasta de origem (com composição igual à da pasta do betão) foram submetidas inicialmente a 150° C durante 1 hora e posteriormente a 350°C durante 3 horas, registando-se a perda de massa ocorrida entre estas temperaturas. Estas temperaturas foram escolhidas pelo facto de os agregados apresentarem uma perda de massa insignificante nesta região, ao contrário da pasta, em que ocorre a sua desidratação. Posteriormente, determinou-se o quociente entre a perda de massa da fração de pasta separada de betão e da pasta de origem, correspondendo esse valor à percentagem de pureza do produto final. Para o presente trabalho, estimou-se um teor de pureza de 74% em massa, ligeiramente inferior ao reportado por Cyrne, 2022 e Hu, 2019, mais perto de 80%.

De modo a estimar quantitativamente a percentagem de pasta presente no ARB e no ART, foi ainda realizado, para uma amostra de cada fração, um ensaio expedito de termogravimetria descontínua entre 350 °C e 550 °C. Com base na perda de massa medida para esta gama de temperatura numa amostra de ARB e ART e numa amostra de pasta de cimento, estimou-se assim a quantidade de pasta aderida (Tabela 7). Recorde-se que para esta gama de temperaturas ocorre a desidroxilação da fração cimentícia (Hu, 2019), bem como alguma desidratação parcial de produtos de hidratação remanescentes. Considera-se simplificadamente que os AR não apresentam perda de massa significativa para esta gama de temperaturas, conforme observado por Hu (2019), e que o nível de carbonatação da fração cimentícia foi semelhante na pasta e no betão. A perda de massa abaixo de 350 °C, conforme realizado por Hu (2019), não foi considerada visto que os materiais foram previamente sujeitos a temperaturas máximas de 300 °C durante o tratamento térmico.

3.5.3 Termoativação

Como referido em 3.5.2, foi realizada a moagem em moinho de bolas da fração cimentícia proveniente da separação magnética da mesma forma como foi efetuada para o cimento proveniente da pasta. Após a moagem, o resíduo de pasta foi termoativado num forno rotativo da *ThermoLab Scientific Equipments*, localizado no LC (Figura 3.12). Tendo por base outros estudos prévios realizados no IST (Real et al., 2020), em que se estudou influência de diferentes temperaturas de termoativação nas características do cimento reciclado, adotou-se como temperatura máxima o valor de 650°C. Considera-se que esta temperatura garante a reativação do cimento com o mínimo de emissões de CO₂. De acordo com o trabalho de (Carvalho, 2021), foi ainda incluído um patamar de 150°C de 1 hora, de modo a permitir a desidratação mais eficaz do resíduo de pasta. Na Figura 3.13, resume-se a curva de aquecimento utilizada, consistindo na subida de temperatura até 150°C, onde estabilizou durante 1 hora, seguido do aquecimento até 650°C, que foi mantido durante 3 horas. A taxa de aquecimento do forno foi de 10 °C por minuto. O arrefecimento foi efetuado dentro do forno até o material atingir a temperatura ambiente.



Figura 3.12 - Forno rotativo da ThermoLab Scientific Equipments

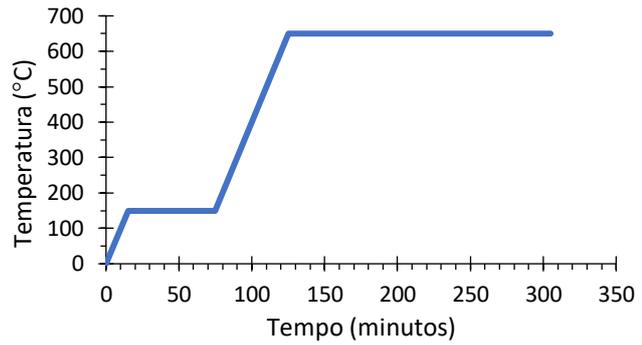


Figura 3.13- Curva de termoativação do cimento

3.5.4 Caracterização do cimento reciclado

Na Tabela 3.11, apresentam-se as principais propriedades físicas e químicas relevantes dos diferentes cimentos reciclados produzidos, obtidos a partir de pasta (CRP) e de betão (CRB), bem como do resíduo de cimento de pasta não tratado (NTCP). Apresentam-se ainda os resultados de consistência normal e tempo de presa. Na Figura 3.14, apresentam-se as curvas granulométricas do CEM I, CRP e NTCP, obtidas por granulometria laser. Os vários resultados de caracterização apresentados foram obtidos de um estudo realizado em paralelo a este trabalho, no âmbito do projeto *EcoHydB* (Real et al., 2020).

Destaca-se a elevada exigência de água do CRP, que foi mais de duas vezes superior à do CEM I. Isso justifica-se pela natureza porosa e elevada área superficial do cimento reciclado (BET, Tabela 3.11). No entanto, apesar da sua maior área superficial, o tempo de presa do CRP foi praticamente o dobro do obtido no CEM I. Neste caso, isso justifica-se pelo maior período de dormência associado à hidratação do CR, em que se verifica que tipicamente a maior velocidade de reação do seu composto principal, o $\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$, ocorre apenas após 1 dia de idade (Bogas et al., 2022). Por sua vez, no caso do CRB, a área superficial e a conseqüente exigência de água foram bastante inferiores à do CRP. Isso resulta deste ligante estar contaminado por agregado. Como referido em 3.5.2 a fração de pasta separada do betão apresentava uma pureza de 75% em massa. Por outro lado, Carvalho (2021) verificou que a perda de massa no forno de uma pasta de a/c de 0,55 foi ligeiramente inferior a 18%. Assim, tendo em conta estes dois dados é possível estimar um grau de pureza para o CRB de cerca de 71% em massa. Por outras palavras, o CRB é contaminado por cerca de 29% em massa de agregado. Destaca-se ainda o elevado tempo de presa obtido no CRB, atingindo-se o início de presa apenas após 12 horas. Esta baixa reatividade inicial do CRB não pode ser apenas justificada pela contaminação de agregado. Os resultados obtidos sugerem a possibilidade de ter ocorrido pré-hidratação após a termoativação e/ou a pré-carbonatação durante as fases de moagem e separação das amostras, conforme reportado por Real et al. (2020).

Tabela 3.11 - Caracterização dos vários cimentos reciclados, CRP e CRB, bem como do resíduo de cimento não tratado (NTCP)

Propriedade	Norma	CEM I 42,5 R	NTCP	CRP	CRB
Massa volúmica (g/cm ³)		3,07 ^a	2,445 ^b	3,005 ^b	2,964 ^b
Superfície específica de BET (cm ² /g)		18134	-	156853	78673
Resíduo insolúvel (%)		1,61	-	0,76	-
Perda ao fogo (950°C) (%)		3,19	-	6,35	22,24
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	EN 196-2 (2006)	17,99+4,98 +3,02	17,84+4,75 +3,33	18,78+5,24 +3,16	19,42+4,31 +2,40
CaO+MgO (%)	EN 196-2 (2006)	59,43+1,86	64,56+1,25	60,77+1,93	47,00+1,29
CaO livre (%)	EN 451-1 (2006)	2,38	-	13,19	-
Consistência normal (a/l)	EN 196-3 (2005)	0,31	-	0,76	0,54
Tempo Início de presa Fim (min)	EN 196-3 (2005)	160 205	- -	290 460	>720 <1440

a) Determinado de acordo com LNEC E 64; b) Determinado por picnómetro de hélio

NTCP – CRP não tratado

Finalmente, constata-se que a moagem realizada na produção dos ligantes reciclados foi relativamente eficaz para a obtenção de materiais de finura próxima de cimentos correntes (CEM I), (Figura 3.14). Ainda assim, a moagem em laboratório não permitiu que o CRP atingisse o grau de finura do CEM I, apresentando cerca de 30% de material acima de 45 µm, face a apenas 12% no CEM I (Figura

3.14). Isso pode também contribuir para uma reação mais lenta dos CR. De referir ainda que em resultado da elevada porosidade do NTCP e do CRP, a curva granulométrica destes produtos tende a ser artificialmente mais extensa do que a real distribuição da dimensão das suas partículas.

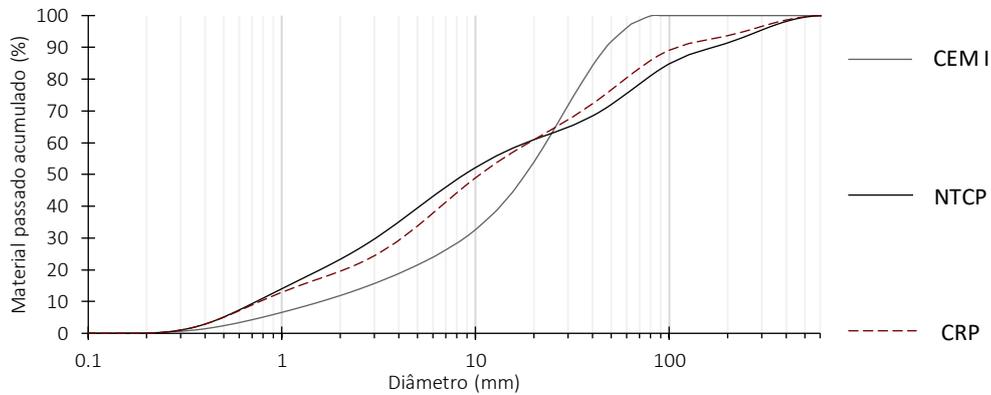


Figura 3.14 - Curva granulométrica do OPC, NTCP, CRP

3.6 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BETÕES

Nos próximos pontos, apresentam-se as composições de betão analisadas no presente trabalho e descreve-se o procedimento utilizado na produção, cura e caracterização no estado fresco e endurecido dos betões.

3.6.1 Composições

Na Tabela 3.12, apresentam-se as várias composições de betão consideradas no presente trabalho, tendo como objetivo analisar a influência da incorporação de diferentes tipos de ligante (CRP, CRB e CEM I) e tipos de agregado (AN, ARB, ART, AS). Dentro do agregado reciclado britado ARB, a fração até 1 mm, distingue-se do restante pela designação de agregado fino reciclado britado (AFRB). Esta distinção visa cobrir um tipo de agregado fino reciclado britado de igual distribuição geométrica do AS, facilitando a análise da influência da metodologia de separação realizada na melhoria de qualidade da areia reciclada. O mesmo se fez para o agregado reciclado tratado termicamente, definindo-se a fração fina abaixo de 1 mm pela sigla AFRT.

Tabela 3.12 - Composição das misturas de betão

Designação	a/l	M _{ligante} (kg/m ³)	Tipo de de ligante	Tipo de agregado grosso	Tipo de agregado fino	V _{agregado} grosso (L/m ³)	V _{agregado} fino (L/m ³)	V _{agregado} reciclado <1mm (L/m ³)	V _{água} (L/m ³)	SP (% M _{ligante})
RI65	0,65	330	CEM I	AN	AN	324	324	0	214,5	0
RI70	0,70	330	CEM I	AN	AN	316	316	0	231	0
RP65	0,65	390	CRP	AN	AN	285	285	0	253,5	5,35
RP65AG	0,65	330	CRP	AN	AN	285	285	0	253,5	5,50
RP70	0,70	360	CRP	AN	AN	292	292	0	252	4,64
RC65	0,65	390	CRB	AN	AN	289	289	0	253,5	1,5
ABI65	0,65	330	CEM I	AN	AN+AFRB	324	324	168	214,5	0
ASI65	0,65	330	CEM I	AN	AN+AS	324	324	168	214,5	0
ARBI65	0,65	330	CEM I	ARB	ARB+AFRB	324	324	168	214,5	0
ARTI65	0,65	330	CEM I	ART	ART+AFRT	324	324	168	214,5	0
TRP65	0,65	390	CRP	ARB	ARB+AS	285	285	164	253,5	5

Devido à elevada exigência de água do CR, foi necessário realizar ensaios prévios de modo a definir a melhor composição a adotar nos betões com CR e nos betões de referência com apenas CEM I e agregado natural, para que depois pudessem ser comparáveis. Assim, optou-se por produzir betões de referência com a/l de 0,65 (RI65) e 0,70 (RI70) e betões com 100% CRP de igual a/l (RP65 e RP70) e incorporação de elevadas dosagens de Superplastificante (SP), da marca *MasterEase 5025*. O objetivo foi atingir soluções em que era possível produzir betões de referência ou com CR de igual a/l. A consideração de maiores valores de a/l conduziria a betões de referência demasiado fluidos e com tendência para exsudar. Por outro lado, a consideração de menores valores de a/l não seria suficiente para produzir betões com CR de trabalhabilidade suficiente, mesmo tendo em conta elevadas dosagens de SP. Para o presente trabalho, considerou-se aceitável produzir betões de consistência S2 a S4, tentando-se enquadrar, em geral, entre 100 e 160 mm. O objetivo era que os betões fossem suficientemente trabalháveis durante o período de moldagem (primeiros 30 minutos), de modo a não comprometer de forma significativa a sua compactação. Para cumprir estas exigências, foi ainda necessário ajustar o teor de ligante dos betões, incrementando-se ligeiramente a sua dosagem nos betões com CR de igual relação a/l. De facto, o aumento do teor de pasta permite aproximar o nível de trabalhabilidade dos betões com CR aos betões com CEM I.

Em paralelo, foi também produzido um betão com 100% CRP e a/l de 0,65, utilizando água gelada de modo a reduzir a reatividade inicial da mistura e assim permitir estender o tempo de trabalhabilidade da mistura (RP65AG). Esta estratégia permitiu que se produzissem misturas com o mesmo a/l e teor de ligante dos betões de referência. Por sua vez, o betão com CR proveniente de betão (CRB) foi produzido com um a/l de 0,65 (RC65), sabendo-se, como referido, que o CRB apresenta menor exigência de água do que o CRP.

As várias composições referidas apenas se diferenciam pelo tipo de ligante, tendo sido sempre utilizado unicamente agregado natural na sua constituição (Tabela 3.12). Para analisar a influência do tipo de agregado, foram formuladas misturas adicionais, todas elas com CEM I e a/l de 0,65:

- ABI65 - betão com AN como agregado grosso e agregado fino composto por areia grossa natural e areia fina reciclada britada AFRB;
- ASI65 - betão com AN como agregado grosso e agregado fino composto por areia grossa natural e areia fina reciclada separada de betão, AN+AS;
- ARBI65 - betão com ARB como agregado grosso e agregado fino composto por areia grossa britada ARB e areia fina reciclada britada AFRB;
- ARBI65 - betão com ART como agregado grosso e agregado fino composto por areia grossa reciclada, ART, e areia fina reciclada, AFRT, tratadas termicamente;

Finalmente, foi ainda produzida uma mistura totalmente reciclada com a/l de 0,65, composta por 100%CRP, agregados grossos ARB e agregado fino composto por areia grossa reciclada brita, ARB, e areia fina reciclada separada de betão, AS. Esta mistura foi de produção única, devido à elevada quantidade de material reciclado incorporado, que exige demasiado tempo de preparação. A ideia era analisar a viabilidade de se produzirem betões completamente reciclados, sem necessidade de recorrer a matérias-primas naturais.

3.6.2 Produção, moldagem e cura do betão

A produção dos vários betões seguiu, em geral, o mesmo procedimento realizado para o betão de origem descrito no subcapítulo 3.3, recorrendo à mesma betoneira de eixo vertical (Figura 3.1). Como principal diferença, previu-se a adição de água extra de modo a ter em consideração a absorção dos agregados reciclados, sempre que aplicável. Esta água extra foi adicionada logo no início, aquando da mistura inicial dos vários tipos de agregado, e correspondeu à água absorvida pelos agregados após 1 hora, conforme recomendado na NP EN 206 (2013) (valores indicados em 3.4.4). De referir ainda que nas composições em que foi necessário utilizar SP, este foi adicionado com cerca de 10% da água no final da mistura, após a colocação do ligante e da restante água.

Foram moldados os seguintes provetes por composição, de dimensões diferentes conforme os ensaios de caracterização do betão endurecido: 2 provetes de 100x100x100 mm para determinação da massa volúmica seca; 12 provetes de 150x150x150 mm para realização do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons e de resistência à compressão a diferentes idades; 2x3 provetes de ϕ 150x300 mm para realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade; 3x2 provetes de 100x100x350 mm para realização dos ensaios de retração autogénea e por secagem; 2 provetes 100x100x450 mm para o ensaio da fluência.

Na Tabela 3.13, encontram-se resumidos os procedimentos de cura e as respetivas idades em que os ensaios foram realizados.

Tabela 3.13 - Ensaio, idades dos ensaios e procedimentos de cura

Ensaio	Idade	Procedimento de cura
Massa volúmica seca	28 dias	
Resistência à compressão	3, 7, 28 e 90 dias	
Velocidade de propagação de ultrassons	28 dias	Em câmara húmida HR>95% (IST)
Resistência à tração por compressão diametral	28 dias	
Módulo de elasticidade	28 dias	
Retração	Até aos 120 dias	Em câmara seca 20±2°C e HR=50±5% (LNEC)
Fluência		Em câmara seca 20±2°C e HR=65±5% (IST)

3.6.3 Caracterização do betão no estado fresco

No estado fresco, os betões foram caracterizados em termos de massa volúmica fresca e abaixamento, segundo as normas NP EN 12350-6 (2009) e NP EN 12350-2 (2009), respetivamente.

3.6.3.1 Massa volúmica fresca

A massa volúmica fresca foi determinada logo após a amassadura do betão. O betão foi colocado num recipiente em duas camadas, sendo que no intervalo de camada o betão foi vibrado com auxílio de um vibrador de agulha. Após a compactação de ambas as camadas, o betão foi nivelado com uma colher de pedreiro e registou-se a massa final. A massa volúmica fresca foi determinada de acordo com a equação (1):

$$\rho_{fresca} = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Onde m_1 é a massa do recipiente, m_2 é a massa total do recipiente com a massa do betão e V é o volume do recipiente.

3.6.3.2 Abaixamento

O ensaio de abaixamento foi realizado logo após a amassadura, com recurso ao cone de Abrams. O betão foi colocado em 3 camadas no interior do cone, tendo-se compactado cada uma delas através de 25 pancadas com auxílio de um varão metálico. Após o enchimento e compactação, o betão foi nivelado com recurso a uma colher de pedreiro e retirado o molde na vertical. O abaixamento foi medido tendo em conta a altura do molde e o ponto mais elevado do betão depois de retirado o molde, como se apresenta na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Ensaio de Abaixamento

3.6.4 Caracterização do betão no estado endurecido

O betão foi caracterizado no estado endurecido em termos de massa volúmica seca (NP EN 12390-7, 2009), resistência à compressão (NP EN 12390-3, 2011), resistência à tração por compressão diametral (NP EN 12390-6, 2011), módulo de elasticidade (LNEC E 397, 1993), velocidade de propagação de ultrassons (NP EN 12504-4, 2007), retração (LNEC E 398, 1993) e fluência (LNEC E 399, 1993).

3.6.4.1 Massa volúmica seca

O ensaio de massa volúmica seca foi realizado aos 28 dias de idade, de acordo com a norma NP EN 12390-7 (2009), tendo-se considerado dois provetes cúbicos de 100 mm de aresta. O provete foi retirado da câmara húmida, onde foi colocado 24 horas após a betonagem, e em seguida medido o seu peso hidrostático e peso seco com superfície seca. Posteriormente, os provetes foram secos em estufa a 100 °C até massa constante e registado a sua massa. A massa volúmica seca foi determinada pela equação (2).

$$\rho_{seca} = \frac{m_{seca}}{\frac{m_{ss} - m_{pi}}{\rho_w}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

Onde m_{seca} é a massa do provete depois de retirado da estufa, m_{ss} é a massa do provete saturado com superfície seca, m_{pi} é a massa do provete imerso e ρ_w é a massa volúmica da água.

3.6.4.2 Resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de resistência à compressão segundo a norma NP EN 12390-3 (2011), tendo-se ensaiado a cada idade 3 provetes cúbicos de 150 mm de aresta por composição. Os ensaios decorreram aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade. Para a realização do ensaio, foi utilizada uma prensa *TONI PACT 3000*, com capacidade até 3000 KN (Figura 3.16). A carga foi aplicada a uma velocidade de 13,5 kN/s sobre a face perpendicular à direção de desmoldagem.

A velocidade de propagação de ultrassons foi medida aos 28 dias de idade, imediatamente antes de se realizar o ensaio de resistência à compressão. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007), recorrendo ao equipamento da marca *Pundit – Série Pundit Lab*. A medição é efetuada na direção perpendicular à face de moldagem posicionando os transdutores, emissor e recetor, sobre 2 das faces de moldagem. O valor final da velocidade de propagação de ultrassons, V_{us} , corresponde ao quociente entre o comprimento percorrido pelo ultrassom (150 mm) e o tempo que este demora a percorrer esta distância. Em cada um dos 3 provetes medidos por composição, foram recolhidas 3 medições fazendo alternar o posicionamento dos transdutores nas faces opostas.

3.6.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011). O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade, recorrendo a 3 cilindros $\phi 150 \times 300$ mm por composição. Para este ensaio foi adotada a mesma prensa *TONI PACT 3000* utilizada no ensaio de resistência à compressão, tendo-se considerado uma velocidade de carga de 3,5 kN/s. Este ensaio recorre a uma pequena estrutura metálica que permite a aplicação de uma carga faca uniformemente distribuída sobre a geratriz do provete cilíndrico. Essa carga faca vai originar trações perpendiculares ao plano de carga, que vão provocar a rotura do provete por tração (Figura 3.18).



Figura 3.16 - Ensaio à compressão na prensa TONI PACT 3000



Figura 3.17 - Medição da velocidade de propagação de ultrassons



Figura 3.18 - Ensaio à tração por compressão diametral na prensa TONI PACT 3000

3.6.4.4 Módulo de elasticidade

De forma a efetuar o ensaio de módulo de elasticidade, apresentado na Figura 3.19, para cada composição foram produzidos 3 cilindros $\phi 150 \times 300$ mm e ensaiados aos 28 dias de idade de acordo com a especificação LNEC E 397 (1993).

Neste ensaio, é feita a medição da deformação axial do provete quando neste são exercidos vários ciclos de carga equivalentes a 30% da sua resistência à compressão (medida no ensaio de resistência à compressão). Inicialmente, os provetes foram centrados e fixados a uma estrutura metálica e colocados na máquina de ensaio onde foi efetuado um primeiro teste de forma a verificar a inexistência de excentricidades (Figura 3.19). Em seguida, realizaram-se quatro ciclos de carga e descarga recorrendo a uma prensa da *INSTRON*, sendo que caso a diferença entre valores da extensão média fosse superior a 10%, o ciclo teria de ser repetido e o provete reposicionado para diminuir a excentricidade. A deformação axial foi medida através de dois transdutores de deslocamentos que se encontravam posicionados em geratrizes diametralmente opostas do provete. Os ciclos iniciaram-se com uma carga de 17,7 kN e a velocidade de carga foi de 8,85 kN/s até serem atingidos os 30% de resistência à compressão.

3.6.4.5 Retração

A retração por secagem foi medida de acordo com a especificação LNEC E 398 (1993). O ensaio iniciou-se às 48 horas depois de realizada a betonagem, desta forma a retração plástica e térmica foi pouco significativa. Após a desmoldagem dos provetes com $100 \times 100 \times 350$ mm, foram colados dois pinos na face oposta à da betonagem a uma distância de 200 mm, e a partir da variação de comprimento medida ao longo do tempo é possível realizar a medição da retração superficial do provete. A par da retração superficial foi realizada também a mediação da retração axial (Figura 3.20),

tendo sido colocados dois pinos nas faces extremas dos moldes dos provetes de forma que estes ficassem integrados no betão.

Por cada composição, foram produzidos dois provetes no LC do IST e passadas as 24 horas foram transportados e armazenados no LNEC onde ficaram em câmara seca $20\pm 2^\circ\text{C}$ e $50\pm 5\%\text{HR}$. Os valores da retração foram medidos no LNEC diariamente até aos 7 dias de idade, de 2 em 2 dias até aos 15 dias de idade, de 3 em 3 dias até aos 30 dias de idade e aos 60, 90 e 120 dias de idade com algumas medições de controlo entre estas datas. A medição da retração superficial foi realizada com um equipamento da marca *Mitutoyo*. A extensão é medida através do movimento do cone móvel que é transmitido ao comparador digital através do eixo pivot com precisão de $1\ \mu\text{m}$. Para a medição da retração axial foi utilizado um comparador em estrutura de aço da marca *Mitutoyo*. Antes de cada medição, ambos os equipamentos eram calibrados.

A primeira medição define o ponto de comparação com as restantes medições, sendo este o d_0 , e as medições posteriores d_i . A retração total dos provetes foi calculada de acordo com a equação (3).

$$\varepsilon_{cst,i} = \frac{d_i - d_0}{L} \times F \quad (3)$$

Onde: $\varepsilon_{cst,i}$ é a retração no dia i (m/m); d_i é a distância entre os pontos de referência no momento da medição (mm); d_0 é a distância entre os pontos de referência no primeiro dia de medição i (mm); L é a distância entre os pontos da barra de calibração (20mm); F é o fator de correção do medidor.

3.6.4.6 Fluência

O ensaio de fluência seguiu a especificação LNEC E 399 (1993). O ensaio tem início aos 28 dias de idade dos provetes com $100\times 100\times 450$ mm, sendo estes colocados numa estrutura na vertical onde é aplicada uma carga (10MPa) nos mesmos (Figura 3.21). As medições seguem as mesmas idades do ensaio de retração. Foram colocados dois pinos nas faces perpendiculares à face da betonagem a 200 mm de distância e medida a variação de distâncias através de um equipamento da marca *Mitutoyo*. Em cada medição, a extensão total no instante $\varepsilon_s(t)$, era calculada de acordo com a equação (3). Subtraindo a extensão média dos provetes não carregados, $\varepsilon_s(t)$, e a extensão medida logo após o carregamento, ε_i , a fluência ($\varepsilon_c(t)$) é obtida. Antes e durante o ensaio, os provetes estão na câmara seca a uma temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$ e $65\pm 5\%\text{HR}$.

A extensão instantânea é obtida de acordo com a equação (4), onde: ε_i é a extensão inicial logo após o carregamento (m/m); σ é a tensão máxima aplicada nos provetes (MPa); E é o modulo de elasticidade, determinado de acordo com 3.6.4.6, aos 28 dias (MPa).

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

O coeficiente da fluência é calculado através da equação (5). Onde: $\phi(t)$ é o coeficiente de fluência num dado instante (t) (m/m); E_{c28} é o módulo de elasticidade aos 28 dias (MPa); σ_c , valor da tensão aplicada (MPa).

$$\phi(t) = \frac{\varepsilon_c(t) \times E_{c28}}{\sigma_c} \quad (5)$$

A extensão total dos provetes sob tensão num instante t, $\varepsilon_t(t)$, é calculada através da equação (6). Onde: d_i é a distância entre os pontos de referência no momento da medição (mm); d_0 é a distância entre os pontos de referência no primeiro dia de medição i (mm); L é a distância entre os pontos da barra de calibração (20mm); F é o fator de correção do medidor.

$$\varepsilon_t(t) = \frac{d_i(t) - d_0}{L} \times F \quad (6)$$

A fluência no instante t, ε_c , é calculada através da equação (7). Sendo: $\varepsilon_t(t)$ a extensão total do provete sob tensão num dado tempo (t), contada a partir da primeira leitura t=0; $\varepsilon_s(t)$ a extensão média dos provetes não carregados e conservados nas mesmas condições; ε_i , extensão medida logo após o carregamento.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_t(t) - \varepsilon_s(t) - \varepsilon_i \quad (7)$$



Figura 3.19 - Módulo de Elasticidade



Figura 3.20 - Retração Axial no LNEC



Figura 3.21 - Fluência

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios efetuados durante a campanha experimental descrita no capítulo 3, nomeadamente no que se refere à caracterização no estado fresco e endurecido de betões produzidos com diferentes tipos de ligantes (CEM I, CRP e CRB) e diferentes tipos de agregados (AN, ARB e ART). A caracterização no estado fresco envolveu resultados de ensaios de trabalhabilidade e massa volúmica fresca e a caracterização no estado endurecido resultados de massa volúmica seca, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons, retração autógena e por secagem e fluência. Como referido, este trabalho foi realizado no âmbito do projeto *EcoHydB* – “Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials” - PTDC/ECI-COM-28308/2017, que visa o desenvolvimento de ligantes reciclados a partir de resíduos cimentícios e a sua consequente aplicação em produtos de base cimentícia de maior sustentabilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Na Tabela 4.1, apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais de trabalhabilidade (abaixamento) e massa volúmica fresca das misturas produzidas na campanha experimental, bem como o teor de SP utilizado. Na mesma tabela, apresenta-se ainda a massa volúmica fresca teórica, tendo em conta a composição das misturas apresentada em 3.6.1, e o volume de vazios estimado para cada composição.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização do betão no estado fresco

Designação	a/l	SP (%)	Abaixamento (mm)	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	V _{vazios} (L/m ³)	Massa volúmica fresca teórica (kg/m ³)
RI65	0,65	0,0	164	2280	19,6	2260
RI70	0,70	0,0	Muito fluido	2270	10,1	2230
RP65	0,65	5,4	123	2180	20,1	2160
RP65AG	0,65	5,5	10	2220	33,2	2270
RP70	0,70	4,6	160	2180	21,9	2160
RC65	0,65	1,5	130	2190	26,8	2180
ABI65	0,65	0,0	100	2220	28,0	2220
ASI65	0,65	0,0	100	2260	28,1	2250
ARBI65	0,65	0,0	80	2060	54,3	2110
ARTI65	0,65	0,0	170	2110	55,7	2160
TRP65	0,65	5,0	160	2030	47,6	2070

4.1.1 Trabalhabilidade

No presente trabalho, foram produzidos diversos betões cuja trabalhabilidade variou entre 80 e 170 mm de abaixamento. Em geral, foi possível atingir a gama de classes de consistência pretendida entre 100 a 160 mm, embora para tal tenha sido necessário adicionar aos betões com CR elevadas dosagens de SP. De seguida, é analisada a influência de diferentes parâmetros nos resultados deste ensaio.

4.1.1.1 Influência do tipo de ligante

A Figura 4.1 apresenta o abaixamento dos diferentes betões produzidos com CEM I, CRP e CRB, para relações a/l de 0,65 e 0,70. Como referido, uma das maiores desvantagens do ligante reciclado é a sua elevada exigência de água (3.5.4), o que exigiu a incorporação de elevadas dosagens de SP e a consideração de maiores volumes de pasta face aos betões de referência com CEM I. Esta elevada exigência de água do CR, mais de 2 vezes superior à do CEM I (3.5.4), é atribuída à sua maior superfície específica (cerca de 10 vezes superior à do CEM I), elevado teor de CaO (Real et al., 2020; Serpell et al., 2015), elevada absorção de água resultante da sua natureza porosa (Carriço et al., 2020; Carriço et al., 2021; Shui et al., 2009; Zhang et al., 2018) e maior estado de aglomeração das suas partículas (Carriço et al., 2020).

Ainda assim, apesar das modificações implementadas nas misturas (aumento de teor de pasta e adição de SP), o abaixamento dos betões com CRP foi cerca de 25% e 20% inferior à dos betões de referência, para uma relação a/l de 0,65 e 0,70, respetivamente. Este fenómeno faz com que os betões com CR sejam menos trabalháveis, o que dificulta a compactação dos mesmos e o possível desenvolvimento de maior porosidade acidental, conforme abordado em 4.1.2.

Acrescente-se ainda que conforme reportado em Real et al. (2021), os betões com CR tendem ainda a evidenciar uma perda mais rápida de trabalhabilidade, observando-se reduções de cerca de 50% de abaixamento após 45 minutos. Esta maior perda de trabalhabilidade pode ser explicada pela forte reação exotérmica do CaO ocorrida nos primeiros minutos da mistura, bem como a progressiva absorção de água nas partículas porosas de CR (Real et al., 2021). Naturalmente, este fenómeno também contribui para as diferenças de trabalhabilidade verificadas na Tabela 4.1, face aos betões de referência com apenas CEM I.

Por sua vez, a utilização de elevadas dosagens de SP no CRP ($\cong 5\%$), superiores às usualmente especificadas para o CEM I ($< 1.5-2\%$), são também sinal de que o ponto de saturação dos adjuvantes redutores de água tende a ser superior nas misturas com cimento reciclado. Isso resulta de maior

quantidade de SP ser adsorvido nas partículas de CR, associadas a maior porosidade e área superficial do que o CEM I. A necessária adição de SP nos betões com CR contribui também para uma maior perda de trabalhabilidade, visto que o adjuvante tende a perder o seu efeito ao longo do tempo, quer por absorção nas partículas de CR, quer pelo progressivo afundamento nos produtos de hidratação formados.

Para contornar a rápida perda de trabalhabilidade dos betões com CR, explorou-se a utilização de água gelada na mistura com CRP (RP65AG), com o objetivo de reduzir a reação exotérmica do CaO e estender o período de indução. No entanto, apesar de com esta estratégia ter sido possível produzir um betão de composição idêntica ao betão de referência RI65 (mesmo teor de ligante e relação a/l), a sua trabalhabilidade foi extremamente baixa, estando associada a um abaixamento cerca de 16 vezes inferior ao do RI65 (Figura 4.1).

Em relação aos betões com CR proveniente da separação de resíduos de betão (CRB), verificou-se uma redução substancial da necessidade de SP para uma dada trabalhabilidade (cerca de menos 70%), face ao betão com CRP. De facto, dado que o CRB é contaminado com cerca de 26% de agregado (resíduos de calcário e areia) a sua porosidade e área superficial vão diminuir e conduzir a menores exigências de água, conforme discutido em 3.5.4.

4.1.1.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.2, compara-se o abaixamento obtido nos betões de idêntica composição, exceto pelo facto de se terem utilizado diferentes tipos de areia fina, nomeadamente AN, AFRB e AS. Verifica-se que a incorporação de areias finas recicladas, tanto provenientes de britagem primária (AFRB) como de areia reciclada de betão (AS), conduziu a uma redução importante do abaixamento (40%). A maior absorção dos agregados reciclados, resultante do seu maior volume de pasta aderida (ver 3.4.4), pode ter contribuído para estes resultados, embora tenha sido adicionada água de absorção para contornar este problema. Por outro lado, apesar do ABI65 e ASI65 terem apresentado o mesmo abaixamento, o agregado fino AS está associado a bastante menor teor de pasta aderida e menor absorção do que o AFRB, tal como observado em 3.4.4. Assim, a principal razão atribuída a esta redução de trabalhabilidade deverá resultar da forma bastante mais achatada das partículas britadas face à areia natural, que contribui para o aumento do atrito interno da mistura.

Na Figura 4.3, compara-se o abaixamento dos betões produzidos com apenas agregados naturais e dos betões com agregados finos e grossos ARB e ART. Neste caso, a substituição total de AN por ARB conduziu a uma redução de cerca de 49% no abaixamento. Basicamente, os mesmos motivos referidos

anteriormente podem ser aplicáveis a estes resultados. No entanto, de forma um pouco surpreendente, os betões com apenas ART foram capazes de atingir trabalhabilidade semelhante à do betão de referência RI65. De facto, como se pode observar em 3.4.4, os ART estão associados a índices de achatamento bastante inferiores aos ARB (mais de 2 vezes menores), sendo inclusivamente menores do que do próprio AN. Tal justifica-se pelo efeito de arredondamento proporcionado nos ART, após estes terem sido sujeitos a moagem autogénea.

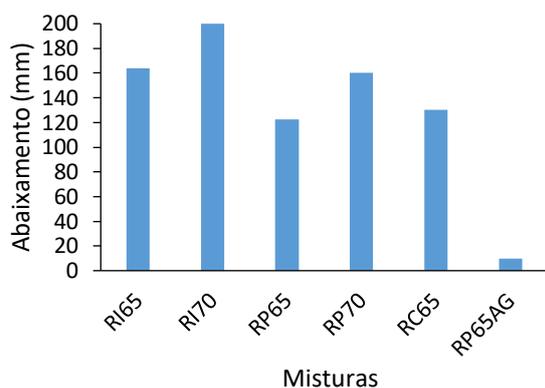


Figura 4.1 - Abaixamento das misturas com CEM I, CRP e CRB

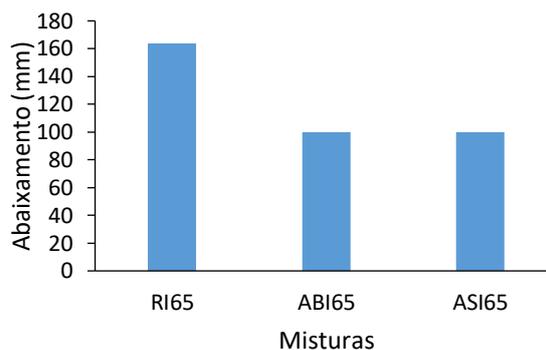


Figura 4.2 - Abaixamento dos betões com CEM I produzidos com agregados finos AN, AB e AS

Ao contrário do que seria esperado, o betão com inclusão simultânea de ARB e AS (TRP65) apresentou maior trabalhabilidade (cerca de 30% superior) do que o betão também com CRP, mas apenas com AN (RP65) (Figura 4.4). Conforme observado na Tabela 4.1, ambos os betões foram produzidos com idêntico teor de SP, não se encontrando grande justificação para os resultados obtidos, até porque nos betões com CEM I a adição de AS conduziu a menores trabalhabilidades. Uma possível justificação poderia estar relacionada com a elevada perda de trabalhabilidade ao longo do tempo dos betões com CRP, podendo ter sido realizada a medição do abaixamento mais cedo no betão TRP65. No entanto, em face da elevada diferenças observada e da menor trabalhabilidade da AS face à areia fina natural, esta razão é pouco provável.

Por sua vez, tendo em conta os resultados de caracterização mecânica, a tendência observada deverá estar mais relacionada com a menor capacidade reativa do CRP utilizado no betão TRP 65. De facto, enquanto as betonagens do RP65 e RC65 foram realizadas cerca de 14 dias após a primeira termoativação do CR (por motivos de dimensão do forno, a capacidade diária de produção de CR foi de apenas 6 kg, exigindo vários dias de termoativação antes da betonagem), por motivos de disponibilidade laboratorial, o betão TRP65 foi apenas betonado 2 meses após a última termoativação (cerca de 2 meses e meio após a primeira termoativação). Isso poderá ter promovido a pré-hidratação e pré-carbonatação do CR, conduzindo a uma menor reatividade do mesmo. Assim, as partículas de

CRP vão estar associadas a menor porosidade, menor área superficial e menor capacidade de reação, promovendo a melhoria da trabalhabilidade do betão.

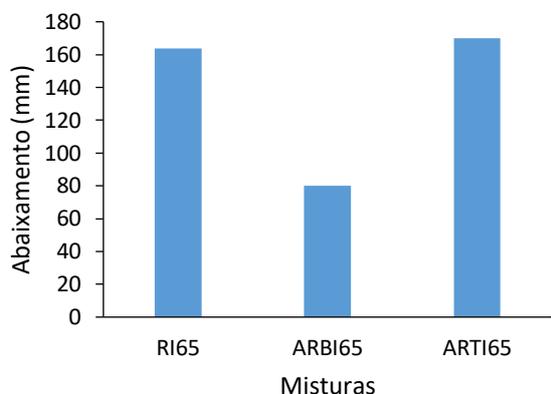


Figura 4.3 - Abaixamento das misturas com AN, ARB e ART

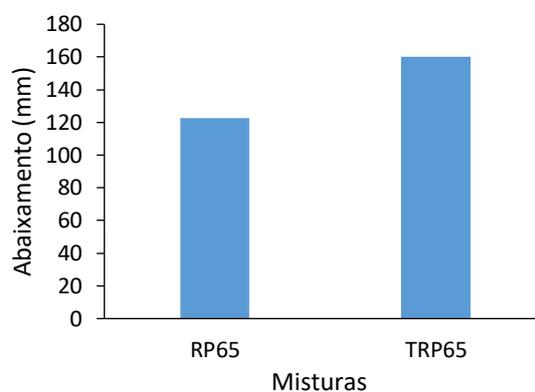


Figura 4.4 - Abaixamento de misturas com AN e ARB+AS e CRP

4.1.2 Massa volúmica fresca

A massa volúmica fresca dos betões ensaiados variou entre 2087 e 2279 kg/m³, sendo afetada por parâmetros como a relação a/l, o tipo de ligante, o tipo de agregado e o volume de vazios. Nos próximos subcapítulos, analisa-se o efeito destes fatores nos resultados deste ensaio.

4.1.2.1 Influência do tipo de ligante

Na Figura 4.5, compara-se a massa volúmica fresca de betões com CEM I e CR. A massa volúmica dos betões com a/l de 0,65 e CRP ou CRB foi cerca de 4,3% inferior à do betão de referência com o mesmo a/l. Por sua vez, uma diferença semelhante (4%) foi observada entre os betões com CRP e de referência com a/l de 0,7. Em face da reduzida diferença de massa volúmica entre os vários tipos de ligantes (3.5.4), a redução de massa volúmica nos betões com CR deverá estar associada a dois fatores: menor teor de pasta no betão de referência, que contribui para o aumento de massa volúmica; maior teor de vazios nos betões com CR. O primeiro fator justifica o facto de nos betões de maior a/l a diferença de massa volúmica ser menor (menor variação no teor de ligante). Em relação ao segundo fator, confirma-se a tendência de um ligeiro aumento do teor de vazios nos betões com CR (Tabela 4.1), tal como igualmente verificado por (Bogas et al., 2022b). O maior teor de vazios justifica-se pela maior dificuldade em compactar os betões com CR, associados a menor trabalhabilidade, bem como ao facto de estes incorporarem maior teor de pasta (cerca de mais 19%).

Os betões com CRP e CRB revelaram massa volúmica idêntica, dado que os ligantes apresentavam massa volúmica semelhante e foram produzidos com trabalhabilidade semelhante. A pequena

diferença observada segue a tendência de variação da massa volúmica teórica. Por sua vez, o betão com água gelada (RP65AG), associado a menor teor de ligante e volume de pasta, apresentou maior massa volúmica do que o betão RP65, confirmando a tendência indicada pelas massas volúmicas teóricas. No entanto, o RP65AG apresentou um teor de vazios cerca de 50% superior ao do RP65, em resultado da sua maior dificuldade de compactação devido à sua reduzida consistência (classe S1 de acordo com a NP EN 206 (2013)).

4.1.2.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.6, compara-se a massa volúmica fresca dos betões com diferentes tipos de areia fina de dimensão inferior a 1 mm. A substituição de areia fina natural por AFRB ou AS promoveu uma redução de 2,6% e 1,1% na massa volúmica fresca, respetivamente, seguindo exatamente a mesma tendência de variação da massa volúmica fresca teórica. A diferença de massa volúmica está relacionada com o facto de a areia natural siliciosa ter uma massa volúmica superior a AS e AFRB (Tabelas 3.1, 3.5 e 3.8). Como discutido em 3.4.4, a maior massa volúmica de AS face a AFRB beneficia do facto da primeira apresentar menor teor de pasta aderida.

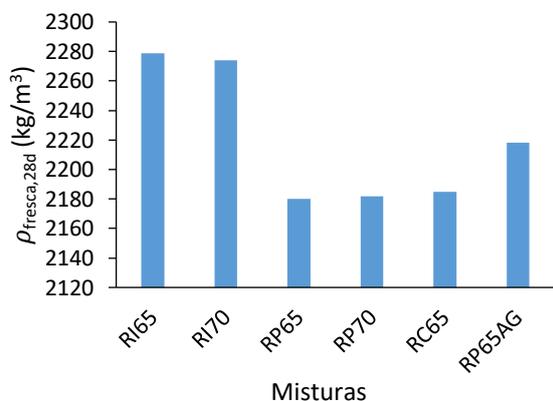


Figura 4.5 - Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com a/l 0,65 e 0,70 e diferentes tipos de cimento (CEM I, CRP, CRB)

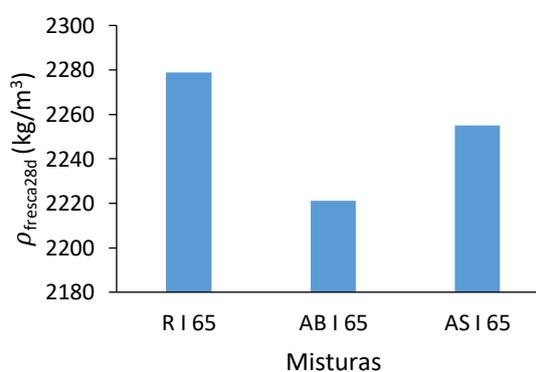


Figura 4.6 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com agregados finos AN, AB e AS

Na Figura 4.7, compara-se a massa volúmica fresca dos betões com AN, AFB e ART. Como esperado, os betões com ARB e ART apresentaram menor massa volúmica do que o betão de referência de igual a/c, para uma redução de 9,7% e 8,5%, respetivamente. Naturalmente, a incorporação adicional de agregados grossos reciclados, de menor massa volúmica do que os AN, promoveu uma maior redução na massa volúmica fresca dos betões. De facto, a massa volúmica dos AN foi 13-16% e 5-9% (Tabela 3.5 e 3.7) maior do que a dos ARB e ART, respetivamente, justificando assim a menor massa volúmica fresca dos betões com agregados reciclados. Acrescente-se ainda que

foi observado um maior teor de vazios nos betões com agregados reciclados, o que também contribuiu para a diminuição da sua massa volúmica. Isso não era esperado, em especial no betão com ART, que conforme discutido em 4.1.1, apresentou maior trabalhabilidade. Porém, importa reforçar que a estimativa do teor de vazios nos betões com agregados reciclados depende bastante dos valores de massa volúmica e absorção determinados para os agregados, cuja quantificação rigorosa é muito difícil, em especial para os finos de dimensão inferior a 1 mm, conforme referido em 3.4.4.

A massa volúmica fresca do betão TRP65, com agregado e ligante reciclado, foi 7% inferior à do betão de referência RP65 (Figura 4.8), o que se justifica pela menor massa volúmica dos ARB e AS face aos AN. Face ao betão de referência RI65, a redução foi de 11%, motivado ainda pela adição de maior teor de ligante e volume de pasta no TRP65. O aumento do teor de vazios também terá contribuído para esta redução.

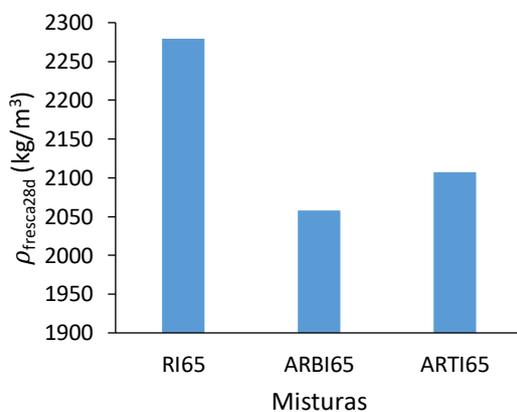


Figura 4.7 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com agregados AN, ARB e ART

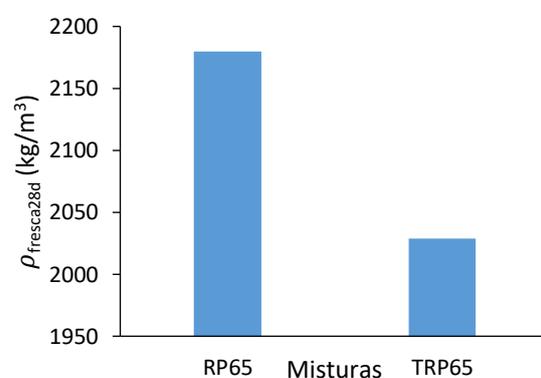


Figura 4.8 – Massa volúmica fresca (ρ_{fresca}) das misturas com CRP e agregados AN e ARB+AS

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Na Tabela 4.2, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dos betões no estado endurecido, nomeadamente de massa volúmica seca, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral; módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons. Na mesma tabela, apresentam-se ainda os diferentes coeficientes de variação (CV) obtidos para as referidas propriedades. Apenas para a resistência à tração, usualmente associada a maior variabilidade, o CV foi em geral superior a 5%.

Tabela 4.2 - Resultados da caracterização do betão no estado endurecido

Designação	Massa Volúmica seca (kg/m ³)	f _{cm} (MPa)						f _{ctm,28d} (MPa)	CV (%)	E _{c28d} (GPa)	CV (%)	V _{us28d} (m/s)	CV (%)
		3 dias		28 dias		90 dias							
			CV (%)		CV (%)		CV (%)						
RI65	2160	22,6	3	36,4	4	40,1	2	2,9	9	32,9	1	4855	1
RI70	2100	19,2	1	31,6	4	35,3	3	2,5	13	-	-	4603	1
RP65	2030	19,9	1	27,1	1	30,5	3	1,9	-	24,8	1	4365	1
RP65AG	2090	-	-	26,0	4	-	-	-	-	-	-	4598	1
RP70	2010	17,9	1	24,3	3	28,3	1	1,9	6	-	-	4316	0
RC65	2050	5,1	3	10,9	3	-	-	-	-	-	-	4024	2
ABI65	2110	24,2	2	35,0	2	40,0	1	2,4	6	27,4	0	4727	1
ASI65	2130	23,8	1	36,2	2	39,7	2	2,5	11	28,9	2	4822	1
ARBI65	1910	19,0	1	29,8	7	32,2	7	2,5	7	-	-	4123	1
ARTI65	1920	19,7	2	30,5	2	36,2	2	2,2	6	-	-	4126	2
TRP65	1870	15,0	3	20,8	4	24,0	1	1,8	10	-	-	3903	1

4.2.1 Massa volúmica seca

A massa volúmica seca dos betões produzidos variou entre 1920 e 2160 kg/m³ (Tabela 4.2), tendo sido influenciada pela relação a/l, tipo e teor de ligante, tipo de agregado e volume de vazios, tal como sucede na massa volúmica fresca, e ainda pelo nível de hidratação atingido na mistura.

4.2.1.1 Influência do tipo de ligante

Na Figura 4.9, compara-se a massa volúmica seca de betões com CEM I e CR. Na mistura de referência, havendo uma maior quantidade de água na mistura com a/l 0,70, esta perde mais água ficando com massa volúmica seca inferior (2,8%) à da mistura com a/l de 0,65, ao contrário do que tinha sido observado para a massa volúmica fresca, onde esta foi semelhante nos dois tipos de betões.

Em relação às misturas com CR, pelos mesmos motivos referidos na massa volúmica fresca (4.1.2.1), verificou-se novamente uma redução de massa volúmica seca nos betões RP65 (6%) e RC65 (5%) face ao betão de referência RI65. Neste caso, o que importa destacar é o facto dos betões com CR terem apresentado uma perda relativa de água semelhante ao betão RI65. Esta perda relativa de água foi de 76%, 81% e 72% para os betões RI65, RP65 e RC65, respetivamente, tendo sido estimada pelo rácio entre a diferença de massa volúmica fresca e seca e a quantidade de água livre no betão (considera-se que a água livre corresponde à diferença entre a quantidade de água da mistura e a água utilizada na hidratação do ligante, assumindo uma quantidade máxima de água combinada de 23% (Neville, 1995) e um grau de hidratação de 75%). Estes resultados sugerem uma adequada capacidade de reidratação dos cimentos reciclados utilizados, tendo sido capazes de desenvolver quantidades semelhantes de produtos de hidratação. Os resultados indiciam também uma menor capacidade de desenvolvimento de produtos de hidratação por parte do CRB, conforme se discute em 4.2.2.1.

Em sintonia com o observado para a massa volúmica fresca, verifica-se que o betão RP65AG produzido com água gelada foi capaz de atingir uma massa volúmica seca superior à do betão RP65. Isso resulta do facto de o RP65AG ter sido produzido com menor teor de ligante. Em termos de perda de água relativa, o betão RP65 e RP65AG apresentaram igual rácio, de 81%, sugerindo que a adição de água gelada não terá afetado de forma significativa a capacidade de hidratação do CRP.

4.2.1.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.10, compara-se a massa volúmica seca das misturas com agregados finos naturais e reciclados AFRB e AS. Os betões com AFRB e AS apresentaram menos 2,3% e 1,4% de massa volúmica seca comparativamente à mistura de referência com agregado natural, visto que esta areia possui

maior massa volúmica do que as areias recicladas (Tabelas 3.1, 3.5 e 3.9). Face ao betão de referência, existe uma menor perda relativa de água nos betões com areias recicladas, especialmente no caso dos betões com AFRB. No entanto, seria esperada uma tendência contrária, visto que estes possuem bastante mais água livre no sistema, resultante da água que foi absorvida pelos agregados reciclados e que terá uma participação pequena na hidratação do ligante. Uma razão poderá resultar do maior tempo de secagem destes betões, que tendem a reter a água de absorção nos agregados reciclados, não permitindo que esta passe rapidamente para a matriz de pasta em torno dos mesmos e finalmente para a atmosfera. Isso ocorre devido ao facto de os betões terem sido produzidos com uma pasta de porosidade superior (a/c de 0,65) à utilizada nos betões que deram origem aos agregados reciclados (a/c de 0,55). Desse modo, a água migra mais dificilmente do agregado reciclado (pasta de porosidade mais refinada) para a matriz (pasta de porosidade mais grosseira). De facto, constata-se que a massa volúmica seca é superior à estimada tendo por base uma retenção de água equivalente a 80% de hidratação (para 23% de máximo de água combinada (Neville, 1995)). No caso do betão ABI65, essa massa volúmica seca teórica seria de 2032 kg/m³, 3,7% inferior à registada.

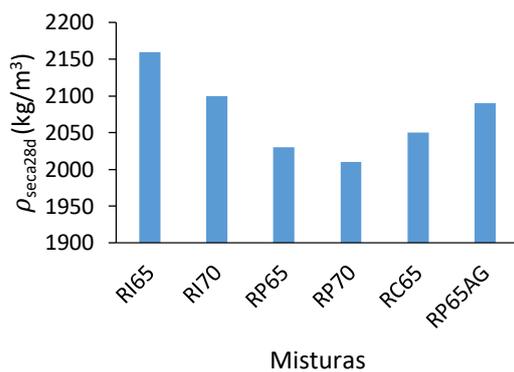


Figura 4.9 – Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com a/l 0,65 e 0,70 e diferentes tipos de cimento (CEM I, CRP, CRB)

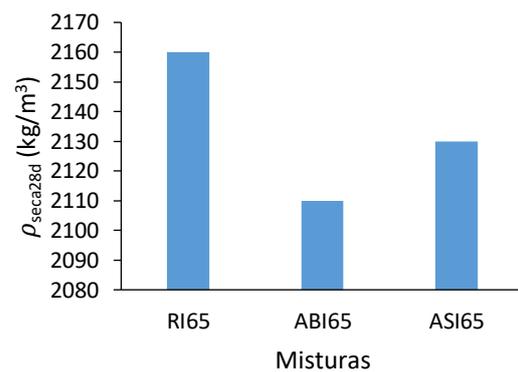


Figura 4.10 - Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com agregados finos AN, AB e AS

A mesma tendência é confirmada nos betões com agregados finos e grossos de ARB ou ART, apresentando também menores perdas relativas de água do que os betões de referência de igual teor de pasta. Na Figuras 4.11 e 4.12, constata-se que a massa volúmica seca foi bastante semelhante nos betões com ARB e ART, sugerindo que estes agregados foram produzidos com teores de pasta aderida relativamente semelhantes entre eles. Tal como discutido em 3.4.4, apesar de se ter atingido quantidades de pasta aderida inferiores no agregado grosso ART, a fração fina abaixo de 1 mm apresentava maior teor de pasta do que o AFRB. Isso resulta da fração fina do AFRT ser o produto resultante da limpeza dos agregados grossos ART. Assim, como no presente estudo não se optou por eliminar esta fração fina na produção dos betões, a massa volúmica global acabou por ser semelhante

nos dois tipos de betão. Face ao betão de referência, verificou-se uma maior redução de massa volúmica seca nestes betões reciclados do que o observado para a massa volúmica fresca. Isso resulta da massa volúmica fresca dos betões reciclados contar ainda com a água extra resultante da absorção dos agregados.

Tal como para a massa volúmica fresca, a menor massa volúmica foi observada no betão produzido com incorporação total de material reciclado, CRP, ARB e AS. Esta redução resultou essencialmente da utilização de agregado reciclado e de um elevado teor de pasta.

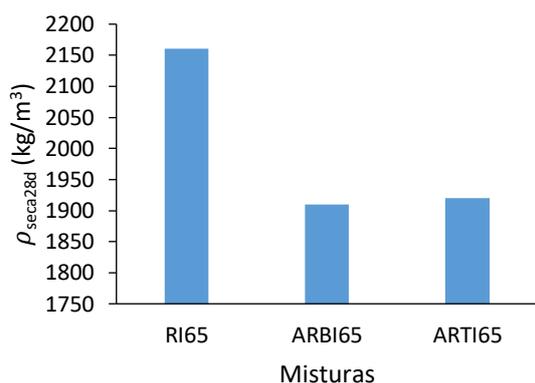


Figura 4.11– Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com agregados AN, ARB e ART

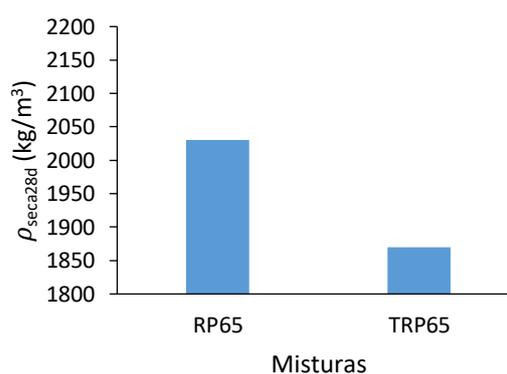


Figura 4.12– Massa volúmica seca (ρ_{seca}) dos betões com CRP e agregados AN e ARB+AS

4.2.2 Resistência à compressão

Dependendo do tipo de ligante, relação a/l e tipo de agregado, exceto para o betão RC165, a resistência à compressão aos 28 dias variou entre 20,8 MPa e 36,4 MPa (Tabela 4.2), para classes de resistência que se podem enquadrar entre C12/15 e C25/30, envolvendo betões de moderada a baixa resistência. A reduzida resistência dos betões justifica-se pela elevada relação a/l considerada neste estudo, que, como referido, foi necessário de modo a se produzirem misturas com CEM I ou CR de igual composição. Seguidamente, discute-se a influência do tipo de ligante e do tipo de agregado na resistência à compressão.

4.2.2.1 Influência do tipo de ligante

Na Figura 4.13, resume-se a evolução da resistência à compressão até 90 dias de idade nos betões produzidos apenas com agregado natural e diferentes tipos de ligante (CEM I, CRP, CRB). Para idêntica relação a/l, os betões com incorporação de CRP apresentaram menor resistência à compressão a todas as idades do que os betões de referência, sendo que as diferenças entre betões se tornaram mais pronunciadas a partir dos 7 dias. Conforme verificado em vários estudos anteriores desenvolvidos no

IST (Bogas et al., 2020; Bogas et al., 2022; Carriço et al. 2020; Real et al., 2021; Real et al., 2020), a resistência aos 3 dias de idade tende a ser semelhante nos betões com CEM I e CR. Isso é atribuído ao facto do CR apresentar elevada área superficial, de ser constituído por um novo polimorfo do C_2S (α'_H-C_2S), que reage essencialmente entre 1 e 3 dias de idade, e de ocorrer uma maior proximidade inicial entre as partículas de CR, devido à absorção de parte de água da mistura nas mesmas (Bogas et al., 2022). O facto de se terem adicionado elevados teores de SP também contribuiu para a melhor dispersão e rápida hidratação do CRP.

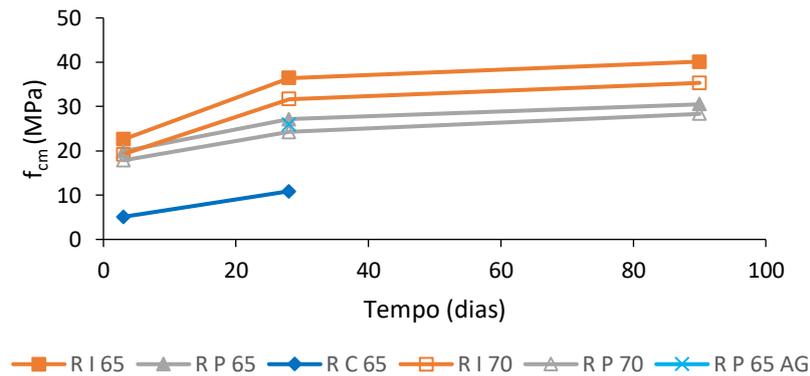


Figura 4.13 - Resistência à compressão (f_{cm}) de betões com diferentes tipos de cimento

No entanto, para idades posteriores, outros fatores como a menor capacidade resistente das partículas de CR (de natureza porosa), o menor desenvolvimento de produtos externos de C-S-H a longo prazo e o maior teor de vazios nas misturas com CR (Tabela 4.1), fazem com que a resistência mecânica seja menor do que nos betões com CEM I (Bogas et al., 2022; Real et al., 2021). O menor desenvolvimento de produtos externos está relacionado essencialmente com dois fatores (Bogas et al., 2020): por um lado, devido à sua natureza porosa, a hidratação das partículas de CR resulta na formação não só de produtos interpartícula, mas também de produtos intrapartícula, que não contribuem para a coesão do betão e, conseqüentemente, para a resistência à compressão do mesmo; por outro lado, dado que o CR resulta de resíduos de pasta antiga, apresenta maior volume de produtos carbonatados que não têm capacidade de reação.

Para a mesma relação a/l (0,65 a 0,7), a redução de resistência do RP65/RP70 face aos RI65/RI70 foi de 7-12%, 23-25% e 20-24% aos 3, 28 e 90 dias de idade, respetivamente. Esta redução foi superior ao observado no estudo de Real et al. (2021), realizado também no IST, em que se produziram betões com CRP termoativado a 650°C, tal como no presente trabalho. Neste caso, tendo em conta betões com incorporação de diferentes percentagens de CR e a/l de 0,65, tendo reportado resistência à compressão aos 3 dias idêntica e uma redução de 17% na resistência à compressão aos 28 dias, quando

se procedeu à substituição de 100% de CEM I por CRP. Os resultados sugerem que de alguma forma o CRP utilizado no presente trabalho terá apresentado uma capacidade de reação ligeiramente inferior.

O betão RP65AG, produzido com água gelada, apresentou uma resistência à compressão aos 28 dias idêntica à do betão RP65 produzido com água à temperatura ambiente (-4%). Conclui-se que este procedimento, apesar de poder retardar o período de indução e diminuir o desenvolvimento de calor de hidratação inicial, não afeta de forma significativa a resistência a longo prazo. A ligeira redução observada na resistência deverá estar relacionada com o maior teor de vazios atingido em RP65AG.

Do presente estudo, conclui-se que foi possível produzir betões estruturais da classe C20/25, utilizando ligante totalmente reciclado, neste caso 100% de CRP. Esta é uma constatação importante, pois viabiliza a utilização de CR como ligante hidráulico, em alternativa ao CEM I. O maior incremento da classe estrutural do betão foi condicionado pelas elevadas relações a/l utilizadas, resultado da elevada exigência de água do CR.

No entanto, no cenário mais próximo da realidade, em que o cimento reciclado tem de ser diretamente recuperado dos resíduos de betão, verificou-se um fraco desempenho do CRB (RC65, Figura 4.13). De facto, observaram-se resistências à compressão muito baixas no betão RC65, atingindo apenas 11 MPa aos 28 dias. A redução na resistência foi de cerca de 70% face ao betão de referência e de 60% face ao betão com CRP. Isso está desde logo relacionado com o incremento da relação a/c resultante da contaminação do ligante reciclado com agregado, após o processo de separação. De facto, conforme referido em 3.5, o grau de pureza obtido para o CRB foi de 74%. Neste caso, a relação a/c aumenta de 0,65 para 0,93, podendo afetar de forma relevante a perda de resistência. Considerando a equação (8) de Bogas (2011), formulada com base na lei de Abraams para argamassas com CEM II 42,5, estima-se que a perda de resistência entre a/c de 0,65 e 0,93 seria de cerca de 52%, abaixo dos 60% observados. Como referido em 3.5.4, é ainda possível que durante o tratamento de moagem e separação dos agregados se tenha promovido alguma carbonatação adicional no material separado, o que faz reduzir a eficiência deste ligante.

$$f_c = \frac{182,7}{14,4 \frac{a}{c}} \quad (28 \text{ dias}) \quad (8)$$

No trabalho recente de Cyrne (2022), este problema da contaminação do CRB, com repercussão relevante na redução da resistência mecânica, foi contornado aumentando-se a dosagem de ligante em detrimento do teor de areia fina. Desse modo, garantiu-se que a quantidade de fração cimentícia reciclada e a relação a/c eram idênticas à das misturas com cimento obtido a partir de pasta pura. Em trabalhos futuros, sugere-se adotar a mesma estratégia, adicionando sempre a parte contaminada do

CRB à fração de agregado fino dos betões. Isso permitiria ter obtido resultados próximos dos atingidos nos betões com CRP, conforme foi igualmente observado por Cyrne (2022), embora em argamassas.

4.2.2.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.14, apresenta-se a evolução até 90 dias de idade da resistência à compressão dos betões com AN e areia fina reciclada. Consta-se que a resistência à compressão foi pouco afetada pela substituição de areia natural por areia reciclada. Por um lado, apenas cerca de 52% da areia fina foi substituída por areia reciclada, o que traduz uma percentagem de substituição total de agregado de apenas cerca de 26%. Por outro lado, em particular na areia reciclada separada, o teor de pasta estimado foi inferior a 10% (supondo-se que este valor até deva ser inferior de acordo com o observado em anteriores trabalhos, 3.4.4). Além disso, esta pasta aderida, ou não, à areia reciclada, apresentava uma relação a/c inferior à da pasta envolvente com que foram produzidos os betões. Poderá ainda ter ocorrido uma ligeira redução na relação a/c dos betões devido a uma eventual maior absorção nas areias do que a estimada na formulação dos betões. Como referido em 3.4.4, a determinação rigorosa da massa volúmica e absorção de areias finas é muito difícil. Pelas razões mencionadas, a resistência mecânica também foi pouco alterada com a introdução de areia reciclada britada não separada. Ainda assim, neste caso, verificou-se uma redução de cerca de 4% aos 28 dias.

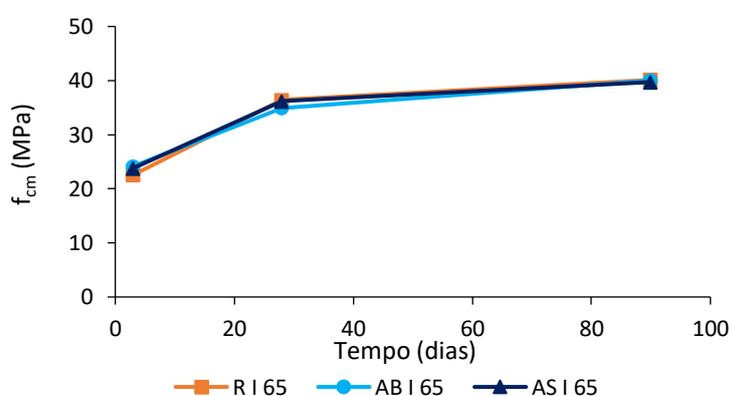


Figura 4.14 - Resistência à compressão média (f_{cm}) de betões com diferentes tipos de agregados finos (AN, AB e AS)

Na Figura 4.15, apresenta-se a evolução da resistência à compressão nos betões em que se procedeu à substituição total de AN por ARB ou ART. Verifica-se que a substituição adicional de agregados grossos naturais por agregados reciclados, para além da substituição na fração fina (substituição adicional de 74% de AN), resultou num decréscimo de 10-20% na resistência à compressão, dependendo da idade e tipo de agregado. Uma redução geral da resistência mecânica em betões com agregados reciclados foi também observada por outros autores, que atribuem essa

depreciação à maior porosidade e menor qualidade da interface nos agregados reciclados (Pacheco et al., 2019; Raman et al., 2021; Tang et al., 2022). No presente estudo, os agregados reciclados foram produzidos com uma pasta de melhor qualidade do que a utilizada na produção dos betões, contribuindo para o melhor comportamento destes betões. Porém, apesar da qualidade da pasta ser superior nos betões de origem, os processos subsequentes de britagem e tratamento térmico dos agregados deverão promover o aparecimento de microfissuração e depreciação da pasta aderida. Para os resultados obtidos também poderá ter contribuído o aumento do teor de vazios nestes betões (Tabela 4.1).

O betão com ART conduziu a resistências à compressão superiores a todas as idades do que do betão com ARB. Tal deverá estar essencialmente relacionado com o facto do ART ter apresentado menor quantidade de pasta aderida do que o ARB, em especial, tendo sido possível atingir partículas “limpas” sem quantidade significativa de pasta (3.4.4). Ainda assim, o aumento de resistência nos betões com ART face aos betões com agregados grossos reciclados sem tratamento não foi significativo. Esse aumento foi de apenas 2% aos 28 dias, estando enquadrado na gama de variabilidade do próprio ensaio. Conforme observado na Tabela 4.2, a resistência à compressão do ARBI65 apresentou a variabilidade mais elevada, devido à maior heterogeneidade dos ARB (CV de 7%).

Na Figura 4.16, analisa-se a influência da utilização de ARB e AS na resistência à compressão de betões totalmente reciclados. Naturalmente, o betão produzido com CRP e ARB+AS apresentou a menor resistência mecânica, seguindo a tendência verificada pela influência isolada da incorporação de cimento reciclado ou agregado reciclado. Ainda assim, foi possível produzir um betão estrutural com 21 MPa de resistência média à compressão aos 28 dias, enquadrado na classe de resistência C12/15. Este resultado é bastante promissor, na medida em que o betão foi produzido apenas com material reciclado, promovendo o desenvolvimento de soluções sustentáveis e de elevada circularidade. Face ao RP65 verificou-se uma perda de resistência de 23%, superior à redução observada nos betões com CEM I, quando se substituiu o AN por ARB. Isso pode estar relacionado com uma menor eficiência do CRP utilizado na produção destes betões. De facto, ao contrário do RP65, o betão TRP65 foi produzido cerca de 2 meses após o processo de termoativação do CRP, o que poderá ter reduzido a sua reatividade devido a eventuais fenómenos de pré-hidratação. Como analisado anteriormente, a incorporação de areia separada de betão não terá tido influência significativa na resistência mecânica.

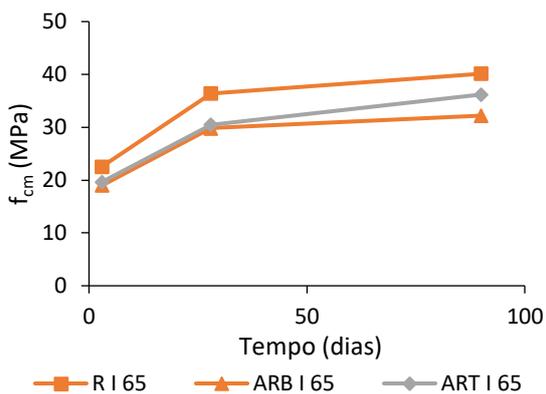


Figura 4.15 - Resistência à compressão média (f_{cm}) nos betões com AN, ARB ou ART

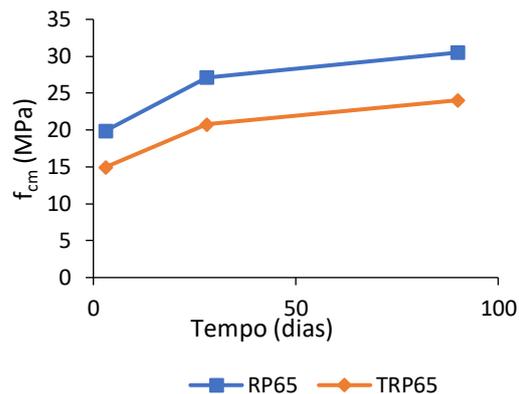


Figura 4.16 - Resistência à compressão média (f_{cm}) nos betões com CRP e AN ou ARB+AS

4.2.3 Resistência à tração

A resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos betões produzidos variou entre 1,8 e 2,9 MPa (Tabela 4.2), analisando-se em seguida a influência do tipo de ligante e de agregado nesta propriedade. Em termos gerais, a resistência à tração dos betões analisados seguiu a tendência observada na resistência à compressão (4.2.2), visto que ambas as propriedades são afetadas da mesma forma pela porosidade.

4.2.3.1 Influência do tipo de ligante

Na Figura 4.17, apresenta-se a resistência à tração aos 28 dias dos betões produzidos com CEM I e CRP, para as relações a/l de 0,65 e 0,70. Para a relação a/l de 0,65 e 0,7, a substituição de CEM I por CRP resultou numa redução da resistência à tração cerca de 35% e 25%, respetivamente. Assim, tal como na resistência à compressão, ocorreu uma redução natural da resistência com a incorporação de CRP. No entanto, na resistência à tração esta redução foi mais expressiva, em especial, no betão com a/l de 0,65. Isso resulta do facto de a resistência à tração ser uma propriedade mais afetada pela composição do betão, nomeadamente pela relação agregado/pasta. Conforme referido na literatura, a resistência à tração tende a aumentar com o aumento de volume de agregado no betão (Neville, 1995), caso não ocorra uma variação significativa da compacidade. De facto, a presença de agregado torna mais longo o trajeto de propagação das fissuras, aumentando a energia de fratura. Isso torna-se ainda mais relevante no ensaio de resistência por compressão diametral, que envolve apenas um plano de rotura. Assim, para igual a/l, nos betões com maior teor de pasta, como sucede no caso do RP65 face ao RI65, a resistência à tração tende a ser ainda menor do que aquilo que resultaria de se alterar apenas o tipo de ligante. Da mesma forma, a redução de resistência nos betões com a/l de 0,7 foi menor, pois diferença do teor de ligante entre o RP70 e o RI70 foi mais pequena. Em parte, isso permite

também explicar a semelhança na resistência à tração entre o RP65 e o RP70, apesar deste último ter sido produzido com maior a/l (mas menor teor de pasta). Deve-se ainda referir, que ao contrário do que sucede nos ensaios de compressão, os ensaios de tração estão associados a maior variabilidade (CV na Tabela 4.2), permitindo apenas a análise de tendências gerais.

4.2.3.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.18, apresenta-se a resistência à tração dos betões com diferentes tipos de agregado fino. A substituição do agregado fino natural por ARFB e AS originou um decréscimo de apenas cerca de 17 e 14% da resistência à tração, respetivamente. Pelas mesmas razões referidas para a resistência à compressão, a utilização de areia fina reciclada afetou de forma pouco significativa a resistência à tração. No entanto, a redução da resistência à tração foi superior, devido à maior influência nesta propriedade da microfissuração e aumento de teor de pasta nos agregados reciclados. Novamente, o AS, associado a menor teor de pasta, conduziu a melhor desempenho.

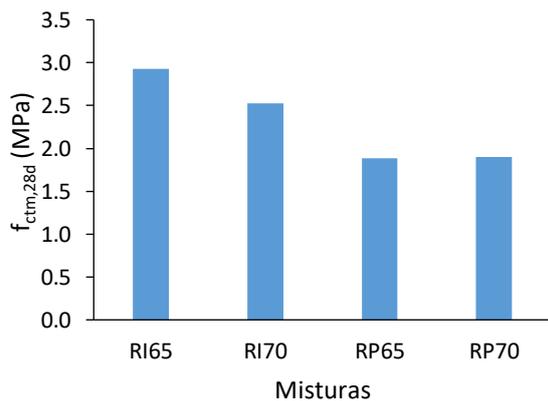


Figura 4.17 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com CEM I e CRP

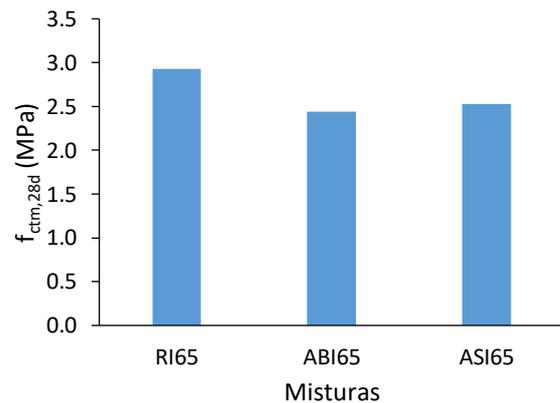


Figura 4.18 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com diferentes tipos de agregados finos (AN, AB e AS)

Na Figura 4.19, confrontam-se os resultados obtidos nos betões com agregados finos e grossos reciclados com os do betão de referência. Os betões com ARB e ART apresentaram resistências à tração cerca de 16% e 25% inferiores à do betão de referência, respetivamente. Podem ser atribuídas as razões já referidas, nomeadamente da qualidade da pasta aderida e do aumento do volume de pasta da mistura (Lee et al., 2012; Tam et al., 2007). No betão ARBI65, teria sido esperada uma maior redução face ao betão de referência, tendo em conta os resultados obtidos para a resistência à compressão e tendo em consideração que o betão em que se procedeu apenas à substituição de finos reciclados (ABI65) ter apresentado menor resistência à tração. Como referido, este ensaio está associado a elevada variabilidade. Porém, ao contrário do que seria esperado e não foi observado na resistência à compressão, os resultados indiciam uma maior depreciação nos betões com ART. Neste caso, para

além da variabilidade do próprio ensaio, a forma mais esférica dos ART pode ser menos favorável na resistência à tração do que a forma alongada. Finalmente, como era esperado, o betão com total incorporação de cimento e agregado reciclado (TRP65) apresentou a menor resistência à tração, embora não muito diferente da do betão apenas com CRP (RP65).

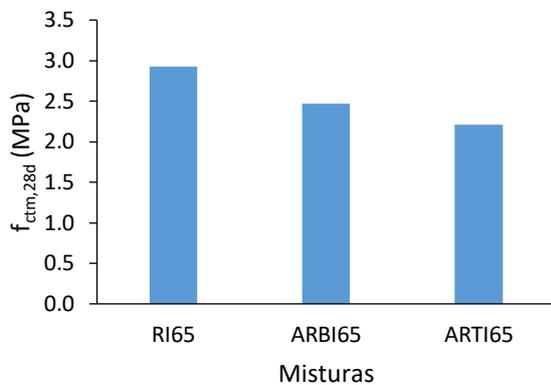


Figura 4.19 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com agregados grossos e finos de ARB e ART

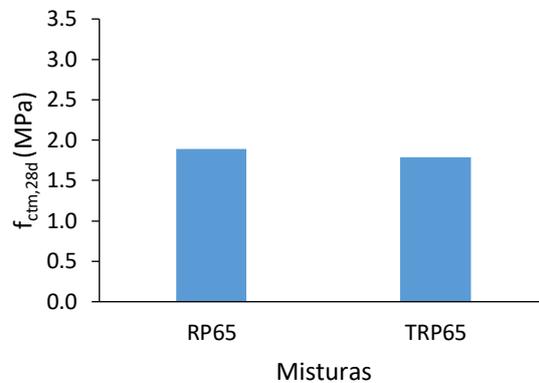


Figura 4.20 - Resistência à tração média (f_{ctm}) de betões com agregados com CRP e AN ou ARB+AS

Na Figura 4.21, confirma-se que a resistência à tração (f_{ctm}) e a resistência à compressão (f_{cm}) seguem a mesma tendência, visto que, como referido, ambas as propriedades são afetadas por fatores semelhantes, como é o caso da relação a/l .

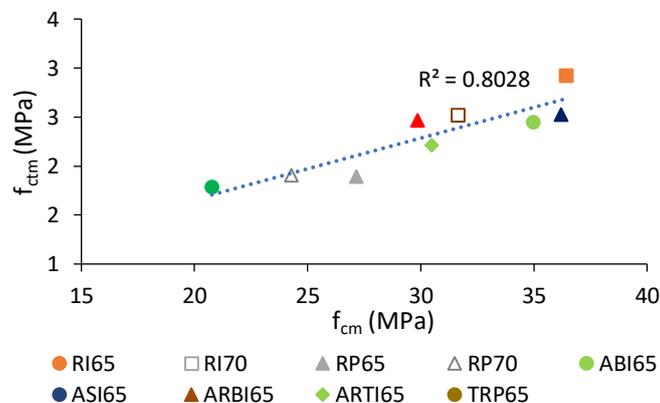


Figura 4.21 - Relação entre a resistência à tração (f_{ctm}) e compressão (f_{cm}) média dos betões

Para a estimativa de resistência à tração em betões convencionais, f_{ctm} , a NP EN 1992-1-1 (2004) sugere a equação (9), válida para resistências à compressão diametral abaixo dos 50 MPa. Esta equação depende da resistência à compressão e da massa volúmica seca do betão. Na Figura 4.22, constata-se que a aplicação desta equação conduziu a estimativas de resistência à tração subestimadas em cerca de 50% face aos valores experimentais. Na equação (4), considerou-se o limite superior da classe de massa volúmica seca do betão (com base nos valores indicados na Tabela 4.2) e para $f_{cm,cil}$

considerou-se os valores obtidos de resistência média à compressão em provetes cúbicos multiplicados por 0,8.

$$f_{ctm} = 0,3 \times (f_{cm,cil} - 8)^{2/3} \times \left(0,4 + \frac{0,6 \times \rho_{seca}}{2200} \right) \quad (9)$$

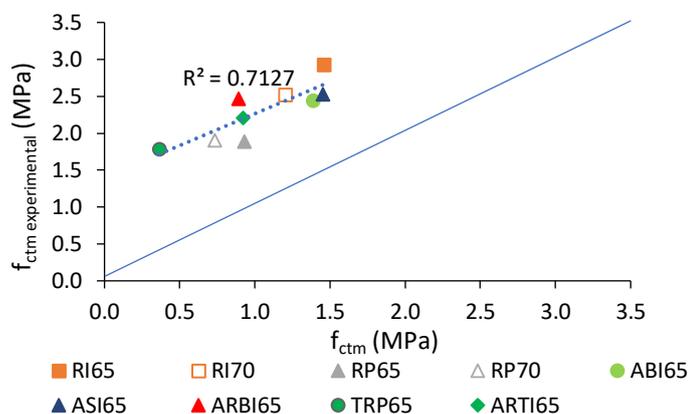


Figura 4.22 – Relação entre os valores de cálculo (f_{ctm}) e experimentais ($f_{ctm_experimental}$) da resistência média à tração. Valores de cálculo determinados com base na NP EN 1992-1-1

4.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade aos 28 dias variou entre 24,8 e 32,9 GPa (Tabela 4.2), dependendo do tipo de cimento incorporado e de agregado fino. Note-se que esta propriedade não foi analisada nos betões com substituição total de AN por agregados reciclados.

4.2.4.1 Influência do tipo de ligante

Na Figura 4.23, apresenta-se o módulo de elasticidade dos betões com CEM I e CRP com a/l de 0,65. O módulo de elasticidade do betão com CRP foi cerca de 25% inferior ao do betão de referência, o que pode ser atribuído à maior porosidade e menor rigidez das partículas de CR (Yu et al., 2013, Real et al, 2021), bem como ao maior volume de pasta nos betões com CRP (19% inferior) do que nos betões com CEM I de igual a/l.

4.2.4.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.24, compara-se o módulo de elasticidade dos betões com diferentes tipos de agregado fino. A substituição de areia natural por AFRB e AS conduziu a uma redução esperada da rigidez, de 17% e 12%, respetivamente. De facto, a maior porosidade e teor de pasta nos betões com areia

reciclada contribuiu para a diminuição da rigidez do betão. Mais uma vez, o ASI65 demonstrou melhor desempenho do que o ABI65, motivado pelo facto de se ter atingido uma redução significativa do teor de pasta aderida.

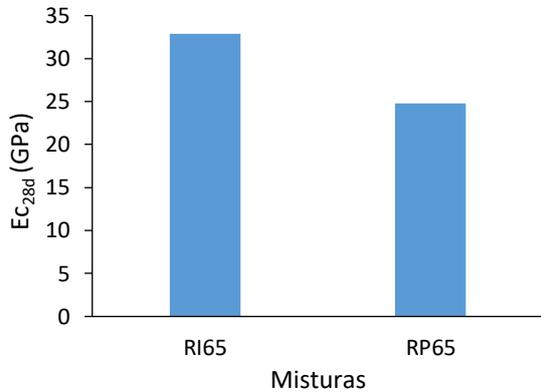


Figura 4.23 - Módulo de elasticidade (Ec) em função do tipo de cimento (CEM I e CRP)

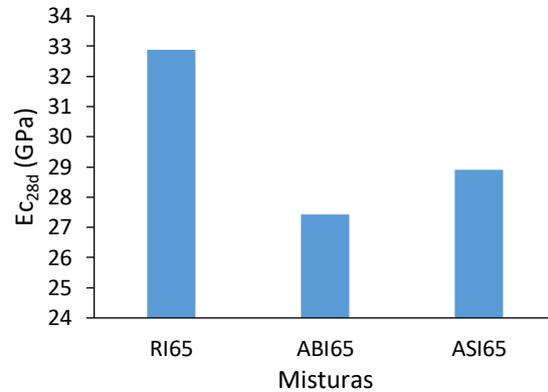


Figura 4.24 - Módulo de elasticidade (Ec_{28d}) em função dos agregados finos (AN, AB e AS)

Segundo a NP EN 1992-1-1 (2010), o módulo de elasticidade (E_{cm}) pode ser estimado de acordo com a equação (10), definida em função da resistência média à compressão em provetes cilíndricos ($f_{cm,cil}$) e da massa volúmica seca (ρ_s) do betão. Na Figura 4.25, verifica-se que a equação sugerida na norma conduziu a valores conservativos do módulo de elasticidade face ao obtido de forma experimental. Assim, verifica-se que, mais uma vez, os valores estimados são inferiores aos obtidos experimentalmente.

$$E_{cm} = 22000 \times \left(\frac{f_{cm,cil}}{10}\right)^{0,3} \times \left(\frac{\rho_s}{2200}\right)^2 \quad (10)$$

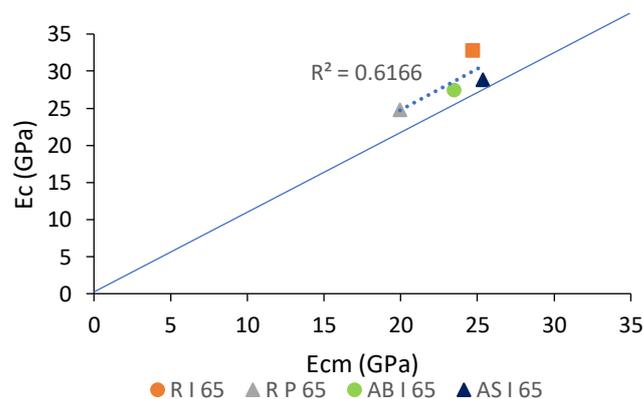


Figura 4.25 - Relação entre os valores de cálculo (E_{cm}) e experimentais (E_c) do módulo de elasticidade. Valores de cálculo determinados com base na NP EN 1992-1-1

4.2.5 Velocidade de propagação de ultrassons

A velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias variou entre 3903 e 4855 m/s (Tabela 4.2), dependendo essencialmente do tipo de ligante, relação a/l e tipo de agregado.

4.2.5.1 Influência do tipo de ligante

A velocidade de ultrassons (V_{us}) depende essencialmente da massa volúmica e rigidez do betão, conforme a equação (11), em que E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, ρ_s a massa volúmica seca e ν o coeficiente de Poisson (Real et al., 2021).

$$V_{us} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_s} \times \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}} \quad (11)$$

Na Figura 4.23, apresenta-se o valor da velocidade de propagação de ultrassons de betões com CEM I, CRP e CRB. Nos betões com a/l de 0,65, V_{us} diminuiu cerca de 10 e 17% com a substituição de CEM I por CRP e CRB, respetivamente. Conforme traduzido pela equação 11, a V_{us} depende essencialmente do E_c , que foi inferior nos betões com CR (4.2.4) em resultado do seu maior volume de pasta e da menor rigidez das partículas de CR. Naturalmente, verificou-se uma menor redução da V_{us} nos betões com a/l de 0,7 (6%), pois a diferença do volume de pasta entre betões foi menor. A redução da V_{us} foi superior nos betões com CRB, pois estes estão associados a uma maior valor de a/c equivalente (0,93 em vez de 0,65 no RP65, conforme discutido em 4.2.2.1).

4.2.5.2 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.27, compara-se a velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) dos betões produzidos com diferentes tipos de agregado fino. Tal como observado nas restantes propriedades estudadas, a redução da V_{us} após incorporação das areias finas recicladas foi pouco significativa, em especial no caso do betão com AS. Essa redução foi de 2,6% e 0,7% para AFRB e AS, respetivamente. A reduzida percentagem de substituição de areia reciclada (26%) e o baixo teor de pasta aderida, justificam os valores próximos de V_{us} entre RI65 e ASI65.

No entanto, a incorporação adicional de agregado grosso reciclado promoveu uma redução mais significativa da V_{us} (15% para ARB e ART, Figuras 4.28), tal como também observado noutras propriedades analisadas neste estudo, nomeadamente a massa volúmica. O aumento do teor de pasta e a depreciação da mesma, após britagem ou tratamento térmico, reduz em simultâneo a rigidez e massa volúmica do betão, e consequentemente a V_{us} .

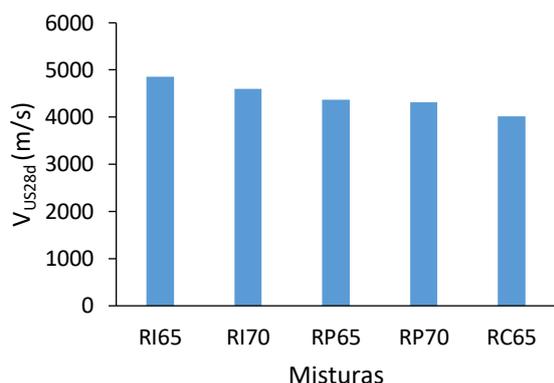


Figura 4.26 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de cimento

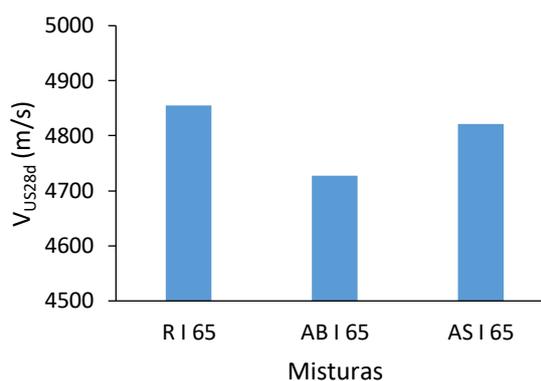


Figura 4.27 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de agregado fino (AN, AB e AS)

Tendo em consideração que, devido ao seu processo de produção, os ART apresentaram geralmente menor quantidade de pasta aderida e como tal maior massa volúmica e menor porosidade, seria espectável que o betão com este tipo de agregado exibisse uma V_{us} superior à do betão com ARB, o que não se verificou. No entanto, os resultados da V_{us} são coerentes com os da massa volúmica seca (ver 4.2.2), em que se constataram valores idênticos no betão com ARB e com ART. Em face da variabilidade do próprio ensaio, e tendo em consideração os valores próximos da resistência à compressão e da velocidade de propagação de ultrassons obtidos para estes betões, pode-se concluir que o pré-tratamento térmico dos agregados reciclados teve pouca influência no desempenho final do betão.

Por sua vez, no betão com incorporação total de ligante e agregado reciclado (TRP65) obteve-se uma redução de cerca de 11% da V_{us} face ao betão de referência com CRP (Figuras 4.29).

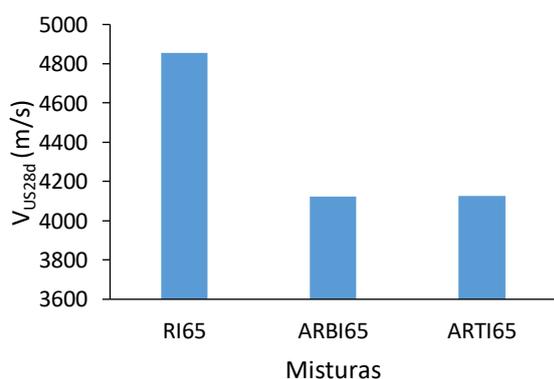


Figura 4.28 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com diferentes tipos de agregado (AN, ARB, ART)

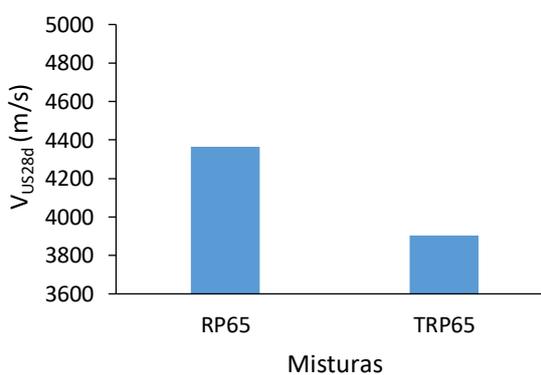


Figura 4.29 - Velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) de betões com CRP e AN ou ARB+AS

Esta mistura foi afetada em simultâneo pelo efeito negativo de se incorporar CRP e agregado reciclado.

4.2.5.3 Relação entre a velocidade de ultrassons e a resistência à compressão

Bogas (et al., 2013) sugere a equação (12) para estimar a velocidade de propagação de ultrassons a partir das propriedades de resistência à compressão e massa volúmica do betão. Esta equação baseia-se na relação estabelecida na equação (10) e na relação proposta na NP EN 1992-1-1 (2010) entre resistência à compressão e módulo de elasticidade. As grandes vantagens desta equação é o facto de esta ser válida para diferentes tipos de betão de destinta massa volúmica e de ter sido construída de forma não empírica. Na Figura 4.30, é possível confirmar a boa correlação entre estas propriedades ($R^2 \approx 0,85$), validando os resultados obtidos no presente trabalho. Para além da variabilidade dos resultados, a relação é afetada pelo facto dos provetes terem sido ensaiados no estado saturado. De facto, o teor de humidade faz aumentar a velocidade de propagação de ultrassons sem alterar a resistência mecânica. A constante k é determinada por regressão linear, conforme ilustrado na Figura 4.30.

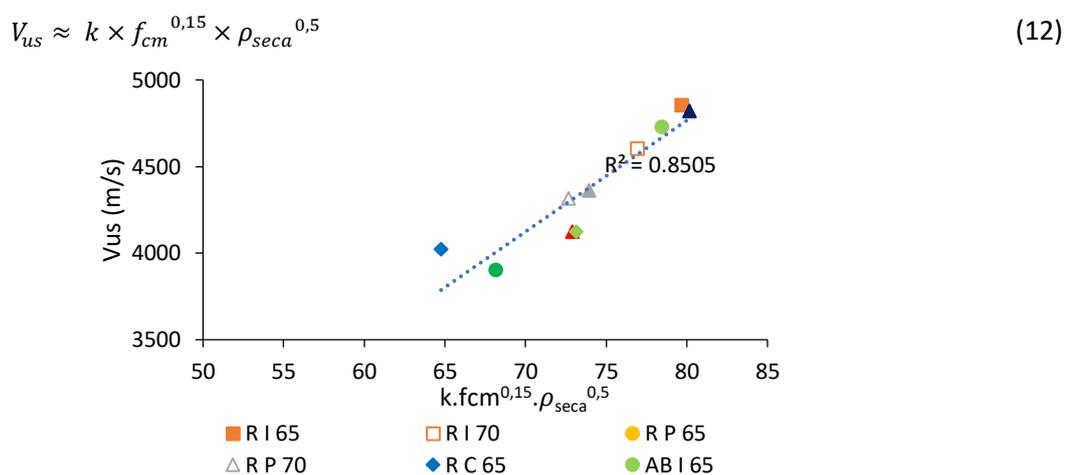


Figura 4.30 – Relação entre a velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}) e a resistência à compressão e massa volúmica seca ($k \cdot f_{cm}^{0,15} \cdot \rho_{seca}^{0,5}$)

4.3 RETRAÇÃO

A retração do betão pode ocorrer de diferentes formas, nomeadamente retração por secagem, plástica, térmica, autogénea e por carbonatação (Houst et al., 1997). A pasta, através da ação capilar desenvolvida pelo movimento de água na sua microestrutura, é a principal fonte de retração do betão, no caso da retração plástica, autogénea e por secagem. Assim, o tipo e nível de porosidade da pasta são fatores importantes na retração do betão. Neste caso, os poros de dimensão superior a $10^{-5}m$, resultantes da compactação do betão, bem como os meso e macro poros capilares entre 10^{-8} e $10^{-5}m$ são essencialmente responsáveis pela permeabilidade da pasta de cimento e do betão, para além de

influenciar a resistência mecânica. Por sua vez, os micróporos de dimensão inferior a 50 nm são os responsáveis pela retração e fluência do betão. Nestes poros, a água não se encontra na forma livre, exercendo forças de sucção caso ocorra um mecanismo que promova a sua remoção (hidratação, evaporação). Por sua vez, os agregados têm uma influência importante na forma como restringem as variações dimensionais ocorridas ao nível da pasta.

De seguida, analisa-se a influência do tipo de ligante e do tipo de agregado na retração por secagem e retração autógena dos betões produzidos.

4.3.1 Retração por secagem

4.3.1.1 Influência do cimento reciclado

As Figuras 4.31-4.33 mostram a evolução da perda de massa, retração axial e retração superficial de misturas de betão com diferentes tipos de ligante (CEM I, CRP, CRB), respetivamente. Nas Figuras 4.31-4.33 apresentam-se os valores médios de dois provetes por composição e no Anexo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos vários provetes.

Em geral, os betões com CR apresentaram maior retração do que os betões com CEM I de igual a/l , o que se pode atribuir à menor rigidez dos betões com CR (4.2.4) e ao seu maior volume de pasta. Em estudos anteriores realizados no departamento de engenharia civil do IST, foram constatadas tendências semelhantes (Carriço et al., 2022; Real et al., 2021). A menor rigidez dos betões com CR é consequência da natureza porosa do CR e do menor volume de agregado utilizado. Por outro lado, o aumento de 19% no volume de pasta dos betões com CR, face ao betão de referência com CEM I, vai aumentar a fonte de retração e ao mesmo tempo diminuir a capacidade de restrição a esta variação dimensional (menor teor de agregado). De facto, quando se utilizou água gelada na produção do RP65AG, permitindo adotar a mesma dosagem de ligante do RPI65, verifica-se que a retração ao longo do tempo foi mais próxima nos dois betões (Figura 4.32).

A maior perda de massa por parte dos betões com CR (Figura 4.31) é resultado da sua velocidade de hidratação mais lenta e da sua maior quantidade de água inicial (Real et al., 2021). Dado que o betão RP65AG foi produzido com o mesmo teor de ligante e, como tal, a mesma quantidade de água inicial do que o betão RPI65, as perdas de massa foram semelhantes nestes betões. Por sua vez, o betão com CRB foi o que apresentou a maior perda de massa ao longo do tempo, o que se justifica por este apresentar a maior relação a/c equivalente (0,93). Ou seja, apesar de ter sido produzido com a mesma quantidade de água inicial do RP65, parte do seu ligante era constituído por agregado (cerca

de 26%), o que não permite reter água da mistura (maior quantidade de água livre no sistema), para além de conduzir a microestruturas mais porosas (associadas a maior facilidade de secagem).

Apesar de os betões com CRB terem sido produzidos com maior a/c equivalente e estarem associados a maior perda de água, a retração axial foi semelhante à do betão com igual teor de CRP. Por um lado, o betão com CRB está associado a menor teor de ligante ativo e maior quantidade agregado, devido à contaminação deste ligante com partículas de agregado após a separação. Isso reduz a fonte de retração e aumenta o efeito de restrição. Por outro lado, desenvolveu-se uma microestrutura mais grosseira no RC65, que apesar de diminuir a rigidez e o efeito de restrição do betão, conduz a menores forças capilares responsáveis pela ação de retração.

No entanto, verificou-se que a retração superficial foi bastante inferior nos betões com CRB do que com CRP (Figura 4.33). Tal deve-se essencialmente à velocidade de secagem e à quantidade de pasta nos dois betões (após descontar o teor de agregado contaminado no CRB). Dado que a velocidade de secagem é menor no betão com CRP, o interior do betão permanece mais tempo húmido, fazendo com que a sua retração axial não seja tão elevada. Porém, na superfície, em que ocorreu secagem efetiva, a retração do RP65 vai ser mais importante do que a do RC65 e RP65AG, associados a menor teor de pasta e maior teor de agregado. Conclui-se assim que o teor de pasta foi condicionante no comportamento à retração dos betões analisados. Note-se ainda que a medição da retração superficial pode ser afetada por fenómenos de microfissuração superficial, resultante do efeito de restrição provocado pelo núcleo do provete mais húmido. Para além de eventuais erros de medição, a restrição da retração superficial por parte do núcleo dos provetes e a possível microfissuração são razões para a retração axial nos vários betões analisados ter sido superior à superficial.

Tendo em consideração os valores de retração axial, verifica-se que estes tenderam para valores estáveis após 90 dias de idade, independentemente do tipo de betão analisado. Neste caso, os betões RP65 e RC65 apresentaram retrações por secagem aos 90 e 120 dias de idade cerca de 80% superiores à do betão de referência RI65. Considerando misturas de igual a/l e teor de pasta (RP65AG), este incremento foi cerca de 50% face ao RI65. Tendo em consideração argamassas de igual a/l e teor de ligante, (Carriço et al., 2022) também reportou retrações 54% superiores quando o CEM I foi substituído por 100% CRP.

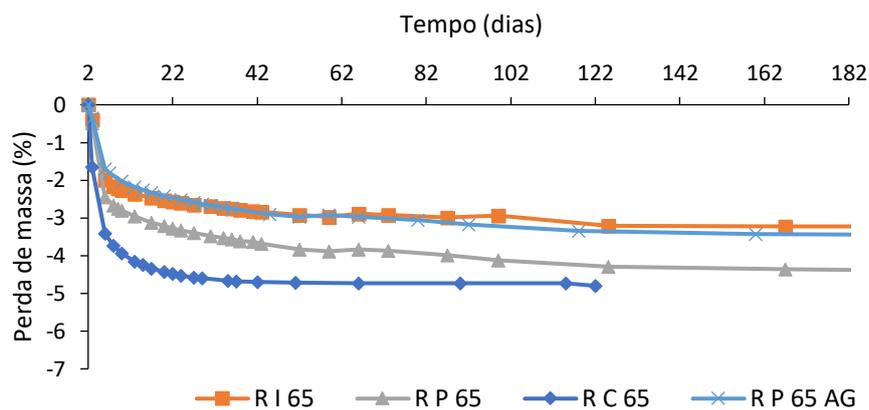


Figura 4.31 - Perda de massa de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante

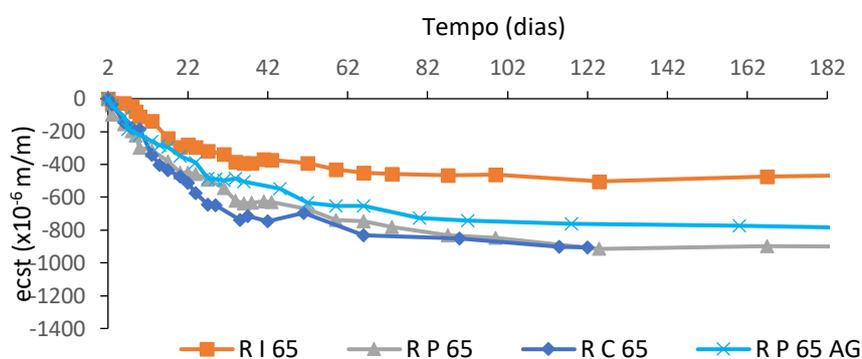


Figura 4.32 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante

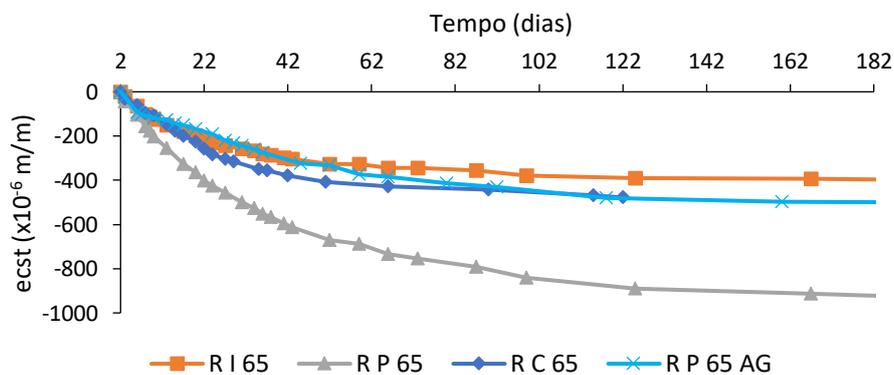


Figura 4.33 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante

4.3.1.2 Influência dos agregados reciclados

A Figura 4.34 apresenta a variação de massa dos provetes de betão produzidos com diferentes tipos de agregado fino. Em geral, verifica-se uma diferença pouco significativa entre os diferentes tipos de betões, concluindo-se que a incorporação de areia reciclada teve pouca influência nesta propriedade. O ligeiro aumento de perda de água nos betões com AFRB e AS resulta da água extra

absorvida nos agregados e que é eliminada ao longo do tempo, sendo menor em AS, visto que estas areias apresentaram menor teor de pasta aderida. O aumento relativo de perda de água face a RI65 parece ter aumentado ao longo do tempo, o que se pode justificar pela mais lenta remoção de água do interior dos agregados reciclados, que conforme discutido em 4.2.1.2 apresentam uma pasta menos porosa (a/c de 0,55) do que aquela com que foi produzido o betão (a/c de 0,65).

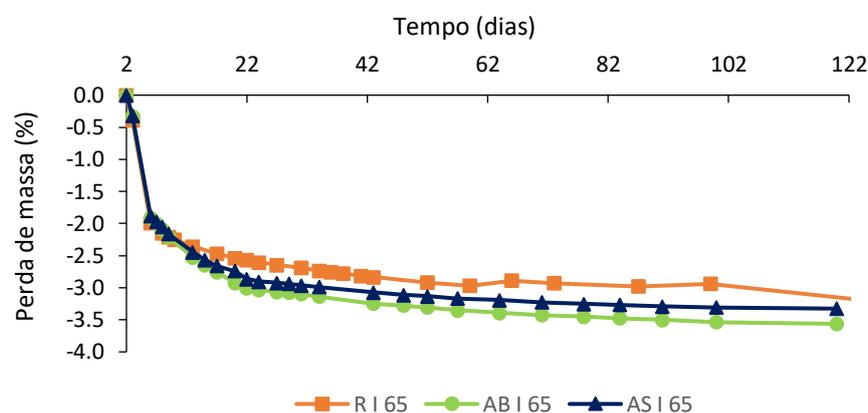


Figura 4.34 - Perda de massa de betões 0,65, para diferentes tipos de agregados finos

A influência do tipo de agregado fino na retração axial e superficial (Figuras 4.35 e 4.36) seguiu uma tendência semelhante. A substituição de areia natural por areia reciclada proveniente da britagem, sem qualquer tratamento posterior, fez aumentar a retração, pois aumentou o volume de pasta na mistura, com conseqüente redução da rigidez do betão. Tendo em conta a retração axial, no betão ABI65, registou-se um aumento de 20% na retração por secagem a longo prazo face a RI65. No entanto, a substituição de areia natural por AS teve reduzida influência na retração (apenas 2% superior aos 120 dias), o que está de acordo com o facto deste agregado apresentar muito menor quantidade de pasta aderida (3.4.4). Conclui-se assim que o método de separação proposto foi bastante eficiente na produção de areia reciclada de elevada qualidade, permitindo anular um dos efeitos negativos da sua utilização, relacionado com a maior retração promovida nos produtos de base cimentícia. Na retração superficial, em que a secagem foi mais efetiva, foi mais notória a diferença do betão com AFRB face aos restantes betões.

A retração foi ainda analisada para a mistura totalmente reciclada, produzida com agregado grosso (ARB) e fino (AS) reciclado, bem como com 100% CRP (TRP65). Desde logo, como seria de esperar em face dos resultados obtidos anteriormente, a perda de massa foi superior no betão TRP65 do que para RP65 (Figura 4.37). De facto, apesar de o TRP65 ter sido produzido com o mesmo teor de pasta de RP65, possuía agregados grossos porosos com água extra de absorção no seu interior.

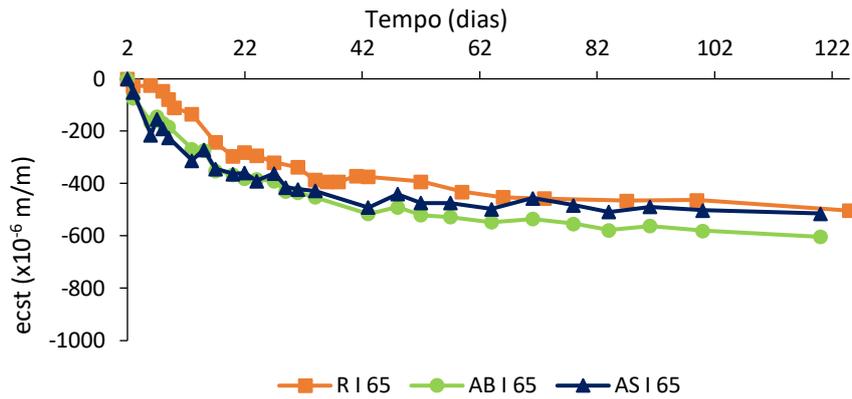


Figura 4.35 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos

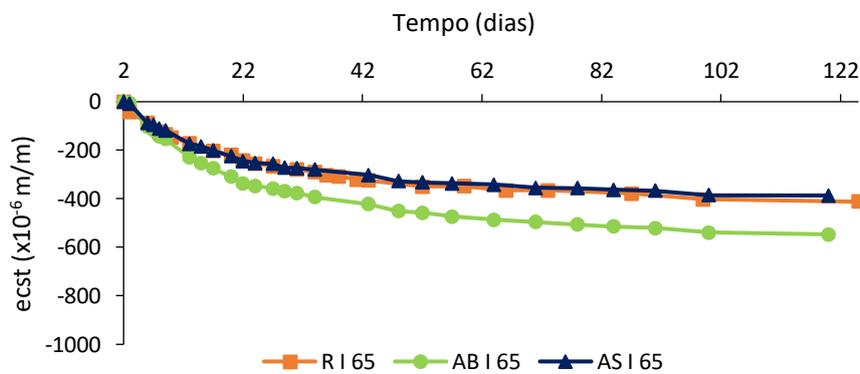


Figura 4.36 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos

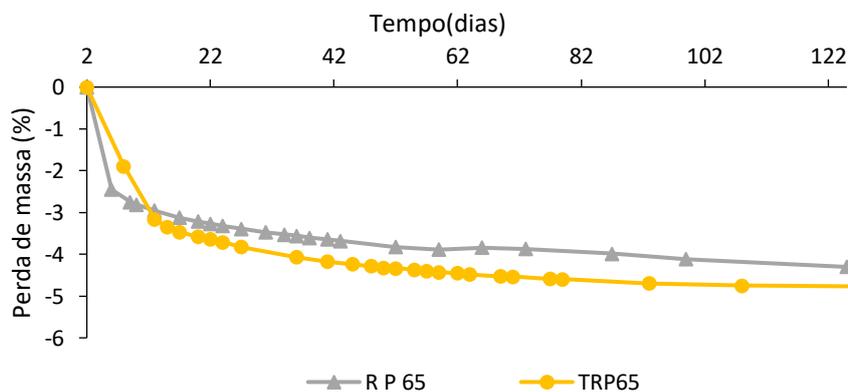


Figura 4.37 - Perda de massa de betões com CRP, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)

A retração axial e superficial a longo prazo foi superior no TRP65 do que no betão de referência PI65, em cerca de 25% e 14% aos 120 dias, respetivamente (Figuras 4.37 e 4.38). Este aumento significativo de retração é atribuído à menor rigidez e maior teor de pasta dos ARB. Neste caso, a produção de um betão totalmente reciclado conduziu a uma retração média axial aos 120 dias cerca

de 2,2 vezes superior à do betão com apenas CEM I e agregados naturais (RI65). Este incremento resulta sobretudo do efeito cumulativo do tipo e volume de ligante.

Este aumento de retração observado no TRP65 foi muito significativo, sendo um fator a ter em consideração na produção de betões com incorporação de total de materiais reciclados. Acrescente-se, como referido, que o betão TRP65 apenas foi produzido 2 meses após a produção do CRP, podendo este ligante ter perdido parte das suas propriedades hidráulicas. Isso contribuiria para uma maior perda de água e uma microestrutura menos densa, reduzindo a rigidez do betão, mas também a fonte de retração.

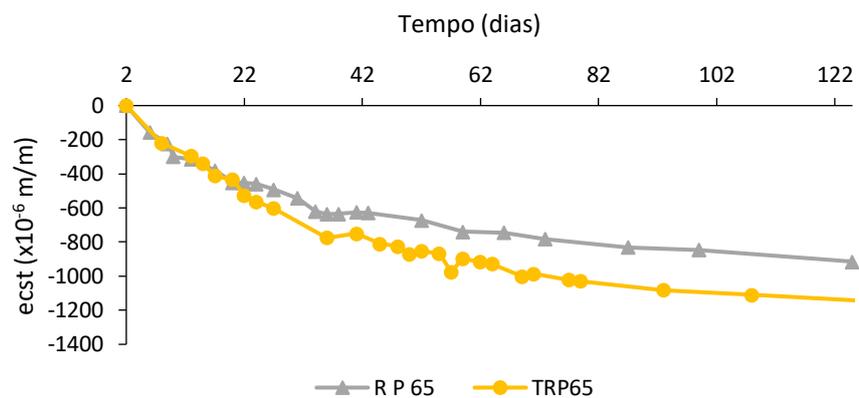


Figura 4.38 - Retração axial por secagem de betões com a/l 0,65, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)

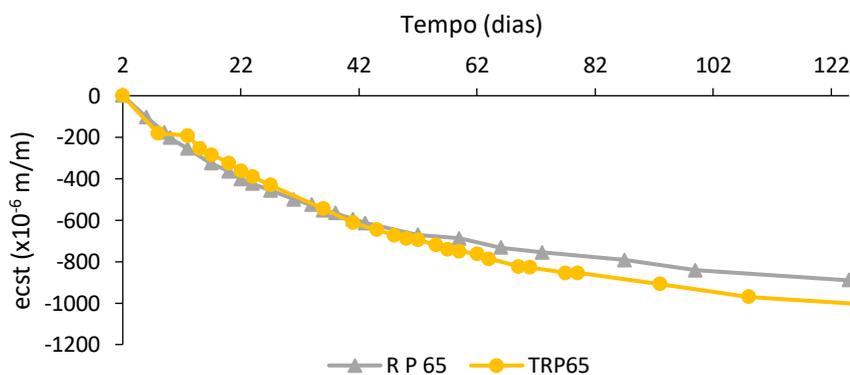


Figura 4.39 - Retração superficial por secagem de betões com a/l 0,65, produzidos com agregado natural ou agregado reciclado (ARB+AS)

4.3.1.3 Relação entre a retração e a perda de massa

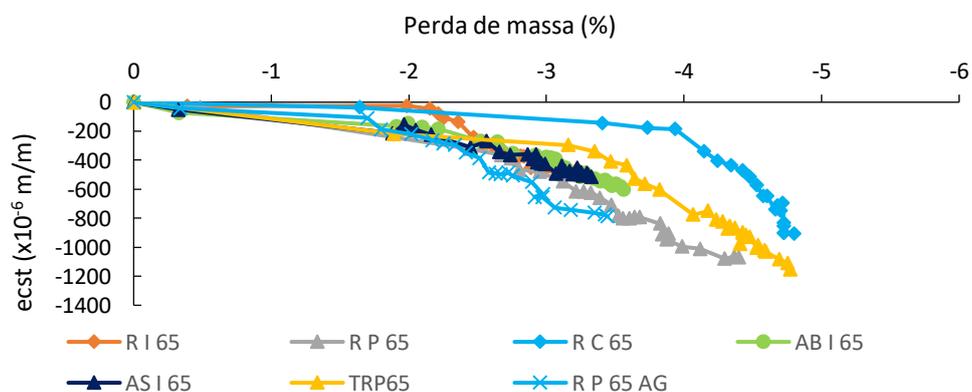
Na Figura 4.40, relaciona-se a perda de massa com a retração dos vários betões analisados. Verifica-se uma tendência de evolução semelhante destes dois fatores, pois a retração é essencialmente uma consequência da perda de água do betão. No entanto, como referido no início de

4.3.1, a perda de água assume um papel mais ou menos importante consoante a dimensão dos poros de que esta é removida. Basicamente, a retração vai ser mais significativa quando a água é removida dos poros mais refinados, de dimensão inferior a 50 nm.

Em geral, verifica-se que após os primeiros dias, associados a perda de água livre, os betões produzidos com CR apresentaram retrações para uma dada perda de massa ligeiramente superiores à do betão de referência com CEM I (declive das curvas mais acentuado, Figura 4.40). Isso está de acordo com uma maior variação dimensional dos betões com CR, para uma dada perda de água, em resultado da sua maior fonte de retração e menor efeito de restrição. Porém, por exemplo, os betões com CRP apresentaram um declive semelhante a RI65, embora tivessem desenvolvido uma retração bastante superior. Isso confirma que o aumento de retração nos betões com CR está muito associado ao maior volume de ligante e de pasta presente nos betões com CR ou com CR e agregados reciclados (TRP65). De facto, verifica-se um desempenho mais próximo entre o RI65 e o RP65AG, produzidos com o mesmo teor de pasta (Figura 4.40).

Destaca-se o facto de o betão com CRB desenvolver um maior período inicial com baixo declive e depois apresentar retrações elevadas para uma dada perda de massa. Por um lado, devido à sua maior relação a/c equivalente e menor teor de fração cimentícia, o RC65 desenvolve uma microestrutura mais grosseira e com maior presença de partículas inertes. Como tal, a evaporação de água livre é facilitada, sem grande ação capilar, e aumenta a restrição a eventuais retrações. Por outro lado, a elevada relação a/c equivalente faz aumentar a magnitude da retração a longo prazo.

O ligeiro aumento de retração nos betões com CRP para uma dada perda de massa, durante o período inicial entre cerca de 2 e 5 dias de idade, resulta do CR desenvolver mais rapidamente estruturas mais refinadas do que a matriz de CEM I, principalmente até aos 3 dias de idade (Bogas et al., 2022; Bogas et al., 2020). Esse maior refinamento, para idêntica porosidade global, promove o aumento das tensões capilares, e consequentemente, da retração (Carriço et al., 2022), que por sua vez é menos restringida em resultado da menor quantidade de agregado presente.



4.3.2 Retração autogénea

Devido à grande exigência de água dos betões com CR, neste trabalho houve necessidade de produzir betões com elevada relação a/c. Desse modo, seria expectável que pelo menos nos betões de referência com CEM I, a retração autogénea não tivesse significado. De facto, para relações a/c superiores a cerca de 0,45, em que a quantidade de água de mistura é suficientemente superior à necessária para a hidratação do cimento (inferior a cerca de 0,23, Neville (1995)), a auto-dessecação da matriz é pouco provável. Neste caso, a água de hidratação é consumida dos poros mais largos, mantendo-se preenchidos os poros de menor dimensão, responsáveis pela retração (Klieger, 1994; Mehta et al., 2001). Assim, na Figura 4.41, confirma-se a ausência de retração significativa no betão de referência, RI65. A pequena variação de retração observada está relacionada com a dificuldade de medição e variabilidade do ensaio.

No entanto, era importante perceber se a consideração de uma elevada relação a/l também conduziria a valores de retração autogénea pouco significativos nos betões com CR. Devido à sua natureza porosa e elevada área superficial, estes betões tendem a desenvolver estruturas mais refinadas para um dado nível de porosidade, o que poderia conduzir a maior probabilidade de auto-dessecação e desenvolvimento de retração autogénea (Bogas et al., 2020) No entanto, confirma-se que a retração autogénea também não é importante nestes betões, pelo menos para a relação a/l analisada. Por um lado, a quantidade de água de hidratação é ligeiramente inferior no CR do que no CEM I (essencialmente constituído por um polimorfo de C_2S que exige menos água de hidratação do que o C_3S no CEM I, (Bogas et al., 2022)). Por outro lado, a quantidade de água no sistema é suficientemente elevada para que os poros de menor dimensão continuem preenchidos durante o estágio de hidratação inicial.

Na Figura 4.41, os valores são apresentados até aos 28 dias de idade, embora este tipo de retração tenha apenas mais importância no período de maior hidratação, até cerca de 7 dias. Ainda assim, isso permite demonstrar que a evaporação de água e a retração por secagem não tiveram significado durante o ensaio, concluindo-se que a metodologia de ensaio utilizada foi eficiente. Na retração superficial, foi possível identificar alguma retração ao longo do tempo (Figura 4.42), o que pode estar relacionado com a maior dificuldade em garantir a ausência de evaporação na superfície do provete. Na Figura 4.43, confirma-se que a retração autogénea também não foi relevante nos betões produzidos com diferentes tipos de agregados fino, pois como referido a fonte de retração não teve grande significado. Poderia ser esperado que a introdução de agregados reciclados porosos pudesse contribuir, através de cura interna, para o desenvolvimento de menor retração autogénea nos betões

com AFRB. Porém, para além da retração autogénea não ter tido significado nestes betões, a cura interna eventualmente promovida pelo AFRB também não deverá ser relevante, pois conforme discutido em 4.1.2.1, a porosidade da pasta aderida é inferior à da matriz do betão, o que limita a ocorrência deste fenómeno.

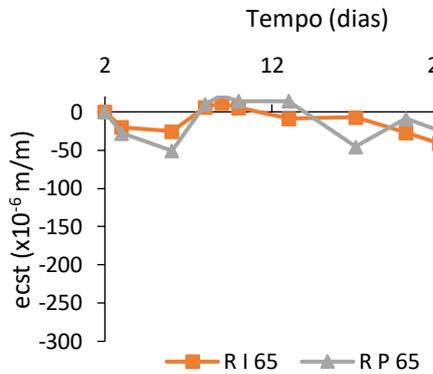


Figura 4.41 - Retração axial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante

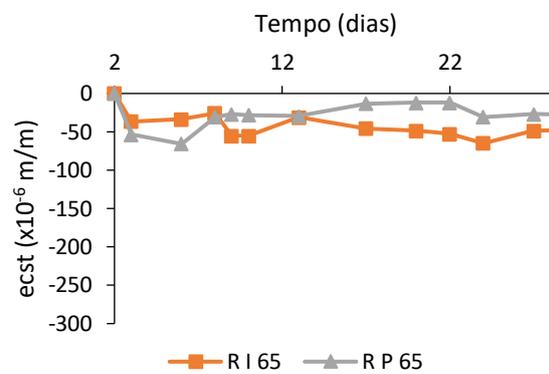


Figura 4.42 - Retração superficial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de ligante

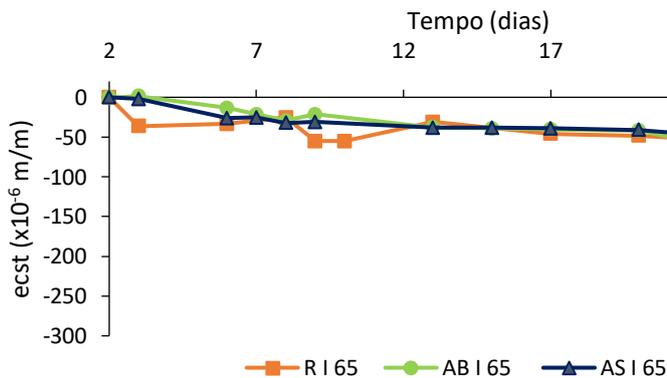


Figura 4.43 - Retração superficial autogénea de betões com a/l 0,65, para diferentes tipos de agregados finos

4.3.3 Fluência

A fluência traduz o aumento de deformação do betão quando sujeito a carga constante, correspondendo à extensão em excesso face à extensão elástica inicial. Na verdade, se o betão estiver sujeito a secagem, sofre também retração, sendo a extensão adicional afetada em simultâneo por esta propriedade e pela fluência (Neville, 1995). Assim, a extensão por fluência resulta de subtrair da extensão total medida durante o ensaio, ε_t , a extensão por retração, ε_s , e a extensão elástica instantânea, ε_i , de acordo com a equação 4 apresentada em 3.6.4.5.

Por sua vez, a extensão por fluência é afetada por duas parcelas, conhecidas por fluência básica, medida em condições em que a troca de água com o exterior não é possível, e a fluência por secagem, resultante do movimento de água para o exterior. Estas parcelas são adicionadas da extensão por retração, sendo independentes umas das outras.

No presente trabalho, apenas se determinou a extensão total e a extensão por retração em iguais condições ambientais. Desta forma, não foi possível determinar cada uma das duas parcelas da extensão por fluência. Assim, apenas a extensão global de fluência, ϵ_c , foi determinada. Na Figura 4.44, apresenta-se a evolução da extensão média de fluência ao longo do tempo $\epsilon_c(t)$. Como referido em 3.6.4.5, a extensão por fluência foi medida a partir de 28 dias até 170 dias de idade. Assim, o instante zero na Figura 4.44 corresponde à idade do início do carregamento, que ocorreu aos 28 dias de idade. Por sua vez, na Figura 4.45, apresenta-se a evolução da extensão de retração, ϵ_s . Os resultados obtidos em cada um dos 2 provetes ensaiados por composição e propriedade analisada apresentam-se no Anexo 4. O coeficiente de fluência a um dado instante, $\phi(t)$, foi determinado de acordo com a equação (5) em 3.6.4.5, e a sua evolução ao longo do tempo apresenta-se na Figura 4.46. Para o presente estudo, foi apenas analisada a influência de se substituir CEM I por 100% CRP, ensaiando-se unicamente os betões RP65 e RI65.

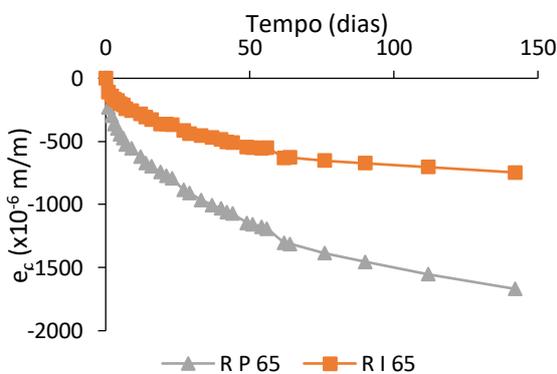


Figura 4.44 - Extensão de fluência, ϵ_c , de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante, durante o ensaio de fluência (início de carregamento aos 28 dias – idade zero)

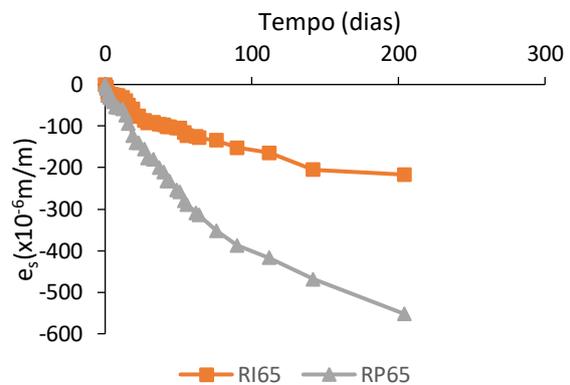


Figura 4.45 - Retração, ϵ_s , de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante, durante o ensaio de fluência (a partir dos 28 dias de idade)

A fluência é essencialmente afetada pela força aplicada, resistência à compressão, composição do betão (tipo de ligante, relação a/l e proporção dos constituintes), porosidade, geometria dos provetes e condições ambientais (Ahmed, 2017). No presente estudo, os betões foram ensaiados para condições idênticas de força aplicada (10 kN), geometria dos provetes e condições ambientais, distinguindo-se o seu comportamento pela influência dos restantes fatores.

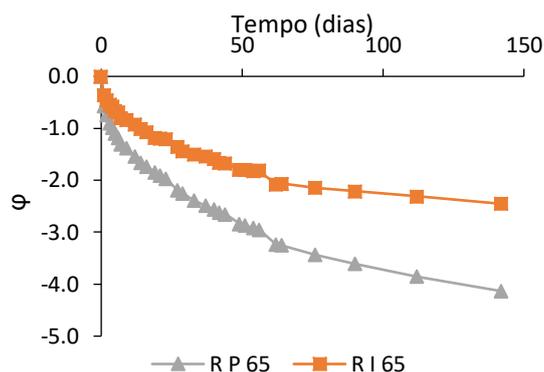


Figura 4.46 - Coeficiente de fluência (ϕ) ao longo do tempo de betões 0,65, para diferentes tipos de ligante

Tal como na retração, a pasta é a responsável pela fluência e os agregados pela resistência à variação dimensional resultante deste fenómeno. Assim, dado que o betão RP65 foi produzido com maior teor de pasta e conduziu a menores resistências mecânicas (3.6.4.2), a extensão de fluência ao longo do tempo foi superior à do betão RI65 (Figura 4.44). Por outro lado, dado que os betões RP65 e RI65 foram sujeitos à mesma carga durante o ensaio, mas a sua resistência na idade de ensaio era diferente, a fluência foi afetada de forma distinta. Neste caso, o betão RP65 foi carregado para uma maior percentagem de carga de rotura (menor resistência à tração), o que também tende a aumentar a sua extensão de fluência. Assim, após 140 dias de ensaio, verificou-se que a extensão de fluência foi 2,24 vezes superior no RP65 face ao RI65. Pelas razões já discutidas em 4.3.1, a retração após 140 dias foi 80% superior no betão RP65 do que no RI65 (Figura 4.45).

No entanto, o aumento do coeficiente de fluência no RP65 face ao RI65 foi menor do que a diferença observada para a extensão de fluência. O coeficiente de fluência foi 69% superior no RP65 do que no RI65. Isso resulta do módulo de elasticidade ser menor nos betões com CRP, conforme discutido em 4.2.4.

Em geral, os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que a utilização de CR pode conduzir a incrementos relevantes da extensão e do coeficiente de fluência, sendo importante encontrar estratégias para diminuir o efeito da elevada exigência de água deste ligante, e assim poder reduzir o teor de ligante e de pasta na produção do betão.

5. CONCLUSÃO

No presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões do presente trabalho, cujo objetivo visou a análise da resistência mecânica, retração e fluência de betões produzidos com diferentes tipos de ligante e agregado reciclado. Para tal, foi desenvolvida uma extensa campanha experimental, em que foram produzidos betões com a/l de 0,65 e 0,70 e cimento reciclado proveniente de pasta de cimento (CRP) ou de betão (CRB), bem como com agregados finos e grossos reciclados resultantes de britagem primária (ARB) e tratamento térmico (ART), incluindo uma areia reciclada de elevada qualidade (AS). Para a produção inovadora de CRB e AS, foi utilizada uma metodologia de separação desenvolvida e patenteada no âmbito do projeto *EcoHydB* (PTDC/ECI-CON/28308/2017), em que também se insere o presente trabalho.

Os vários betões produzidos foram caracterizados no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica fresca) e no estado endurecido (massa volúmica, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons, retração autógena e por secagem e fluência). Nos próximos pontos, apresentam-se as principais conclusões obtidas no trabalho, bem como são sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

A incorporação de CR, de elevada exigência de água, requereu a produção de betões com maior volume de pasta, o que condicionou o desempenho em termos de várias propriedades como a retração, a fluência e o módulo de elasticidade. Considerando também elevadas dosagens de Superplastificante (SP) foi possível contrariar, em parte, a forte exigência de água do CR, atingindo-se betões de consistência próxima da do betão de referência com CEM I.

Confirma-se um ligeiro aumento do teor de vazios nos betões com CR, resultante da menor trabalhabilidade e maior dificuldade de compactação. Os cimentos reciclados utilizados manifestaram adequada capacidade de hidratação, semelhante à observada no CEM I, permitindo atingir resistências mecânicas elevadas desde as idades iniciais. Porém, face ao betão com CEM I, a redução de resistência à compressão foi de cerca de 25% aos 28 dias. Ainda assim, apesar de esta redução ter sido superior ao observado em outros trabalhos no âmbito do projeto *EcoHydB*, foi possível atingir um betão estrutural de classe C20/25 fabricado apenas com CRP.

A utilização de água gelada melhorou o controlo da trabalhabilidade dos betões com CRP, permitindo produzir misturas de igual a/l e teor de ligante, sem consequências significativas no

desenvolvimento das propriedades mecânicas analisadas. Em particular, teve um efeito benéfico na variação dimensional dos betões sujeitos à ação diferida de retração.

Em geral, o tipo de ligante teve a mesma influência na resistência à compressão e à tração por compressão diametral. No entanto, a redução de resistência à tração face ao betão com CEM I foi superior (35%), devido à influência adicional do aumento de teor de pasta nos betões com CR. A aplicação da equação sugerida na NP EN 1992-1-1 (2010) conduziu estimativas conservativas da resistência à tração, independentemente do tipo de ligante e agregado. A menor das partículas de CR e o maior volume de pasta conduziram a reduções de 25% no módulo de elasticidade e 17% na velocidade de propagação de ultrassons dos betões com 100% CRP. Mais uma vez, a equação sugerida na NP EN 1992-1-1 (2010) conduziu a estimativas conservativas do módulo de elasticidade, independentemente do tipo de ligante. Verificou-se que a equação sugerida por Bogas (2013), permitindo estimar a resistência à compressão em função da velocidade de propagação de ultrassons, foi igualmente adequada para betões com incorporação de CR e agregado reciclado.

A variação dimensional dos betões face às ações diferidas de retração e fluência foi significativamente afetada pela incorporação de CR. Após 120 dias de idade, foram obtidas retrações 80% superiores à dos betões de referência com CEM I. Esta diferença foi reduzida para 50% quando se conseguiu que o teor de ligante do betão com CR fosse idêntico ao de referência com CEM I. Por sua vez, a extensão de fluência após 140 dias foi 2,2 vezes mais elevada nestes betões, embora o coeficiente de fluência se tenha traduzido num aumento inferior a 70%. Desse modo, a maior retração e fluência são dois fatores a ter em consideração na produção futura de betões com ligante reciclado. Desse modo, é importante explorar estratégias para a redução da exigência de água e do teor de ligante nestes betões, até num sentido de melhorar a sua ecoeficiência. Para as composições analisadas no presente trabalho, associadas a elevado a/l , a incorporação de CR não afetou o desenvolvimento de retração autogénea.

Neste trabalho, foi possível produzir cimento reciclado separado de betão (CRB) com 74% de pureza. Isso foi possível devido à utilização de um método de separação inovador desenvolvido no âmbito do projeto *EcoHydB*. A contaminação do CRB com 26% de agregado de reduzida porosidade e absorção teve uma ação positiva na exigência de água e trabalhabilidade, permitindo a produção de betões de menor a/c ou a consideração de dosagens de SP bastante inferiores à utilizada no CRP. Este betão, associado a menor a/c equivalente, revelou resistência à compressão 70% inferior à do betão de referência com CEM I. Esta redução pode ser parcialmente compensada com a incorporação da fração inerte do ligante diretamente no agregado fino. No entanto, a retração foi equivalente à do

betão com 100% CRP, visto que o seu maior a/c foi compensado pelo menor teor de ligante e maior volume de partículas inertes.

A utilização de agregados britados de betão (ARB) ou areias resultantes da separação do betão (AS) conduziu a reduções importantes da trabalhabilidade do betão. No entanto, os agregados reciclados tratados termicamente (ART), associados a forma arredondada, não afetaram esta propriedade. O método de separação idealizado foi efetivo na redução do teor de pasta aderida na AS, o que permitiu a produção de betões de maior massa volúmica e melhores propriedades mecânicas do que com areias recicladas de betão. Este agregado AS contribuiu ainda para um melhor controlo da retração do betão, não se verificando diferenças significativas face ao betão de referência com areias naturais. O tratamento térmico do agregado conduziu apenas a uma ligeira redução do teor de pasta aderida no agregado, afetando de forma pouco significativa as propriedades dos betões. Uma razão para esta menor eficiência dos ART resultou de neste trabalho não se ter eliminado a fração fina abaixo de 1mm. É necessário otimizar a temperatura de tratamento e remover a fração fina de agregado para que se possa justificar a implementação deste tipo de pré-tratamento.

O agregado reciclado provocou uma redução de até 20% na resistência à compressão, 25% na resistência à tração por compressão diametral e 15% na velocidade de propagação de ultrassons. Por sua vez, a retração por secagem sofreu um aumento de cerca de 25%. Os betões com agregados reciclados manifestaram ainda maiores tempos de secagem, resultante da água extra inicialmente absorvida pelos seus agregados.

Desenvolveu-se um betão 100% reciclado, com incorporação simultânea de agregado grosso e fino reciclado, bem como cimento reciclado de pasta (CRP). Apesar de o CRP utilizado nestes betões ter manifestado menor reatividade, devido a possíveis fenómenos de pré-hidratação e pré-carbonatação, foi possível atingir um betão de características estruturais com elevada capacidade de hidratação, atingindo 21 MPa de resistência média à compressão aos 28 dias. A redução geral no desempenho destes betões para as várias propriedades analisadas esteve de acordo com os resultados observados para a influência separada da incorporação de CR ou agregados reciclados. Destaca-se o desenvolvimento de retrações mais de duas vezes superiores à do betão de referência RI65. Pela primeira vez no âmbito do projeto *EcoHydB* foi possível produzir um betão totalmente reciclado, abrindo as portas a uma nova geração de betões de elevada sustentabilidade. Salienta-se o facto da areia reciclada AS, utilizada nestes betões não ter afetado negativamente as suas propriedades analisadas neste estudo.

Em geral, os resultados deste trabalho demonstram a viabilidade da utilização de CR em alternativa ao CEM I, bem como de AS em alternativa a areia natural, caminhando-se para soluções de maior ecoeficiência e circularidade.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dado o tema estar numa fase inicial, em que os estudos neste domínio ainda se encontram numa fase muito preliminar e pouco desenvolvida, e perante os resultados promissores obtidos no presente trabalho, sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros:

- Desenvolvimento de betões totalmente reciclados a partir de frações cimentícias e agregados de elevada qualidade diretamente recuperados da separação de resíduos de betão;
- Caracterização detalhada do comportamento de betões totalmente reciclados, estendendo o seu estudo à análise da sua durabilidade;
- Explorar soluções que visem contornar a elevada exigência de água do CR e o requerimento de maiores teores de ligante nos betões com ele produzidos;
- Análise da viabilidade económica e ambiental de se produzirem betões totalmente reciclados;
- Otimização dos processos de tratamento dos resíduos de construção e demolição, visando a obtenção de frações cimentícias e agregados de elevada pureza, tendo em consideração rendimentos razoáveis de separação;
- Extensão dos estudos de retração e fluência a betões de totalmente reciclados de diferentes composições.

REFERÊNCIAS

- Agência Europeia do Ambiente. (2008). *Effectiveness of Environmental Taxes and Charges for Managing Sand, Gravel and Rock Extraction in Selected EU Countries*.
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Zhang, M. H., Tam, C. T., & Foo, T. W. J. (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3469–3479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038>
- al Ajmani, H., Suleiman, F., Abuzayed, I., & Tamimi, A. (2019). *Evaluation of Concrete Strength Made with Recycled Aggregate*. <https://doi.org/10.3390/buildings9030056>
- André Martins Estanqueiro, B., Presidente, J., Domingos Ribeiro da Cunha Marques Orientador, R., Manuel Calião Lopes de Brito Coorientador, J., Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro Vogais, M., & Dinis Silvestre Fernando Henrique de Carvalho Cruz, J. (2012). *Análise de ciclo de vida da utilização de agregados reciclados no fabrico de betão Engenharia e Gestão Industrial*.
- Angulo, S. C., Guilge, M. S., Quarcioni, V. A., Baldusco, R., & Cincotto, M. A. (2015). Rehydration of cement fines: a Tg/calorimetry study. *III Prog. Recycl Built Environ.*, 222–229. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082827662&partnerID=40&md5=c7570a659a8028a071e27631bea085b3>
- Assi, L., Carter, K., Deaver, E. (Eddie), Anay, R., & Ziehl, P. (2018). Sustainable concrete: Building a greener future. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1641–1651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>
- Baldusco, R., Nobre, T. R. S., Angulo, S. C., Quarcioni, V. A., & Cincotto, M. A. (2019). Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725)
- Bandeira, J. (2020). *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado*. Instituto Superior Técnico.
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47(6), 1055–1065. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 51, pp. 142–161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Bogas, A. J. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida* [Doutoramento]. Instituto Superior Técnico.
- Bogas, J. A. , P. M. F. C. , G. A. M. , C. A. , H. S. , S. R. (2020). *Processo de separação dos componentes de resíduos de betão endurecido para obtenção de cimento reciclado* (Patent No. A116130).
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>

- Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022). Durability of concrete produced with recycled cement from waste concrete. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.280>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106226>
- Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, 53(5), 962–972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- Bogas, J. A., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104405.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2018). Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. *Construction and Building Materials*, 168, 818–830.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176>
- Bruno Guilherme Guimarães Pais de Carvalho. (2021). *Caracterização mecânica de betões produzidos com cimento reciclado*. Instituto Superior Técnico.
- Bun, P., Cyr, M., Lanieste, P., Bun, K. N., & Idir, R. (2022). Concrete made of 100% recycled materials - Feasibility study. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106199>
- Cantero, B., Bravo, M., de Brito, J., Sáez del Bosque, I. F., & Medina, C. (2020). Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122913.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122913>
- Cardoso, R., Silva, R. V., Brito, J. de, & Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, 131–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. *Construction and Building Materials*, 250, 118873.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hu, S., Real, S., & Costa Pereira, M. F. (2021). Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127375.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>
- Carriço, A., Real, S., & Bogas, J. A. (2021). Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104270.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>

- Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Costa Pereira, M. F. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, 256, 119502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Carrico, A., Real, S., Bogas, J., & Pereira, M. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, 256, 119502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Chi, J. M., Huang, R., Yang, C. C., & Chang, J. J. (2003). Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 197–205. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00020-3)
- Comissão Europeia. (2012). *Comissão Europeia Bruxelas*.
- de Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- Instrucción de hormigón estructural, (2008).
- Etxeberria, M., Marí, A. R., & Vázquez, E. (2007a). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40(5), 529–541. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007b). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- EN 1992. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, (2016).
- Eurostat. (2021). *Generation of waste by economic*.
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- Evangelista, L., Guedes, M., de Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, 86, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>
- Fan, C.-C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S.-J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- Florea, M. V. A., Ning, Z., & Brouwers, H. J. H. (2014). Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. *Construction and Building Materials*, 50, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.012>
- Gallagher, L. P. P. (2019). *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*.

- Gebremariam, A. T., di Maio, F., Vahidi, A., & Rem, P. (2020). Innovative technologies for recycling End-of-Life concrete waste in the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 104911. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104911>
- Grabiec, A. M., Zawal, D., & Rasaq, W. A. (n.d.). *The Effect of Curing Conditions on Selected Properties of Recycled Aggregate Concrete*. <https://doi.org/10.3390/app10134441>
- Houst, Y. F. (1997). Carbonation shrinkage of hydrated cement paste. *Proc. 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*.
- Juan-Valdés, A., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., Sánchez de Rojas Gómez, M. I., Ignacio Guerra-Romero, M., de Belie, N., & Morán-del Pozo, J. M. (2021). Mechanical and microstructural properties of recycled concretes mixed with ceramic recycled cement and secondary recycled aggregates. A viable option for future concrete. *Construction and Building Materials*, 270, 121455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121455>
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763–769. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- Klieger, P. (1994). *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (Vol. 169). ASTM International.
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, 83, 174–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>
- Lee, C.-H., Du, J.-C., & Shen, D.-H. (2012). Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 28(1), 66–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.025>
- Lei, Y., Zhang, Q., Nielsen, C., & He, K. (2011). An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. *Atmospheric Environment*, 45(1), 147–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.034>
- Letelier, V., Tarela, E., Muñoz, P., & Moriconi, G. (2017). Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 132, 365–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>
- Li, S., Li, Q., Zhao, X., Luo, J., Gao, S., Yue, G., & Su, D. (2019). Experimental Study on the Preparation of Recycled Admixtures by Using Construction and Demolition Waste. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 1678, 12(10), 1678. <https://doi.org/10.3390/MA12101678>
- Mehta, P. K. M. P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2001). *CONCRETE Microstructure, Properties and Materials*.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>

- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1(1), 69–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Neville, A. M. (1983). *Creep of plain and structural concrete*.
- Nguyen, H.-A., Chang, T.-P., Chen, C.-T., & Huang, T.-Y. (2022). Engineering and creep performances of green super-sulfated cement concretes using circulating fluidized bed combustion fly ash. *Construction and Building Materials*, 346, 128274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128274>
- Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., & Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 201, 110–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407–415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>
- Raman, J. V. M., & Ramasamy, V. (2021). Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6356–6363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>
- Real, S., Alexandre Bogas, J., Carriço, A., Hu, S., & Bernardo, A. (2021). *Mechanical Characterisation and Shrinkage of Thermoactivated Recycled Cement Concrete*. <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). *materials Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement*. <https://doi.org/10.3390/ma13183937>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 64, 16–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 531–537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., & Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1723–1729. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012>
- Silva, R. v, de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Comparative analysis of existing prediction models on the creep behaviour of recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, 100, 31–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.004>

- S.K., K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089>
- Susana Hu. (2019). *Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados*. Instituto Superior Técnico.
- T. Yamato, Y. E. and M. S. (1998). v. *ACI Symposium Publication*, 179. <https://doi.org/10.14359/6034>
- Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2021). Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted. *Construction and Building Materials*, 288, 123066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123066>
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012>
- Tang, Y., Xiao, J., Zhang, H., Duan, Z., & Xia, B. (2022). Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 323, 126546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126546>
- Topçu, ilker B., & Günçan, N. F. (1995). Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1385–1390. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00131-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00131-U)
- UEPG. (2020). *Annual Review 2019 - 2020*.
- UN. (2010). *UN Environment Programme*.
- Vieira, G. L., Schiavon, J. Z., Borges, P. M., da Silva, S. R., & de Oliveira Andrade, J. J. (2020). influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122665>
- Vyšvařil, M., Bayer, P., Chromá, M., & Rovnaníková, P. (2014). Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 54, 413–420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>
- Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- WBCSD. (2009). *Carbon emissions reductions up to 2050*.
- Xiao, J., Li, J., & Zhang, Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187–1194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>
- Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2011). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *FIRE AND MATERIALS Fire Mater*, 35, 481–490. <https://doi.org/10.1002/fam.1067>

- Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 49, 841–851. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>
- Zhang, H., Wang, Y., Lehman, D. E., Geng, Y., & Kuder, K. (2020). Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103426>
- Zhang, H., Xiao, J., Tang, Y., Duan, Z., & Poon, C. (2022). Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104527>
- Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Gao, F., & Dong, Z. (2019). Effect of borax on early hydration and rheological properties of reactivated cementitious material. *https://Doi.Org/10.1680/Jadcr.18.00051*, 31(5), 235–242. <https://doi.org/10.1680/JADCR.18.00051>
- Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Li, J., & Hu, Y. (2018). Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 525–534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>
- Zheng, L., Wu, H., Zhang, H., Duan, H., Wang, J., Jiang, W., Dong, B., Liu, G., Zuo, J., & Song, Q. (2017). Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construction and Building Materials*, 136, 405–413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>

DOCUMENTOS NORMATIVOS

- NP EN 206:2013+A1. Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2017.
- EN 1992-1-1 (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for standardization (CEN)
- LNEC E 397 (1993): Módulo de elasticidade em compressão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
- LNEC E 398 (1993): Betões – Determinação da retração e da expansão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
- NP EN 197-1 (2012): Cimento – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 933-11 (2011): Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Ensaio para classificação dos constituintes de agregados reciclados. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 1097-6 (2016): Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12350-6 (2009): Ensaio do betão fresco – Massa volúmica. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12350-2 (2009): Ensaio do betão fresco – Ensaio de abaixamento. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12390-3 (2011): Ensaio do betão endurecido – Resistência à compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12390-6 (2011): Ensaio do betão endurecido – Resistência à tração por compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12390-7 (2009): Ensaio do betão endurecido – Massa volúmica do betão endurecido. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12504-4 (2007): Ensaio do betão nas estruturas – Determinação da velocidade de propagação dos 82 ultrassons. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

NP EN 12620:2002 + A1:2010. Agregados para Betão. Instituto Português de Qualidade. (2010).

ANEXOS

ANEXO 1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela A1 - Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 28 e 90 dias para as diferentes misturas

Composição	Provete	3 dias		28 dias		90 dias	
		fc (MPa)	fcm (MPa)	fc (MPa)	fcm (MPa)	fc (MPa)	fcm (MPa)
R I 65	1	21,8		34,6		39,3	
	2	22,3	22,6	36,4	36,4	40,0	40,1
	3	23,6		38,2		41,1	
R I 70	1	18,9		33,3		36,7	
	2	19,3	19,2	29,9	31,6	34,2	35,3
	3	19,5		31,7		35,1	
R P 65	1	20,2		27,6		29,4	
	2	19,5	19,9	26,8	27,1	31,2	30,5
	3	20,0		27,0		30,9	
R P 70	1	18,0		23,2		28,1	
	2	17,9	17,9	24,4	24,3	28,6	28,3
	3	17,6		25,2		28,3	
R P 70	1	-		22,9		-	
	2	-	-	25,5	24,9	-	-
	3	-		26,2		-	
R C 65	1	5,2		10,6		-	
	2	4,9	5,1	10,6	10,9	-	-
	3	5,2		11,4		-	
AB I 65	1	24,4	24,2	34,0		39,8	
	2	23,4		35,6	35,0	40,3	40,0
	3	24,7		35,3		40,0	

Tabela A2 - Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 28 e 90 dias para as diferentes misturas (continuação)

Composição	Provete	3 dias		28 dias		90 dias	
		fc (MPa)	fcm (MPa)	fc (MPa)	fcm (MPa)	fc (MPa)	fcm (MPa)
AS I 65	1	24,2		35,9		39,7	
	2	23,6	23,8	37,1	36,2	40,5	36,7
	3	23,6		35,6		30,0	
ARB I 65	1	18,9		32,5		30,1	
	2	19,2	19,0	27,5	29,8	31,4	32,2
	3	18,9		29,5		35,1	
ARB + AS P 65	1	14,5		21,6		23,7	
	2	15,6	15,0	19,7	20,8	24,2	24,0
	3	14,8		21,0		24,2	
ART I 65	1	20,3		29,9		36,7	
	2	19,5	19,7	30,1	30,5	35,3	36,2
	3	19,2		31,4		36,6	
R P 65 AG	1	-		25,5		-	
	2	-	-	24,9	26,0	-	-
	3	-		27,5		-	

ANEXO 2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Tabela A3- Valores do ensaio de resistência à tração aos 28 dias para as diferentes misturas

Composição	Provete	fct	fctm	Referência	Composição	Provete	fct	fctm
R I 65	1	3,2		BACR14	AB I 65	1	2,3	
	2	3,0	2,9			2	2,6	2,5
	3	2,6				3	-	
R I 70	1	3,0		BACR15	AS I 65	1	2,4	
	2	2,4	2,5			2	2,3	2,5
	3	2,2				3	2,9	
R P 65	1	1,9		BACR2	ARB I 65	1	2,4	
	2	-	1,9			2	2,7	2,5
	3	-				3	2,3	
R P 70	1	1,8		BACR17	ARB + AS P 65	1	2,0	
	2	1,8	1,9			2	1,6	1,8
	3	2,1				3	-	
AB I 65	1	2,4		BACR18	ART I 65	1	2,0	
	2	-	2,4			2	2,3	2,2
	3	-				3	2,3	

ANEXO 3 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tabela A4- Valores do ensaio do módulo de elasticidade aos 28 dias para misturas de referência, com CRP e com agregados finos reciclados (AB e AS)

Composição	Ec28d (GPa)
R I 65	32,9
R P 65	24,8
AB I 65	27,4
AS I 65	28,9

ANEXO 4 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

Tabela A5- Valores do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons aos 28 dias para as diferentes misturas

Composição	Provete	Vus m/s	Vusm (m/s)	Referência	Composição	Provete	Vus m/s	Vusm (m/s)
R I 65	1	4662	4707	BACR6	R P 70	1	4588	4603
	2	4698				2	4644	
	3	4762				3	4578	
ARB I 65	1	4206	4123	BACR7	R P 65	1	4408	4365
	2	4106				2	4310	
	3	4059				3	4378	
R P 65	1	4447	4487	BACR8	R P 65	1	4434	4407
	2	4473				2	4391	
	3	4541				3	4395	
R P 65	1	4327	4316	BACR9	R I 65	1	4683	4675
	2	4311				2	4808	
	3	4311				3	4535	
R P 70	1	4323	4372	BACR10	R P 65	1	4416	4416
	2	4412				-	-	
	3	4382				-	-	

ANEXO 5– RETRAÇÃO

Secagem

Tabela A6- Valores do ensaio de retração, $ecst(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas

R I 65				R P 65				R P 65 AG				R C 65			
Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Superficial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Superficial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Superficial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6} m/m$)	Superficial ecst ($x10^{-6} m/m$)
2	0,00	0	0	2	0,00	0	0	2	0,00	0	0	2	0,00	0	0
3	-0,39	-28	-22	3	-0,48	-96	-44	3	-0,34	-42	-24	3	-1,64	-35	-32
6	-1,99	-25	-65	6	-2,45	-157	-104	6	-1,70	-109	-92	6	-3,41	-143	-61
8	-2,15	-46	-101	8	-2,67	-199	-157	7	-1,80	-188	-103	8	-3,73	-177	-95
9	-2,21	-77	-113	9	-2,74	-224	-177	10	-2,02	-222	-120	10	-3,94	-186	-108
10	-2,25	-110	-125	10	-2,81	-300	-202	13	-2,17	-262	-128	13	-4,15	-340	-147
13	-2,36	-135	-149	13	-2,95	-315	-256	15	-2,25	-284	-143	15	-4,24	-404	-178
17	-2,47	-242	-180	17	-3,12	-381	-326	17	-2,33	-294	-150	17	-4,34	-437	-199
20	-2,54	-296	-198	20	-3,22	-451	-365	20	-2,42	-348	-168	20	-4,43	-473	-225
22	-2,57	-281	-221	22	-3,27	-453	-403	24	-2,52	-387	-191	22	-4,48	-515	-258
24	-2,60	-294	-233	24	-3,32	-459	-424	27	-2,58	-486	-220	24	-4,53	-574	-283
27	-2,64	-319	-244	27	-3,39	-493	-458	29	-2,63	-491	-231	27	-4,58	-646	-304
30	-2,69	-337	-259	30	-3,47	-543	-499	30	-2,67	-499	-243	30	-4,60	-648	-314
60	-2,97	-432	-326	60	-3,89	-739	-689	60	-2,92	-654	-372	60	-4,72	-832	-428
90	-2,98	-466	-357	90	-3,99	-831	-792	90	-3,18	-742	-431	90	-4,72	-853	-442
120	-3,20	-504	-389	120	-4,30	-915	-889	120	-3,35	-763	-480	120	-4,80	-906	-478

Tabela A7- Valores do ensaio de retração, $ecst(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas (continuação)

ABI65				ASI65				TRP65			
Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Dia	Massa(%)	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)
2	0,00	0	0	2	0,00	0	0	2	0,00	0	0
3	-0,33	-73	-5	3	-0,32	-52	-7	8	-1,89	-219	-181
6	-1,91	-166	-104	6	-1,88	-214	-88	13	-3,16	-295	-192
7	-2,00	-145	-116	7	-1,97	-154	-96	15	-3,35	-340	-253
8	-2,10	-169	-143	8	-2,05	-191	-110	17	-3,47	-411	-285
9	-2,21	-182	-153	9	-2,16	-225	-118	20	-3,58	-435	-324
13	-2,53	-268	-229	13	-2,45	-311	-173	22	-3,64	-526	-361
15	-2,64	-273	-252	15	-2,57	-270	-183	24	-3,71	-563	-391
17	-2,76	-351	-275	17	-2,66	-344	-201	27	-3,82	-603	-430
20	-2,92	-366	-309	20	-2,74	-363	-225	36	-4,07	-776	-544
22	-3,00	-380	-336	22	-2,86	-359	-244	41	-4,18	-750	-612
27	-3,07	-391	-357	27	-2,92	-361	-256	45	-4,23	-811	-647
30	-3,08	-429	-368	30	-2,94	-414	-271	30	-4,07	-776	-544
60	-3,39	-547	-486	60	-3,19	-497	-342	60	-4,43	-899	-750
90	-3,50	-562	-520	90	-3,29	-489	-366	90	-4,70	-1083	-909
120	-3,56	-604	-547	120	-3,33	-514	-386	120	-4,78	-1155	-1014

Autogénea

Tabela A8- Valores do ensaio de retração, $ec_{st}(x10^{-6}m/m)$, para as diferentes misturas (continuação)

RI 65			RP 65			ABI 65			ASI 65		
Dia	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Dia	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Dia	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Dia	Axial ecst ($x10^{-6}$ m/m)	Superficial ecst ($x10^{-6}$ m/m)
2	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
3	-28	-54	3	-20	-36	3	-43	1	3	-33	-2
6	-51	-66	6	-25	-34	6	-57	-13	6	-91	-26
8	11	-31	8	6	-26	7	8	-22	7	-12	-26
9	21	-27	9	11	-55	9	-12	-22	9	-210	-31
10	14	-28	10	5	-55	13	-65	-38	13	-249	-38
13	14	-29	13	-9	-31	15	-20	-39	15	-175	-38
17	-46	-13	17	-7	-46	17	-159	-40	17	-180	-39
20	-9	-12	20	-27	-48	20	-51	-42	20	-223	-41
22	-25	-12	22	-41	-53	22	-6	-57	22	-204	-47
24	-2	-31	24	-25	-65	24	-45	-63	24	-237	-54
27	7	-27	27	-23	-48	27	-48	-66	27	-201	-54
30	-5	-28	30	-45	-47	30	-65	-66	31	-253	-59