

# **Caracterização mecânica de betões produzidos com cimento reciclado**

**Bruno Guilherme Guimarães Pais de Carvalho**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores:

Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Doutora Sofia Alexandra de Carvalho Ferreira Real

### **Júri**

Presidente: Professora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Orientador: Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Augusto Martins Gomes

**Janeiro de 2021**



## **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 de betões produzidos com cimento reciclado**

**Bruno Guilherme Guimarães Pais de Carvalho**

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

---

Com esta dissertação termino assim um percurso muito especial de 5 anos pelo Instituto Superior Técnico. Aqui agradeço a todos os tiveram contribuição, desde a menor à mais significativa. Todos foram imensamente importantes no meu desenvolvimento académico, profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Bogas pela pura demonstração de *hardwork* aliada ao melhor sentido de humor. Guardarei as melhores lembranças como meu professor, orientador e amigo.

À investigadora Sofia Real, pela orientação e paciência ao longo deste trabalho, tentando sempre mostrar que tudo é possível com dedicação.

À investigadora Ana Chambel Carriço por todo o acompanhamento e apoio disponibilizado e um agradecimento especial à Susana Hu, pela ajuda e pela constante disponibilidade.

Ao Professor Manuel Francisco Costa Pereira, pelo auxílio na realização dos ensaios de DRX e na produção de cimento reciclado.

Aos técnicos de laboratório, Pedro Costa, Francisco Baptista e Jorge Pontes pela ajuda em todo o manuseamento de máquinas e ferramentas, imprescindíveis no decorrer deste trabalho.

Ao meu colega e amigo Daniel Leal, ao qual expresso o mais sincero agradecimento pela constante motivação e espírito de equipa. Só ele sabe o esforço que esta dissertação acarreta.

Aos meus pais e família, a minha profunda e sincera gratidão pelo amor e apoio contínuo e incomparável, sem eles nada seria possível. E claro, com especial carinho pelo meu irmão, ao qual cedo o primeiro lugar na corrida pelo pronome de mestre.

À minha namorada, Filipa Baguinho, por ver sempre o valor que há em mim, mostrando-me o caminho, mesmo nos dias mais tempestuosos. Ela é a minha melhor motivação, exibindo sempre o quão orgulhosa está de mim.

Aos meus amigos Alexandre Ramos, Dércio Caupers e Miguel Silva por terem partilhado este percurso comigo, fazendo de cada dia um dia para relembrar. Deles tentei retirar as melhores características, metódico, descontraído e sonhador.



## RESUMO

---

Nos dias de hoje, a indústria da construção e as várias atividades inerentes, como a extração e processamento de matérias-primas ou o transporte de materiais, exercem uma elevada pressão sobre o ambiente. Nesta indústria, o betão é o material mais utilizado, resultado da sua versatilidade, baixo custo e facilidade de produção. Entre os principais constituintes do betão, a produção de cimento tem o maior impacto ambiental, sendo responsável por cerca de 25 a 27% das emissões industriais totais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou 5 a 7% das emissões globais. Neste sentido, ao longo da última década, diversos estudos foram publicados visando a utilização de cimento reciclado (CR) como substituto do cimento Portland, essencialmente cingido à sua incorporação em pastas e argamassas.

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo da influência da incorporação de diferentes teores de cimento reciclado (CR) no comportamento mecânico e retração do betão. Foram realizados ensaios de abaixamento, massa volúmica, resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade, velocidade de ultrassons e retração. Os betões foram analisados para CR obtido a partir de betão ou de pastas de diferente compacidade, tendo em conta diferentes teores de CR (5 a 100%) e diferente *a/l* (0,35 a 0,65), bem como a incorporação de outras adições minerais correntes (cinza volante e vários tipos de *filler*), de forma isolada ou em misturas ternárias com o CR.

Em geral, o CR demonstrou elevado potencial como substituto do cimento na produção de betão estrutural, conduzindo a variações pouco significativas de resistência mecânica e retração, mesmo considerando elevados teores de CR. A maior exigência de água obriga à consideração de elevadas dosagens de superplastificante, sendo o principal obstáculo à incorporação de mais de 15% CR. Para 5 a 40% CR, produziram-se betões C35/45 a C70/85, de melhor desempenho mecânico e menor retração do que os betões com igual teor de outras adições correntes. Foi possível produzir cimento reciclado a partir de betão, utilizando uma metodologia nova de separação desenvolvida no IST. Os betões com até 30% deste ligante apresentaram resistência mecânica e retração comparável à dos betões com igual teor de CR proveniente de pasta. O tratamento térmico adicional dos agregados reciclados foi efetivo na melhoria de todas as propriedades analisadas neste trabalho.

**Palavras-chave:** Cimento reciclado; Betão com cimento reciclado; Velocidade de ultra-sons; Caracterização mecânica; Módulo de elasticidade; Retração.

## ABSTRACT

---

Nowadays, the construction industry and its inherent activities, such as the extraction and processing of raw materials or transport of such, exert a high pressure on the environment. In this industry, concrete is the most used material, given its versatility, low cost and ease of production. Among the main constituents of concrete, cement production has the greatest environmental impact, accounting for about 25 to 27% of total industrial emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) or 5 to 7% of global emissions. In this sense, over the last decade, several studies have been published proposing the use of recycled cement (RC) as a substitute for Portland cement, essentially limited to its incorporation into pastes and mortars.

The present work aims to study the influence of the incorporation of recycled cement (RC) in the mechanical behavior and shrinkage of concrete. Workability, density, compressive and tensile splitting strength, modulus of elasticity, ultrasound speed and retraction were tested. Concretes were analyzed for RC obtained from concrete or pastes of different w/b, taking into account different RC contents (5 to 100%) and different w/b (0.35 to 0.65), as well as the incorporation of other mineral additions (fly ash and various types of filler), either alone or in ternary mixtures with the RC.

In essence, the RC demonstrated high potential as a substitute for cement in the production of structural concrete, demonstrating insignificant variations in mechanical strength and shrinkage, even when high levels of RC were incorporated. The greater demand for water requires the consideration of high dosages of superplasticizer, this being the main obstacle to the incorporation of more than 15% RC. For 5 to 40% RC, C35/45 to C70/85 concrete was produced, with better mechanical performance and less shrinkage than concrete with the same content with other additions. It was possible to produce recycled cement from concrete using a new separation methodology developed at IST. Furthermore, concrete with up to 30% of this binder revealed mechanical strength and shrinkage comparable to that of concrete with the same content of RC from cement paste. The additional heat treatment of the recycled aggregates was effective in improving all the properties analyzed in this work.

**Keywords:** Recycled cement; Recycled cement concrete; Ultrasonic pulse velocity; Mechanical characterization; Modulus of elasticity; Shrinkage.

# ÍNDICE GERAL

---

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivação .....	1
1.2 Objetivos e metodologias .....	2
1.3 Organização do trabalho .....	3
<b>2. Estado da arte</b> .....	<b>4</b>
2.1 Impactos ambientais do betão .....	4
2.2 Soluções no âmbito da reciclagem de betão .....	5
2.3 Termoativação de materiais cimentícios.....	7
2.3.1 Primeiros avanços na reativação do betão endurecido .....	7
2.3.2 Produção de cimento reciclado .....	7
2.3.3 Propriedades no estado fresco e endurecido de pastas com cimento reciclado .....	11
2.4 Argamassas e betões com incorporação de cimentos reciclados.....	15
<b>3. Campanha Experimental</b> .....	<b>17</b>
3.1 Considerações Iniciais .....	17
3.2 Produção de Cimento Reciclado.....	17
3.2.1 Pasta de Origem .....	17
3.2.2 Britagem .....	19
3.2.3 Moagem .....	20
3.2.4 Peneiração .....	21
3.2.5 Termoativação.....	21
3.3 Produção e Caracterização de Agregado Reciclado .....	22
3.3.1 Produção do betão de origem.....	22
3.3.2 Caracterização do Betão de Origem.....	24
3.3.3 Agregado reciclado britado (ARB) .....	25
3.3.4 Agregado reciclado tratado termicamente (ART) .....	25
3.4 Produção de betão .....	28
3.4.1 Materiais.....	29

3.4.2	Composições.....	33
3.4.3	Produção e cura dos provetes .....	35
3.5	Caracterização de betão no estado fresco .....	36
3.5.1	Trabalhabilidade do betão.....	36
3.5.2	Massa volúmica fresca.....	37
3.6	Caracterização do betão no estado endurecido .....	37
3.6.1	Massa volúmica seca .....	37
3.6.2	Velocidade de propagação de ultrassons .....	38
3.6.3	Retração e resistência à compressão.....	38
3.6.4	Resistência à tração por compressão diametral .....	39
3.6.5	Módulo de elasticidade .....	40
<b>4.</b>	<b>Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>41</b>
4.1	Caracterização do betão no estado fresco .....	43
4.1.1	Trabalhabilidade.....	43
4.1.2	Massa volúmica fresca.....	47
4.2	Caracterização de betão no estado endurecido .....	50
4.2.1	Massa volúmica seca .....	50
4.2.2	Resistência à compressão .....	53
4.2.3	Resistência à tração.....	59
4.2.4	Módulo de elasticidade .....	63
4.2.5	Velocidade de ultrassons .....	65
4.2.6	Retração.....	69
<b>5.</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>77</b>
5.1	Considerações finais.....	77
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	80
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>81</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>89</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 - Produção do cimento reciclado.....	8
Figura 2.2 – Necessidade de água em função da temperatura de tratamento.....	12
Figura 2.3 – Tempo de presa em relação à temperatura de tratamento .....	12
Figura 2.4 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da temperatura de tratamento (°C) ..	14
Figura 3.1 - Britadeira de maxilas utilizada .....	19
Figura 3.2 - a) Abertura da maxila da britadeira b) Partículas após primeira fase de britagem .....	19
Figura 3.3 – a) Britadeira de Maxilas presente no GEOLAB b) Partículas após segunda fase de britagem .....	20
Figura 3.4 – a) Moinho de rolos lisos presente no GEOLAB b) Partículas após terceira fase de britagem .....	20
Figura 3.5 - Moinho de Bolas .....	21
Figura 3.6 - Forno elétrico rotativo ThermoLab Scientific Equipments .....	22
Figura 3.7 - Granulometria dos agregados naturais utilizados .....	23
Figura 3.8 - Betoneira utilizada para produção de betão .....	24
Figura 3.9 - Forno Horizontal utilizado .....	26
Figura 3.10 – Curva térmica de tratamento do agregado, monitorizada por termopares, associados a um equipamento Delta-T Data-Logger, posicionados em vários locais diferentes do forno .....	26
Figura 3.11 - Curvas granulométricas das adições utilizadas.....	29
Figura 3.12 - Curva Granulométrica dos cimentos utilizados .....	31
Figura 3.13 - Análises DRX realizadas para os materiais CEM I, NT, CRP (P) e CRC (C). .....	31
Figura 3.14 – Análises TG efetuadas para CEM I, NT, P e CC .....	32
Figura 3.15 - Resistências de pastas com cimentos CEM I, C, P e S, com diferentes relações a/l....	33
Figura 3.16- Ensaio de abaixamento segundo NP EN 1 2350-2 .....	37
Figura 3.17 - Pesagem hidrostática.....	38
Figura 3.18 - Equipamento de medição de velocidade de propagação de ultrassons .....	38
Figura 3.19 - Equipamento de medição Mitutoyo em ensaio de retração.....	39
Figura 3.20 – a) Prensa TONI PACT 3000 b) Provete após ensaio de compressão .....	39
Figura 3.21 – Ensaio à tração por compressão diametral .....	40
Figura 3.22 – a) Prensa INSTRON b) Estrutura utilizada com transdutores de deslocamento .....	40
Figura 4.1 – Trabalhabilidade das misturas com P .....	44
Figura 4.2 – Trabalhabilidade do betão 15P65 ao longo do tempo .....	44
Figura 4.3 – Trabalhabilidade de betões com diferentes tipos de cimento.....	45
Figura 4.4 - Trabalhabilidade das misturas com adições CZ, FC e CRP .....	45
Figura 4.5 - Trabalhabilidade das misturas com fillers NT, FB e FC .....	46

Figura 4.6 - Trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados ARB e ART .....	47
Figura 4.7 - Massa volúmica fresca, para a/l de 0,35, 0,55 e 0,65, em função da incorporação de CRP .....	47
Figura 4.8 - Massa volúmica fresca em função da percentagem de incorporação de diferentes cimentos .....	48
Figura 4.9 - Massa volúmica fresca em função da incorporação de CRP, CZ e FC .....	49
Figura 4.10 - Massa volúmica fresca em função de incorporação de CRP, NT e FB .....	49
Figura 4.11 - Massa volúmica fresca dos betões com agregados reciclados ARB e ART .....	50
Figura 4.12 - Massa volúmica seca em função da incorporação de CRP .....	51
Figura 4.13 - Massa volúmica seca em função do tipo de cimento .....	51
Figura 4.14 - Massa volúmica seca em função da incorporação de adições CZ e FC.....	52
Figura 4.15 - Massa volúmica seca em função da incorporação das adições NT, FB e FC .....	52
Figura 4.16 - Massa volúmica seca em betões com agregado ARB e ART .....	52
Figura 4.17 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da incorporação de CR e a/l. ....	53
Figura 4.18 – Resistência à compressão, ao longo do tempo, de betões com a/l 0,55 e incorporação de CRP.....	53
Figura 4.19 - Resistência à compressão para misturas de igual trabalhabilidade.....	55
Figura 4.20 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em função do tipo de cimento .....	56
Figura 4.21 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em função da massa volúmica seca .	56
Figura 4.22 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade das misturas com adições CZ e FC ..	57
Figura 4.23 - Resistência à compressão em função das adições CZ e FC .....	57
Figura 4.24 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade dos betões com FB, NT e CRP.....	58
Figura 4.25 - Resistência à compressão em função das adições FB, NT e CRP, ao longo do tempo	58
Figura 4.26 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do agregado e incorporação de CRP .....	58
Figura 4.27 - Resistência à tração aos 28 dias em função da percentagem de incorporação de CRP .....	60
Figura 4.28 - Resistência à tração aos 28 dias em função do tipo de cimento .....	61
Figura 4.29 - Resistência à tração aos 28 dias em função da incorporação de adições CZ, FC e CRP .....	62
Figura 4.30 - Resistência à tração aos 28 dias em função da incorporação de adições FB, NT e CRP .....	62
Figura 4.31 – Comparação entre os resultados experimentais de resistência à tração aos 28 dias de idade e valores estimados pela EN 1992-1 (2004).....	63
Figura 4.32 - Módulo de elasticidade aos 28 dias, para a/l=0,55, em função da percentagem de incorporação de CRP e CRS .....	64

Figura 4.33 - Módulo de elasticidade aos 28 dias, $E_{cm,28d}$ , do betão com $a/l$ de 0,55 e diferentes percentagens incorporação de CRP e valores estimados pela EN 1992-1 (2004) .....	64
Figura 4.34 - Módulo de elasticidade aos 28 dias, para $a/l=0,55$ em função da incorporação de adições CZ, FC e CRP .....	65
Figura 4.35 - Velocidade de propagação de ultrassons em função da incorporação de CRP .....	66
Figura 4.36 - Velocidade de propagação de ultrassons para betões com cimentos CRP, CRC e CRS .....	67
Figura 4.37 - Velocidade de propagação de ultrassons em betões com adições CZ e FC .....	68
Figura 4.38 - Velocidade de propagação de ultrassons em betões com adições FB e NT .....	68
Figura 4.39 - Velocidade de propagação de ultrassons de betões com ARB e ART .....	69
Figura 4.40 – Correlação entre $V_{us}$ e a resistência mecânica e massa volúmica .....	69
Figura 4.41 – Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, em função da percentagem de incorporação de CRP .....	70
Figura 4.42 - Retração por secagem de betões com $a/l$ 0,55, para diferentes percentagens de incorporação de CRP entre 0% e 30%. Retração até 7 dias de idade .....	71
Figura 4.43 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,65, em função da percentagem de incorporação de CRP .....	72
Figura 4.44 - Fotografias microscópicas das fissuras observadas no betão 100P65 .....	72
Figura 4.45 - Fotografias microscópicas do betão R65 .....	73
Figura 4.46 - Retração, esct, de betões R55 e 15P62, de mesma trabalhabilidade .....	73
Figura 4.47 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, com 15% incorporação de CRP e CRC .....	74
Figura 4.48 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, com 30% de incorporação de CRP, CRS e CRC .....	74
Figura 4.49 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, com 15% de incorporação de CZ e FC e CRP .....	75
Figura 4.50 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, com 30% de incorporação de CZ e FC e CRP .....	75
Figura 4.51 - Retração, esct, de betões com $a/l$ 0,55, com agregado ARB e ART em função da percentagem de incorporação de CRP .....	76



## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 3.1 - Propriedades do cimento CEM I 42,5 R utilizado .....	18
Tabela 3.2 – Composição e propriedades da Pasta de Origem .....	19
Tabela 3.3 - Propriedades dos Agregados Naturais (AN) utilizados.....	23
Tabela 3.4 - Composição do Betão de Origem .....	24
Tabela 3.5 - Propriedades do Agregado Reciclado Britado (ARB) .....	25
Tabela 3.6 - Propriedades do Agregado Reciclado Tratado Termicamente (ART) .....	27
Tabela 3.7 - Percentagem de volume de pasta estimada no ARB e ART .....	28
Tabela 3.8 - Propriedades das adições utilizadas.....	29
Tabela 3.9 - Características do superplastificante, MasterEase 5025 .....	30
Tabela 3.10 - Propriedades dos materiais cimentícios utilizados .....	30
Tabela 3.11 - Composições utilizadas nas betonagens .....	35
Tabela 3.12 - Tipo de provete e procedimento de cura para os ensaios realizados .....	36
Tabela 4.1 - Tabela dos resultados da campanha experimental .....	42
Tabela A1.1 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias para as misturas de referência, e de incorporação de NT e CRP para diferentes relações a/l.....	90
Tabela A1.2 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias para as misturas com CRS, CRC, e incorporação de CZ, FC e FB para relação a/l de 0,55.....	91
Tabela A1.3 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3 e 28 dias para as misturas de R55D e de ARB e ART para relação a/l de 0,55.....	92
Tabela A2.1 – Valores do ensaio de resistência à tração aos 28 dias para as misturas consideradas.....	93
Tabela A3.1 – Valores do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias para as misturas ensaiadas.....	94
Tabela A4.1 – Valores do ensaio de velocidade de ultrassons aos 28 dias para as misturas consideradas.....	95
Tabela A5.1 – Valores do ensaio de retração, ecst, para as misturas com incorporação de CRP, CRS e CRC com diferentes a/l (x10-6 m/m).....	96
Tabela A5.2 – Valores do ensaio de retração, ecst, para as misturas com adições CZ, FC e CZ e agregados ARB e ART (x10-6 m/m).....	97



# SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

---

## ABREVIATURAS

$\rho$  - Massa volúmica  
AF - Areia fina  
AG - Areia grossa  
AN - Agregados naturais  
AR - Agregado reciclado  
ARB - Agregado reciclado britado  
ART - Agregado reciclado britado tratado termicamente  
CC - Material cimentício de betão com relação a/l de 0,55, sem termoativação  
CR - Cimento reciclado  
CRC - Cimento reciclado proveniente de betão  
CRP - Cimento reciclado de pasta com relação a/l de 0,55  
CRS - Cimento reciclado de pasta com relação a/l de 0,35  
CEM I - Cimento Portland utilizado  
CZ - Cinzas Volantes  
CV - Coeficiente de variação  
DRX - Difração de raios X  
FB - *Filler* de Betão  
FC - *Filler* calcário  
GEOLAB - Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST  
HR - Humidade Relativa  
IST - Instituto Superior Técnico  
LA - Los Angeles  
NT - Material cimentício de pasta com relação a/l de 0,55, sem termoativação  
RCD - Resíduos de construção e demolição  
SP - Superplastificante  
TG - Análise termogravimétrica

## COMPOSTOS QUÍMICOS

$Al_2O_3$  - Alumina  
CH - Hidróxido de cálcio  
CaO - Óxido de cálcio  
 $CO_2$  - Dióxido de carbono  
C-S-H - Hidratos silicato de cálcio  
 $Fe_2O_3$  - Óxido de ferro  
MgO - Óxido de magnésio  
 $SiO_2$  - 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 ultrassons

## UNIDADES

m - Metro  
cm - Centímetro  
mm - Milímetro  
 $\mu m$  - Micrómetro  
h - Hora  
s - Segundo  
min - Minuto  
kg - Kilograma  
g - Grama  
MPa - Megapascal  
GPa - Gigapascal  
 $^{\circ}C$  - Celcius  
L - Litro



# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

A busca por materiais de baixo impacto ambiental e tecnologias que reduzam a pegada de carbono e a energia necessária nunca foi mais intensa que nos dias de hoje. Segundo Mehta (1993), o crescimento populacional, a urbanização crescente, a transformação tecnológica e o seu impacto no meio ambiente estão inquestionavelmente entre as principais forças que estão a moldar o mundo contemporâneo. Ao longo das últimas décadas, estas forças têm-se demonstrado antípodas à sustentabilidade ambiental, pelo que o esforço por uma construção *Eco-Friendly* e sustentável está cada vez mais presente no mundo da construção, tentando assim promover o caminho para um futuro mais consciente a nível ambiental.

É notória a importância da escolha dos materiais na construção nos dias de hoje, especialmente quando todos nós dependemos quase 100% do nosso tempo em edifícios e infraestruturas. Destes elementos, o betão apresenta-se como uma parte essencial de qualquer projeto sendo um dos materiais de construção mais utilizados mundialmente (Gagg, 2014), tornando-se amado pela sua resistência e versatilidade, servindo assim como pilar base da construção moderna.

Segundo Kasuma et al. (2015), os edifícios e infraestruturas são os maiores consumidores de recursos naturais e representam uma proporção muito significativa do consumo de energia e de produção de gases de efeito estufa. Atualmente, os resíduos de construção representam cerca de metade de toda a indústria de resíduos, dos quais quase 65% são resíduos de betão (Kwon, 2015).

No âmbito do reaproveitamento destes resíduos de construção tem-se vindo a analisar as propriedades de agregados reciclados provenientes destes resíduos, face ao aumento da procura de agregados na indústria da construção (Silva et al., 2019). Estas investigações têm sido as principais abordagens da sustentabilidade no setor da construção. O aumento da pressão governamental e a consequente legislação rigorosa e padronização, têm sido os fatores-chave para uma maior proatividade de entidades em relação à construção e demolição (Silva et al., 2017).

No entanto, é um dado adquirido que a produção de cimento está associada à mais alta emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo que se estima que esta indústria gere cerca de 7% de todo o CO<sub>2</sub> libertado mundialmente (Benhelal et al., 2013). Neste sentido, estão-se a desenvolver diversos estudos de investigação para o progresso sustentável do cimento e betões. De modo a reduzir a quantidade de cimento utilizada, e assim produzir um betão ambientalmente mais eficiente, têm sido utilizadas substituições parciais do cimento por subprodutos de outras indústrias (p. e., escórias-de-alto-forno (Vyšvařil et al., 2014) ou cinzas volantes (Herath et al., 2020)).

É por isto necessário adotar políticas de maximização da eficiência energética através de reutilização destes resíduos de demolição para produção de cimento reciclado pelo que existe uma nova corrente de estudos que pretende conceber cimento reciclado que consiga produzir propriedades físicas semelhantes às do cimento Portland corrente. Nos esforços pela caracterização de cimentos reciclados destacam-se os estudos de Alonso e Fernandez (2004), Shui et al. (2009), Xinwei et al. (2010), Wang et al. (2018), Zhang et al. (2018) e Bogas et al. (2019) que investigam a eficiência da incorporação de cimento reciclado em pastas.

Desde o ano de 2016, o Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (IST) tem aprofundado uma investigação com o intuito de caracterizar e encontrar melhores soluções para o cimento reciclado. Assim, a presente dissertação junta-se a esta causa, estando inserida no projecto de investigação FCT PTDC/ECI-COM-28308/2017, denominado de *Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials*, contribuindo para um conhecimento mais integral do cimento reciclado, os seus benefícios, e assim analisar a sua integração em betões. É de notar que este trabalho foi desenvolvido em paralelo com Leal (2021), que efetuou uma análise da durabilidade dos betões considerados nesta dissertação.

## **1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIAS**

Esta dissertação teve como objetivo principal o estudo da influência da incorporação de cimento reciclado no comportamento de betões, com caracterização no estado fresco e endurecido. Foi também estudada a influência do cimento reciclado em betões produzidos com agregados reciclados no âmbito de mostrar o completo potencial deste material na procura de economia circular. Estes betões foram caracterizados no estado fresco em termos de trabalhabilidade e massa volúmica fresca e no estado endurecido em termos de massa volúmica seca, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração.

Numa primeira fase, o trabalho envolveu a produção de cimento reciclado termoativado. Para tal, procedeu-se à produção, britagem e moagem de pasta de cimento a reciclar até obter-se uma granulometria fina, inferiores a 250 $\mu$ m, seguido da termoativação do material cimentício moído, com um tratamento térmico definido no âmbito do projeto FCT em que esta dissertação se insere, com temperatura de patamar de 650°C. Paralelamente foram produzidos agregados reciclados para posterior substituição de agregados naturais em betões. Estes agregados foram obtidos através da britagem de betões armazenados em condições atmosféricas.

Numa segunda fase, procedeu-se à produção de betões com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland corrente por cimento reciclado (entre 5 e 100%), relações água/ligante (0,35, 0,55 e 0,65), agregados (naturais e reciclados) e adições (cinzas volantes, *filler* calcário, *filler* de pasta e *filler* de

betão). De modo a verificar a efetividade do cimento reciclado, foram igualmente produzidos betões de referência com cimento Portland normal e de idênticas composições.

Por fim, procedeu-se à caracterização dos betões produzidos a várias idades, quer no estado fresco (massa volúmica, trabalhabilidade), quer no estado endurecido (resistência mecânica à compressão e à tração, módulo de elasticidade e retração). Este estudo, permitiu a expansão do conhecimento na utilização e viabilidade de cimentos reciclados na produção de betões, visando atingir soluções economicamente e ecologicamente mais eficientes.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório, e uma secção final de Anexos. Estes capítulos encontram-se dispostos da seguinte forma:

No capítulo 2, é apresentado o estado da arte, onde se faz um levantamento dos principais impactes ambientais da indústria do betão, assim como se apresentam as soluções que se têm vindo a desenvolver no âmbito da reciclagem de betão. É também efetuada uma referência ao que já se tem descoberto no domínio do cimento reciclado, as primeiras investigações neste contexto e as metodologias de produção defendidas por diversos autores. Por fim, são apresentados ao leitor os mais relevantes estudos no sector da integração de cimento reciclado em argamassas e betões.

No capítulo 3, são discriminados todos os procedimentos para a realização da campanha experimental, com o objetivo de recolher dados para a caracterização dos betões produzidos com incorporação do cimento termoativado. Aqui pode tomar-se conhecimento de todos os processos seguidos desde a produção e caracterização de cimento reciclado e de agregados reciclados, assim como todos os materiais, composições e os ensaios físicos e mecânicos de caracterização de betões estudados.

No capítulo 4, são apresentados os resultados da campanha experimental realizada e é feita uma análise ao comportamento mecânico dos betões produzidos. É assim estudado o desempenho destes betões tendo em conta a influência dos principais parâmetros das misturas, como a relação água/ligante, o tipo de agregado, o tipo de ligante e sua percentagem de incorporação.

Concluindo, no capítulo 5, são elaboradas as principais conclusões do trabalho que foi desenvolvido e são sugeridas algumas propostas de investigação futuras, neste domínio.

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Neste capítulo, são introduzidos temas nas áreas principais para o desenvolvimento desta dissertação no âmbito do cimento reciclado. Também são indicados os principais impactos ambientais do betão relativos à extração de matérias-primas, consumo de energia e emissões de gases de estufa, bem como algumas estratégias atuais no domínio da reciclagem do betão que visa mitigar este problema.

Em seguida, são apresentados alguns dos trabalhos que têm sido desenvolvidos no âmbito dos cimentos reciclados, fazendo-se referência à sua produção e caracterização, bem como à sua incorporação em materiais de base cimentícia, com destaque para o seu elevado potencial. Estes são temas ainda muito recentes, salientando-se o escasso conhecimento atingido e a necessidade de realizar futuras investigações.

### 2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO BETÃO

A indústria da construção exerce uma elevada pressão sobre o ambiente, abrangendo várias atividades poluidoras, como a extração e processamento de matérias-primas ou o transporte de materiais (Yan et al., 2010). Nesta indústria, o betão é o material mais utilizado, resultado da sua versatilidade, baixo custo e facilidade de produção (Barcelo et al., 2013).

O fabrico de betão implica a extração de elevadas quantidades de agregados naturais assim como que o cimento utilizado na sua produção está associado a um forte impacto ambiental, quer relativo à extração e tratamento da matéria-prima, quer ao consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>. A produção de clínquer, o componente principal do cimento que é formado quando o calcário e a argila são submetidos a temperaturas de 1450°C, envolve elevados consumos de energia térmica e elevadas emissões de CO<sub>2</sub> (Miller, 2018). Acrescente-se ainda o consumo de energia associado ao arrefecimento e moagem do clínquer. De facto, entre os principais constituintes do betão, a produção de cimento é a que tem um maior impacto no ambiente, sendo responsável por cerca de 25 a 27% de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) industriais totais ou 5 a 7% das emissões globais (Rodrigues e Joeques, 2011), bem como pelo consumo de 12 a 15% da energia industrial em todo o mundo (Ali et al., 2011). No processo de produção de cimento, a maior parte da emissão de CO<sub>2</sub> provém da decomposição do calcário, a principal matéria-prima do cimento, e do processo térmico a altas temperaturas, sendo que cerca de 0,73 a 0,85 toneladas de CO<sub>2</sub> são libertadas por cada tonelada de cimento Portland produzido (Hasanbeigi et al., 2012).

As emissões resultantes do consumo de energia na indústria do cimento são diretas e indiretas. As emissões diretas estão relacionadas com o combustível necessário para a combustão no processo de produção, enquanto que as emissões indiretas são geradas como resultado do consumo energético (Talaie et al., 2019). Benhelal et al. (2013) afirmam que, dependendo da fonte de emissões, existem várias

estratégias de mitigação de gases de efeito estufa na indústria do cimento, como a modificação do processo de produção, melhoria da eficiência energética ou o uso de combustíveis alternativos.

Para além destes aspetos, o betão acarreta ainda um elevado impacto ambiental associado à sua fase de demolição e geração de resíduos, sendo o principal constituinte dos detritos de construção. No continente europeu, cerca de 180 milhões de toneladas de resíduos de demolição de betão são produzidos anualmente, a que corresponde cerca de 500 kg per capita (Gastaldi et al., 2015).

Para Rebitzer et al. (2004), na avaliação do impacto ambiental do betão, é importante focar em todo o ciclo de vida do material, especialmente no período pós-projeto. A consideração de todas as etapas, que envolve desde a extração das matérias-primas até à demolição e deposição de resíduos em aterro, é importante do ponto de vista da sustentabilidade. Assim, é fundamental avaliar corretamente os impactes ambientais deste material, considerando as emissões de gases de efeito estufa e os impactes nas mudanças climáticas (Heede e Belie, 2012).

De acordo com dados recentes do crescimento económico mundial, prevê-se que a área construída do planeta aumente em cerca de 200% nos próximos 40 anos, sendo que a produção de betão deverá aumentar 25% até 2030 (Miller, 2018). Deste modo, será colocada uma pressão acrescida sobre os limitados recursos naturais do planeta pelo que diversas entidades se focam em arranjar vias para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento, especulando o que pode ser alcançado até 2050 (CEMBUREAU, 2013).

## **2.2 SOLUÇÕES NO ÂMBITO DA RECICLAGEM DE BETÃO**

Várias investigações têm sido realizadas no sentido de desenvolver métodos que visam reduzir a pegada de carbono da indústria do betão e tornar a sua produção mais sustentável. Grande parte desses estudos têm-se focado na substituição parcial do cimento por subprodutos industriais, como cinzas volantes (Herath et al., 2020), pozolanas (Hossain et al., 2016) ou *filler* calcário (Panesar e Zhang, 2020), tendo em vista a redução da fração de clínquer sem reduzir as suas propriedades. Atualmente, em média, a percentagem de substituição de clínquer a nível europeu é cerca de 25% (ATIC 2019), tendo-se já atingido uma etapa de máxima otimização deste conceito, pelo menos até que surjam novos tipos de adições minerais.

Por sua vez, a crescente necessidade de sustentabilidade na construção e a forte intenção de promover economias verdadeiramente circulares, tem conduzido também a inúmeras pesquisas que procuram a reutilização de agregados provenientes de trituração de resíduos de construção e demolição (RCD). Esta linha de ação permite essencialmente reduzir o nível de extração de matérias-primas naturais, bem como reutilizar toneladas de resíduos, cujo destino seria a deposição em aterro.

Os agregados provenientes de RCD podem ser essencialmente constituídos por detritos de betão ou argamassas, pedra natural, cerâmicos, betuminosos e vidros, sendo que materiais diversos como madeira, plásticos ou outros podem também estar presentes (EN 933-11). Naturalmente, agregados mistos contendo estes ou parte destes constituintes são os que têm maior representatividade no total de agregados reciclados produzidos (Silva et al., 2014).

Num estudo sobre agregados reciclados de betão, Le e Bui (2020) afirmam que, com agregados reciclados de qualidade relevante e para uma percentagem ótima de incorporação, os betões produzidos com estes agregados possuem propriedades comparáveis às dos betões comuns com agregado natural. Afirmam ainda que a taxa de substituição de agregados grossos pode chegar a 100% em muitos casos. Para tal, tem importância as características do betão de origem sobre o qual resultaram os agregados reciclados de betão.

Resultados experimentais de Cachim (2009) mostram que agregados reciclados de tijolo podem ser utilizados como substituto de agregados naturais em percentagem até 15%, sem prejudicar a resistência mecânica. Afirma também que para 30% de substituição, há uma redução de até 20% das propriedades mecânicas do betão. Brito et al. (2005) reporta também resultados que mostraram que a resistência mecânica do betão diminui à medida que se aumenta a quantidade de agregados cerâmicos incorporados, devido a estes apresentarem menor capacidade resistente que os agregados naturais.

Na substituição de agregado natural por agregado reciclado misto, Cantero et al. (2018), concluíram que nem a resistência à compressão nem a resistência à flexão variou significativamente para taxas de substituição até 50%. No entanto, para percentagens mais elevadas verificaram-se reduções significativas em ambos os parâmetros. Por sua vez, Medina et al. (2014) concluíram que apesar de se ter observado uma redução de cerca de 18% na resistência mecânica do betão produzido com este tipo de agregados reciclados mistos, concluem que estes betões podem ser utilizados na produção de betão estrutural, para substituições de até 50% de agregado,.

Apesar de terem sido realizadas várias investigações visando a incorporação de agregados reciclados no betão, que contribui para reutilização de resíduos de construção e demolição, esta linha de ação não permite resolver o enorme problema do betão, relacionado com as elevadas emissões de CO<sub>2</sub>. De facto, sendo o cimento responsável por cerca de 80% das emissões de CO<sub>2</sub> do betão (Turner e Collins, 2013), qualquer estratégia que vise resolver seriamente a pegada de carbono do betão terá de passar obrigatoriamente por intervir ao nível deste constituinte.

Dessa forma, alguns trabalhos têm vindo a ser realizados no sentido de reutilizar os RCD diretamente na fração cimentícia, aproveitando as suas propriedades de *filler* ou alguma da sua reatividade residual. Jic e Wang (2012) testaram a possibilidade de utilizar partículas finas resultantes da produção de agregados reciclados como material de substituição de cimento. Os autores verificaram que as resistências

à compressão de argamassas reduziram até 73% para percentagens de substituição de até 45%. Consideraram que a sua substituição devia ser limitada até o máximo de 15%.

Recentemente, tem sido abordada uma estratégia mais eficiente para o reaproveitamento do material cimentício dos RCD, procurando explorar a sua capacidade de reidratação após reativação térmica. Neste caso, o material reciclado deixa de ter apenas uma função de *filler* e eventual nucleação, para participar ativamente também no desenvolvimento de produtos de hidratação. No próximo subcapítulo será abordado este tema, que tem sido foco de investigação no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico nos últimos 3 anos.

## **2.3 TERMOATIVACÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

### **2.3.1 Primeiros avanços na reativação do betão endurecido**

A capacidade de recuperação das propriedades hidráulicas de materiais cimentícios foi inicialmente observada em estruturas de betão sujeitas à ação do fogo. Segundo Poon et al. (2001), a cura do betão pós-incêndio permitiu uma recuperação relevante da resistência e durabilidade, dependendo do tipo de exposição, temperatura, método e duração da cura. Em alguns casos, são reportadas recuperações de resistência até 93% da resistência original. Numa análise sobre pastas de cimento, Farage et al. (2003) relataram também a recuperação parcial das propriedades mecânicas de uma pasta de cimento de 7 anos de idade, após tratamento térmico a 300°C.

Tendo em consideração este comportamento manifestado pelos materiais de base cimentícia sujeitos a elevada temperatura, Splittgerber e Mueller (2003) terão sido dos primeiros investigadores a conduzir uma tentativa de recuperar a capacidade de reidratação do material cimentício através de termoativação térmica. Estes autores avançaram com a hipótese de a hidratação do cimento ser reversível, sendo possível recuperar as fases do cimento original não hidratado através do tratamento térmico. Este processo de reversibilidade é um marco importante no sentido de implementar uma economia circular e de se criar um betão 100% reciclável.

Através do estudo de várias pastas de cimento submetidas a diferentes temperaturas de termoativação, com análise das principais mudanças morfológicas na transformação das fases, Alonso e Fernandez (2004) verificaram que a recuperação parcial da resistência mecânica era significativamente dependente da temperatura. Posteriormente, vários autores, em especial nos últimos 10 anos, têm tentado explorar e compreender a capacidade de reidratação dos materiais cimentícios.

### **2.3.2 Produção de cimento reciclado**

A ideia base do cimento reciclado implica uma primeira fase, que consiste na tarefa complexa de separação da fração cimentícia dos restantes constituintes do betão e dos ademais resíduos nos RCD,

seguido da sua redução a dimensões muito reduzidas e finalmente à sua termoativação a altas temperaturas, permitindo recuperar a sua capacidade de hidratação (Carriço et al., 2020a).

Na Figura 2.1, resume-se o processo de produção do cimento reciclado, permitindo observar a forma como este permite uma economia circular da indústria do betão, bem como alguns desafios importantes associados às várias etapas do processo e que têm sido alvo de investigação e desenvolvimento. Após a britagem dos resíduos de construção é necessário proceder à separação da fração cimentícia e do agregado, de modo a serem reutilizáveis no betão de forma mais eficiente. Depois o material cimentício residual é ratado termicamente de modo a recuperar a sua capacidade de hidratação, sendo idealmente reduzido a partículas muito finas com dimensões semelhantes às do cimento corrente. Por outro lado, os agregados reciclados são beneficiados pela redução da quantidade de pasta aderente, o que permite aproximar as suas propriedades das observadas nos agregados naturais. De facto, o principal motivo que afeta a qualidade do agregado reciclado é a quantidade e qualidade da pasta de cimento que permanece na superfície do mesmo, reduzindo o desempenho mecânico e de durabilidade do betão produzido (Tam et al., 2007).

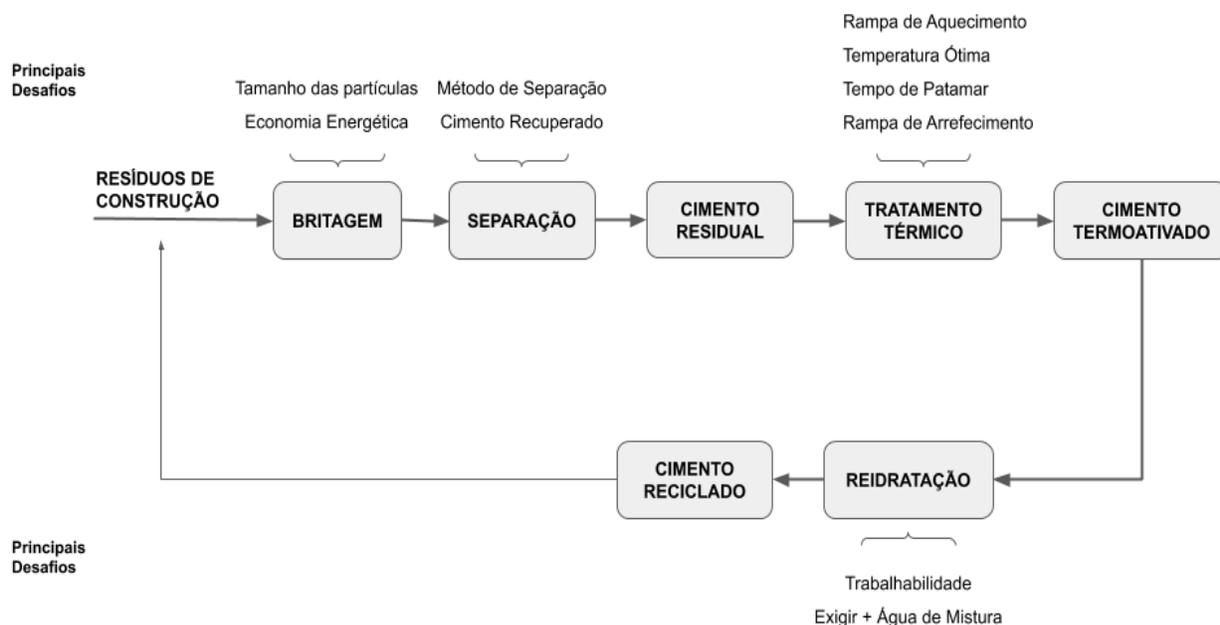


Figura 2.1 - Produção do cimento reciclado. Adaptado de Carriço et al. (2020a)

Como referido, um dos principais problemas da etapa de produção resulta da separação da fração de cimento dos resíduos de construção. Este problema tem sido essencialmente estudado de modo a melhorar as propriedades dos agregados reciclados provenientes da britagem de resíduos de construção, embora ainda não se tenha atingido um procedimento eficiente para a sua realização.

Essencialmente, os processos desenvolvidos com vista à obtenção de agregados de melhor qualidade envolvem processos mecânicos, térmicos ou a combinação de ambos. Num estudo realizado por Florea

et al. (2014), foi utilizado um método de britagem com auxílio de uma britadeira de maxilas especialmente modificado para a reciclagem de betão. O objetivo desta modificação foi permitir separar os constituintes do betão por meio de uma força que não danificasse os agregados e permitisse libertar o material cimentício.

Por exemplo, Ahn et al. (2001) recorreu a um processo térmico para o tratamento do agregado reciclado, considerando temperaturas de 200 a 500 °C durante 1 hora em forno elétrico. Aproveitando a diferença de expansão térmica dos constituintes do betão, a ideia passa por induzir microfendilhação na região agregado-pasta, facilitando a sua separação. O material resultante foi ainda sujeito a um processo mecânico de moagem, em moinho de bolas de aço, de modo a efetivar a separação.

Outros processos têm sido estudados, como a separação por descargas elétricas de alta-tensão (Shigeishi, 2017) em que, recorrendo à tecnologia utilizada em estudos de fusão nuclear, reporta-se a separação efetiva da pasta de cimento do agregado, sem a produção excessiva de partículas finas. Bru et al. (2014) estudaram ainda a utilização de micro-ondas na separação, de modo a reduzir a energia utilizada no processo e aumentar a libertação de pasta. Em geral, as metodologias referidas tendem a ser pouco efetivas, permitindo uma fraca separação do agregado da pasta cimentícia. Por outro lado, estas metodologias não foram pensadas para a reutilização da fração cimentícia, não se conseguindo a sua recuperação.

Neste caso, destacam-se 3 trabalhos que foram desenvolvidos com a preocupação de recuperar a fração cimentícia e que deram lugar à criação respetiva de patentes. Na patente de Chang (2007) pressupõe-se igualmente uma primeira fase de tratamento térmico, neste caso a 400-500°C, seguido de moagem em moinho de bolas e crivagem, permitindo separar os vários constituintes do betão. A fração fina inferior a 5 mm é posteriormente sujeita a uma etapa extra de moagem e crivagem. No entanto, os autores reportam a obtenção de baixos teores de cimento na mistura fina, sugerindo a elevada contaminação da fração de cimento por agregado. De acordo com o trabalho destes autores, verifica-se ainda que a limpeza efetiva dos agregados ocorre apenas para temperaturas de tratamento superiores a 400°C. Noutro trabalho, Florea et al. (2012) utilizaram uma britadeira modificada que visa maximizar a separação dos constituintes do betão. Neste caso, o equipamento foi alterado de modo a que o agregado pudesse ser desgastado sem ocorrência de fragmentação excessiva. Embora se reporte que o método garante uma separação efetiva entre finos e agregados grossos, a contaminação da fração cimentícia por agregado continua a ser elevada. Por outro lado, o equipamento tem uma aplicabilidade prática limitada exigindo a sua readaptação em função do tipo de betão a tratar. Em relação a estas duas técnicas destaca-se ainda o facto de o consumo de energia associado ser relativamente elevado, pois implicam a utilização de tratamentos térmicos ou elevados tempos de britagem.

Mais recentemente, Bogas et al. (2020a) patentearam um procedimento inovador de separação magnética no Departamento de Engenharia Civil do IST, que permite atingir de forma económica e com reduzido impacto ambiental frações cimentícias com níveis de contaminação inferiores a 25% (Hu 2019).

No presente trabalho foi considerado esse método de separação para a obtenção da fração cimentícia a partir de resíduos de betão.

Atualmente, e devido às dificuldades inerentes na separação dos constituintes do betão, a maioria dos trabalhos desenvolvidos no domínio do cimento reciclado considera de forma simplificada a obtenção de cimento reciclado a partir de pastas de cimento previamente produzidas em laboratório. Este procedimento justifica-se no sentido de permitir uma melhor compreensão do comportamento e das propriedades inerentes do cimento reciclado, bem como uma exploração máxima do seu potencial.

Após a obtenção da fração cimentícia, por separação de RCD ou diretamente a partir de pastas de cimento endurecido, é necessário proceder à moagem. Em geral este processo envolve uma etapa de britagem, seguido de moagem em moinho de bolas (Neto 2019, Gouveia 2019, Carvalho 2020), até se obter uma dimensão semelhante à do cimento normal. Wang et al. (2018) considerou resíduos de cimento com dimensão até 150  $\mu\text{m}$ , após moagem e crivagem. Dimensões abaixo de 250  $\mu\text{m}$  têm sido consideradas em outros trabalhos desenvolvidos no IST, resultante das dificuldades de moagem e de problemas de aglomeração das partículas (Bandeira 2020, Carvalho 2020). Zhang et al. (2018) verifica que o fenómeno de aglomeração tem uma influência importante nas propriedades finais do cimento reciclado, tendo sugerido a mistura com escória de alto forno de modo a facilitar a desaglomeração durante a moagem. Mantém-se a expectativa que este processo seja mais eficiente e produza melhores resultados quando efetuado a nível industrial.

Finalmente, procede-se ao tratamento térmico da fração cimentícia, de acordo com 3 fases distintas; aquecimento, tempo permanência e arrefecimento. Até ao momento, existem poucos estudos desenvolvidos no sentido de otimizar a definição destas fases. Em geral, a maior parte dos estudos de produção de cimento reciclado tem apontado para taxas de aquecimento entre 5 e 10°C/min (Vyšvařil et al. 2014, Wang et al. 2018, Real et al. 2020).

Quanto à taxa de arrefecimento têm sido utilizados dois tipos de processos, o arrefecimento natural (Zhang et al., 2018) ou o arrefecimento rápido (Yu e Shui, 2013). Serpell e Zunino (2017) concluíram que a taxa de arrefecimento teve uma influência pouco significativa na reatividade do cimento reciclado e nas propriedades mecânicas das argamassas com ele produzidas. Ainda assim, foi observada uma ligeira redução de resistência mecânica após arrefecimento rápidos, especialmente para temperaturas de tratamento elevadas, de cerca de 850°C.

A temperatura ótima de reativação térmica tem sido foco de alguns trabalhos de investigação. Num estudo sobre a influência da temperatura de tratamento, Shui et al. (2009) concluíram que, para temperaturas entre 300 e 500°C, existe uma fraca reatividade do cimento reciclado e a resistência mecânica desenvolvida é baixa. Porém, para temperaturas de tratamento superiores verificou-se um progressivo aumento da resistência mecânica das pastas, atingindo um valor ótimo para 800°C. Para temperaturas superiores ocorre uma inversão desta tendência. Serpell e Lopez (2015) estudaram a

influência da temperatura de termoativação na gama entre 660°C e 940°C, constatando igualmente um aumento progressivo da resistência à compressão para temperaturas de tratamento entre 660 e 800°C. Por sua vez, confirmaram também que a resistência reduzia com o aumento da temperatura entre 800 e 940°C, para além de ocorrer descarbonatação com consequências no aumento do nível de emissões de CO<sub>2</sub>.

Num estudo recente realizado por Real et al. (2020), foi também confirmado que a partir da temperatura de tratamento de 800°C desenvolvem-se microestruturas menos densas associadas à formação de C-S-H com menores comprimentos de cadeia. Estes resultados foram atribuídos à formação de polimorfos de C<sub>2</sub>S menos reativos a partir desta temperatura. Tendo em consideração resultados de caracterização mecânica e microestrutural, concluem que a temperatura ótima de tratamento ocorre para 600-700°C. Temperaturas semelhantes foram consideradas em outros trabalhos (Neto 2019, Yu e Shui 2013, Bogas et al. 2020b).

Os estudos realizados até a momento permitem convergir para a definição de um procedimento geral de termoativação. No entanto, este procedimento ainda está longe de estar otimizado, especialmente tendo em consideração a sua adaptação à indústria. Vários problemas relacionados com a recarbonatação ou pré-hidratação do cimento reciclado durante a fase de arrefecimento e armazenamento têm sido também atribuídos à perda de reativação observada em alguns casos (Carriço et al. 2020, Neto 2019, Gouveia 2019). Desse modo, é necessário aprofundar o conhecimento neste domínio, de modo a produzir este material com o máximo de eficiência, maximizando as suas propriedades.

### 2.3.3 Propriedades no estado fresco e endurecido de pastas com cimento reciclado

As propriedades e o comportamento das pastas de cimento reciclado no estado fresco e endurecido apresenta-se distintos de pastas de cimento Portland, no âmbito da necessidade de água, tempos de presa e resistências mecânicas.

Serpell e Zunino (2017) reportaram que a água necessária para obter uma consistência normal aumenta com a percentagem de incorporação de cimento reciclado. Por outro lado, Shui et al. (2009) e Vysvaril et al. (2014) revelaram que a água necessária de modo a manter determinada consistência aumenta com a temperatura de tratamento, embora tenham obtido necessidades de água diferentes para uma dada temperatura (Figura 2.2). Carriço et al. (2020a) e Shui et al. (2009) afirmam que este fenómeno de elevada exigência de água ocorre principalmente devido ao aumento da superfície específica da fase desidratada e à formação de CaO livre. Assim, dado que os cimentos reciclados possuem CaO na sua composição, parte da água da mistura reage imediatamente com esse composto e parte evapora devido à natureza exotérmica desta reação. Por outro lado, Xinwei et al. (2010) e Zhang et al. (2018) referem que este fenómeno se deve à absorção das partículas de cimento reciclado. Yu e Shui (2013) mencionam ainda que tal também se pode dever à aglomeração das partículas de cimento reciclado.

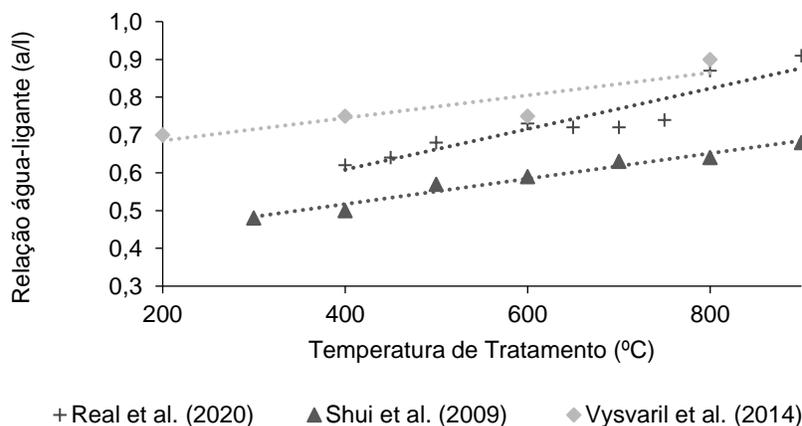


Figura 2.2 – Necessidade de água em função da temperatura de tratamento. Adaptado de Real et al. (2020)

O tempo de presa do cimento reciclado parece não reunir consenso entre os autores (Figura 2.3). A diminuição do tempo de presa com o aumento da temperatura de tratamento foi descrito por diversos autores (Shui 2009, Vyšvařil et al. 2014, Zhang et al. 2018), para temperaturas de termoativação até aos 800°C. Mesmo assim, razões divergentes são apresentadas para explicar o fenómeno, nomeadamente o aumento da desidratação do cimento reciclado (Shui, 2009) ou o aumento da concentração de CaO (Vyšvařil et al., 2014). No entanto, foram também descritos tempos de presa mais elevados em cimentos reciclados quando comparados com cimento Portland, tendo atribuído os resultados a fenómenos de pré-hidratação do cimento reciclado, bem como à dimensão das suas partículas (Bogas et al. 2019, Carriço et al. 2020, Real et al. 2020).

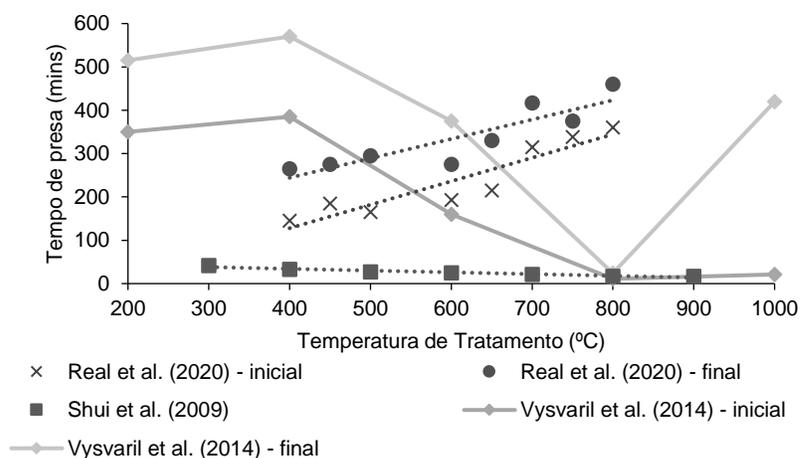


Figura 2.3 – Tempo de presa em relação à temperatura de tratamento. Adaptado de Real et al. (2020)

O comportamento mecânico do cimento reciclado tem sido estudado por diversos autores em pastas e argamassas, dependendo de diversos parâmetros, nomeadamente o material de origem, a temperatura de tratamento, a finura das partículas, a eficiência de dispersão das partículas e a relação água-ligante

(Carricho et al., 2020a). Uma das propriedades mais discutidas por diversos autores (Shui et al. 2009, Balducco et al. 2019, Bogas et al. 2019, Real et al. 2020) tem sido a evolução da resistência mecânica tendencialmente mais rápida em idades iniciais do que a observada em cimentos Portland, tendo crescimentos de resistência menos revelantes a longo prazo. De acordo com estes autores, este rápido desenvolvimento inicial de resistência pode ser atribuído elevada superfície específica do cimento reciclado. Além disso, Real et al. (2020) referem que parte da água da mistura é inicialmente consumida na formação de hidratação interna dentro da microestrutura porosa das pastas de cimento reciclado, deixando menos água disponível entre as partículas anidras. Deste modo, a pasta de cimento reciclado comporta-se como tendo uma relação água-ligante mais baixa e a proximidade entre as partículas aumenta, o que acelera a coesão entre elas e melhora a resistência inicial.

Tal como descrito anteriormente, Bogas et al. (2020) atribuíram o rápido desenvolvimento de resistência inicial (até aos 3 dias de idade) do cimento reciclado à sua natureza porosa e elevada superfície específica. Neste estudo, a resistência mecânica da pasta de cimento reciclado assemelhou-se à de pastas de igual relação água-ligante produzidas com cimento Portland, até aos 3 dias de idade. Contudo, aos 28 dias de idade, a resistência mecânica destas pastas apresentava redução de 32%, que os autores atribuem à natureza porosa e mais fraca das partículas de cimento reciclado assim como à menor formação de produto de hidratação externa entre as partículas.

Na comunidade científica, duas tendências podem ser encontradas no âmbito da variação da resistência à compressão com a temperatura de tratamento. Alguns autores (Angulo et al. 2015, Wang et al. 2018) obtiveram compressões máximas para cimento reciclado tratado a 500°C, enquanto outros (Shui et al., 2009, Serpell & Zunino, 2017) encontraram valores máximos para temperaturas entre os 600 e 800°C.

Wang et al. (2018) obtiveram resistências à compressão semelhantes em pastas de cimento reciclado tratado a 450°C e pastas de cimento Portland, tendo atingido resistências à compressão aos 28 dias de cerca de 32,3 MPa. Estes autores relataram que este desenvolvimento de resistência é possível devido à presença de tobermorite e uma forma desordenada de jenite, que reidratou. Afirmam também que com o aumento da temperatura de tratamento, a tobermorite e a jenite formaram wollastonite e pequenas quantidades de larnite, que na sua maioria não reagem. No entanto, outros estudos (Xuan e Shui 2011, Angulo et al., 2015, Serpell & Zunino, 2017, Real et al. 2020) relatam a máxima resistência de pastas de cimento reciclado para temperaturas compreendidas entre os 600 e 800°C. Real et al. (2020) afirmam que temperaturas de tratamento até 500°C apenas provocam a desidratação do cimento pelo que é a partir dos 600°C que se conduz a uma despolimerização, permitindo assim melhores capacidades de reidratação do cimento reciclado. Na Figura 2.4 é possível verificar os resultados obtidos pelos estudos dos autores mencionados no âmbito da resistência mecânica e respetivas temperaturas de tratamento.

Alguns autores (Xuan e Shui 2011, Angulo et al., 2015, Serpell & Zunino, 2017, Real et al. 2020) relatam a ocorrência de máxima resistência à compressão para uma temperatura específica de tratamento,

acima da qual a resistência tem tendência a reduzir. Segundo a literatura, parece haver consenso de que cimentos reciclados termoativados a temperaturas superiores a 800°C conduzem a menores resistências mecânicas, conseqüentes de fases menos reativas. De acordo com o estudo de Real et al. (2020), as resistências à compressão e flexão de pastas de cimento reciclado com a mesma consistência tenderam a diminuir com a temperatura de tratamento, para temperaturas superiores a 700°C. Estes autores, afirmam que este fenômeno é consequência da menor reatividade dos polímeros  $C_2S$  que se verifica para acima desta temperatura.

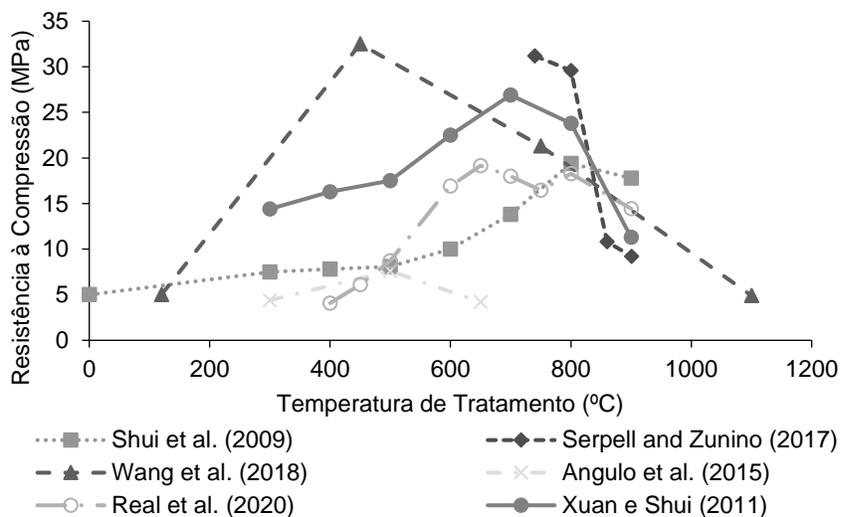


Figura 2.4 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da temperatura de tratamento (°C)

O potencial de sinergia entre cimento reciclado e adições minerais, de modo a facilitar o seu processo de produção e melhorar as suas propriedades no estado fresco e endurecido, também tem sido explorado por vários autores (Yu e Shui 2014, Serpell e Lopez 2015, Zhang et al. 2018). Carriço et al. (2020a) afirmam que os cimentos termoativados, com concentrações elevadas de íons OH, têm potencial para funcionar como ativadores alcalinos para materiais pozolânicos.

A utilização de cinzas volantes tem vindo a ser analisada como forma de melhorar a trabalhabilidade de misturas produzidas com cimento reciclado, prevenindo a aglomeração das partículas. Autores como Serpell e Lopez (2015) ou Yu e Shui (2014), em estudos sobre a incorporação de cimento reciclado e subprodutos industriais em betões, reportaram a redução da relação água-ligante necessária para consistência normal com a incorporação de cinzas volantes na mistura, permitindo assim reduzir uns dos principais desvantagens do cimento reciclado. No estudo de Serpell e Lopez (2015), verificou-se um aumento de trabalhabilidade das misturas de até 120%.

No âmbito da produção de cimento reciclado, Zhang et al. (2018) introduziram escórias de alto forno no processo de moagem do cimento termoativado de modo a melhorar a sua eficiência. Devido às dificuldades inerentes ao processo de moagem como a aglomeração de partículas, as incorporações de escórias de alto forno funcionam como microsferas de moagem devido à sua elevada dureza. Neste

investigação o cimento reciclado foi substituído por escórias de alto forno em diferentes relações de massa como 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 e 1:3. Com este processo conseguiram reduzir o tamanho médio das partículas de material cimentício de 30 µm para 12 µm, numa substituição de relação 1:1. Neste estudo, os autores atingiram valores à compressão aos 28 dias significativamente melhorados com a incorporação deste método. Para a relação de massa 1:2, a resistência à compressão aos 28 dias atingiu 43,5 MPa, superior ao valor somente com cimento termoativado (30,27 MPa) e apenas ligeiramente inferior à do cimento original (48,3 MPa).

## **2.4 ARGAMASSAS E BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTOS RECICLADOS**

Ao longo da última década, têm sido publicados vários estudos sobre a incorporação de cimento reciclado como substituição de cimento Portland tanto em argamassas como em betões (Florea et al. 2014, Bogas et al. 2019, Carriço et al. 2020b, Letelier et al. 2017). Estes estudos tencionam verificar a viabilidade da produção e incorporação de cimento reciclado e assegurar a trabalhabilidade e resistência mecânica de misturas com ele produzido.

Florea et al. (2014) estudaram o tratamento térmico de resíduos de betão provenientes de RCD, assim como a sua incorporação em argamassas, tendo caracterizado as suas propriedades mecânicas para diferentes composições. Este estudo revelou que a substituição de 20% de cimento corrente por cimento reciclado termoativado a 800°C não conduziu a alterações significativas de resistência à compressão e capacidades mecânicas semelhantes a cinzas volantes.

Bogas et al. (2019) investigaram as propriedades de argamassas com incorporação de cimento reciclado de pasta e cimento reciclado de betão (CRC). Devido à menor percentagem de material cimentício, o CRC foi menos eficiente do que o cimento reciclado proveniente de pasta, demonstrando a importância da separação do material cimentício. Além disso, para incorporação de até 20% de cimento reciclado de pasta, a resistência mecânica não foi significativamente afetada. Carriço et al. (2020b) mostraram que em argamassas com cimento reciclado de pasta ocorreu uma redução de até 48% da resistência em comparação com argamassas com cimento corrente (CEM I 42,5R) e com a mesma relação água-ligante. Os autores observaram ainda que, apesar das relações água-ligante elevadas (perto de 0,6), as argamassas com 100% de cimento reciclado de pasta conseguiram obter resultados de resistência mecânica de 27MPa, aos 28 dias de idade.

No domínio dos betões, Letelier et al. (2017), numa investigação sobre a incorporação combinada de cimento reciclado e agregados reciclados na propriedades mecânicas de betões, observaram que, para percentagens de substituição de cimento por cimento reciclado reduzidas (entre 5 e 15%), as diferenças na resistência à compressão e à flexão foram inferiores a 5%.

Num estudo mais recente no âmbito de betões de elevado desempenho com incorporação de cimento reciclado, Qian et al. (2020) apresentaram que, em idades iniciais (3 dias), o valor de incorporação de

cimento reciclado não tem reduzida influência nas resistências à compressão dos betões. Os autores afirmam também que, para percentagens de substituição de cimento corrente por cimento reciclado de até 25%, a variação de resistência mecânica do betão aos 28 dias de idade foi desprezável. A partir deste valor, os resultados de trabalhabilidade e resistência à compressão são afetados. Os autores atribuem este comportamento a duas das características do cimento reciclado, o seu efeito de nucleação das partículas que pode favorecer o processo de hidratação e resultar numa microestrutura mais densa, e a alta superfície específica capaz de absorver grande quantidade de água que pode causar baixas trabalhabilidades e gerar defeitos no betão. No âmbito da retração, estes autores analisaram também que com o aumento de incorporação de cimento reciclado no betão o ritmo de retração aumenta. Para 12,5%, 25% e 37,5% de incorporação, obtiveram valores de retração 9%, 13% e 6% mais elevados.

## 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

---

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação envolveu uma forte componente experimental com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico e a retração de betões produzidos com diferentes percentagens de incorporação de cimento reciclado, bem como com agregados reciclados tratados termicamente.

Numa primeira fase procedeu-se à produção do cimento reciclado proveniente de pastas ou betões de origem com pelo menos 120 dias de idade. Em seguida, foram produzidos betões de diferente *a/l* (água/ligante) com incorporação de distintas percentagens de cimento reciclado. Em paralelo, foram também considerados agregados reciclados diretamente provenientes de apenas uma britagem ou, alternativamente, da britagem, seguido de tratamento térmico e moagem do betão. O objetivo, foi aproximar-se da produção de betões 100% reciclados. Neste trabalho foi ainda considerada a incorporação de outras adições minerais, nomeadamente cinzas volantes e *filler* calcário, de modo a avaliar a sua eficiência relativa face ao cimento reciclado e a analisar a eventual sinergia entre o cimento reciclado e estas adições.

Finalmente, os vários betões foram caracterizados em termos de resistência mecânica (compressão, tração por compressão diametral), módulo de elasticidade, velocidade de ultrassons e retração. Neste capítulo apresenta-se a descrição dos vários procedimentos seguidos em cada uma das fases referidas, com referência às principais propriedades dos materiais utilizados, composição e produção dos betões, produção e cura dos provetes e procedimentos de ensaio.

### 3.2 PRODUÇÃO DE CIMENTO RECICLADO

#### 3.2.1 Pasta de Origem

Para a obtenção de cimento reciclado, foi inicialmente produzida uma pasta de origem com relação água-cimento (*A/C*) de 0,55. A relação *a/c* escolhida foi semelhante à adotada em outros trabalhos (Carvalho 2020, Bandeira 2020) e tem como objetivo a consideração de matrizes cimentícias típicas de betões comuns existentes, de baixa compactidade e moderada resistência. Na produção destes betões foi utilizado o cimento tipo CEM I 42,5 R fornecido pela empresa SECIL, cujo as principais propriedades indicam-se na Tabela 3.1 (análise química fornecida pela empresa em questão).

Tabela 3.1 - Propriedades do cimento CEM I 42,5 R utilizado

Propriedade	Norma		CEM I 42.5 R
<b>Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	LNEC E64 (1979)	-	3070
<b>Superfície específica mássica de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	NP EN 196-6 (2010)	-	4437
<b>Resíduo de peneiração &lt; 45 µm (%)</b>	NP EN 196-6 (2010)	-	6,8
		1 dia	16,8
<b>Resistência à compressão da argamassa de referência (MPa)</b>	NP EN 196-1 (2006)	2 dias	28,8
		7 dias	43,6
		28 dias	57
<b>Expansão (mm)</b>	NP EN 196-3 (2005)	-	1
<b>SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	NP EN 196-2 (2006)	-	19,64+5,34+3,05
<b>CaO+MgO (%)</b>	NP EN 196-2 (2006)	-	62,80+1,80
<b>CaO+MgO livre (%)</b>	NP EN 451-1 (2006)	-	0,7+0,9
<b>Tempo de presa (min)</b>	NP EN 196-3 (2005)	início	170
		fim	280

A pasta de origem foi produzida com auxílio de uma misturadora elétrica, num recipiente cilíndrico de 50 litros, de modo a atingir uma adequada homogeneização. Deste modo, iniciou-se a mistura colocando metade da água total no recipiente e, durante 4 minutos, adicionou-se e misturou-se gradualmente o cimento. De seguida, a restante água foi adicionada e misturada gradualmente durante mais 4 minutos. Em seguida foram moldados vários provetes com cerca de 300x150x150 mm para futura reciclagem. Foram também produzidos moldes cúbicos de 150mm de aresta, com o intuito de testar a resistência mecânica da pasta de origem produzida. Após 24 horas, os provetes foram desmoldados e armazenados no exterior em condições atmosféricas, de modo a assemelhar-se a condições reais. Durante os primeiros 7 dias, os provetes foram aspergidos com água. Estes provetes foram deixados nestas condições pelo menos 3 meses, de modo a obter uma pasta bem hidratada. Os provetes cúbicos, destinados a ensaios mecânicos, foram curados em câmara húmida, com humidade relativa superior a 95%, até à idade de ensaio. Na Tabela 3.2 resume-se a composição e principais propriedades da pasta de origem utilizada para a produção do cimento reciclado. No subcapítulo 3.4.1 faz-se referência ao cimento reciclado obtido a partir de betão endurecido, após separação dos seus constituintes, que também foi considerado no presente trabalho.

Tabela 3.2 – Composição e propriedades da pasta de origem

Propriedade/ Composição	Valor
A/C	0,55
Massa de Cimento	1142 kg/m <sup>3</sup>
Volume de Água	628,1 L/m <sup>3</sup>
Massa Volúmica Fresca	1840 kg/m <sup>3</sup>
Resistência à Compressão aos 28 dias	41,1 MPa

### 3.2.2 Britagem

Numa primeira etapa, os provetes de pasta, já com idades superiores a 120 dias, de modo a estarem suficientemente hidratados, foram britados por meio de uma britadeira de maxilas, existente no Laboratório de Construção do IST (Figura 3.1).



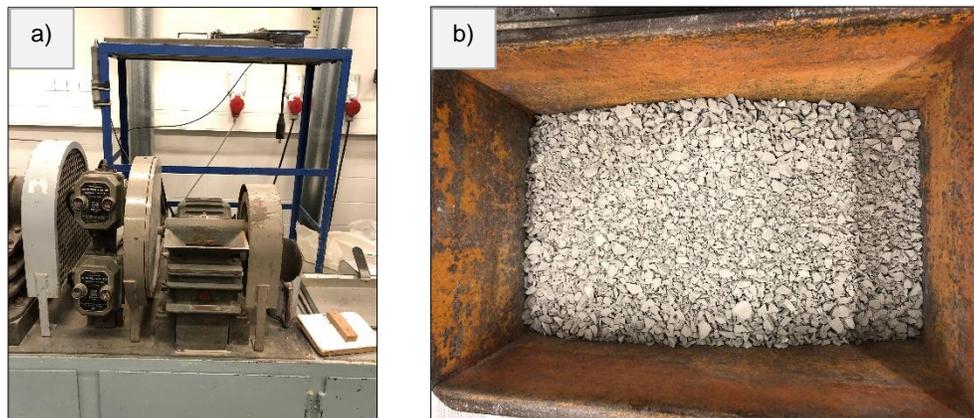
Figura 3.1 - Britadeira de maxilas utilizada

Na britagem, utilizou-se a menor abertura possível entre maxilas, cerca de 2cm, como mostrado na Figura 3.2a). Este primeiro processo de britagem permitiu obter partículas de dimensão máxima de 6 cm, caracterizando-se por apresentar forma laminar e alongada, conforme observado na Figura 3.2b).



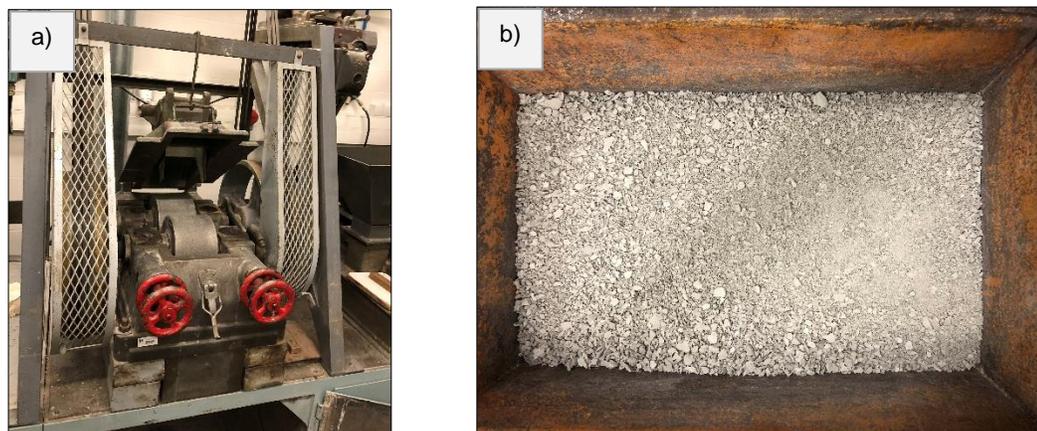
Figura 3.2 - a) Abertura da maxila da britadeira b) Partículas após primeira fase de britagem

De modo a obter partículas de dimensões mais finas, foram realizadas etapas adicionais de britagem e moagem no Laboratório de Minas e Georecursos do IST (GEOLAB). Inicialmente, o material foi britado numa britadeira de maxilas de menor dimensão, com abertura de aproximadamente 1 cm, como ilustrado na Figura 3.3a), obtendo-se partículas de dimensão máxima de 2 cm, conforme observado na Figura 3.3b).



*Figura 3.3 – a) Britadeira de Maxilas presente no GEOLAB b) Partículas após segunda fase de britagem*

Posteriormente, as partículas foram britadas no moinho de rolos lisos indicado na Figura 3.4a), permitindo alcançar partículas com dimensão máxima inferior a 1 cm, conforme observado na Figura 3.4b).



*Figura 3.4 – a) Moinho de rolos lisos presente no GEOLAB b) Partículas após terceira fase de britagem*

### 3.2.3 Moagem

Ainda no GEOLAB, procedeu-se a uma etapa final de moagem do material cimentício, de modo a atingir níveis de finura compatíveis com a sua utilização como material ligante. Para tal, foi utilizado o moinho de bolas ilustrado na Figura 3.5, onde foram introduzidas 525 bolas de aço de diâmetros entre 10 e 50 mm (242 bolas de 20 mm, 177 bolas de 25 mm e 106 bolas de 30 mm), para uma carga máxima de cerca de 12 kg. Para este processo foi utilizado um aditivo de moagem correntemente utilizado pela

empresa Secil SA na moagem de clínquer. O material foi moído durante 2 horas a uma velocidade de rotação aproximada de 40 rotações por minuto. Antes de se proceder à moagem em moinho de bolas, o material foi seco a cerca de 100°C, de modo a facilitar o processo de moagem e evitar a sua aglomeração.



Figura 3.5 - Moinho de Bolas

Nesta fase evitou-se a exposição prolongada do material ao ambiente, de modo a evitar eventuais fenómenos de carbonatação. Para tal, procedeu-se ao condicionamento do material moído em sacos devidamente selados.

#### 3.2.4 Peneiração

De acordo com o inicialmente planeado, pretendia-se que as partículas de cimento reciclado apresentassem finura semelhante à do cimento Portland, com dimensão média de 5 a 30  $\mu\text{m}$ . No entanto, a moagem em laboratório não permite atingir facilmente essa granulometria, nomeadamente quando se pretendem volumes razoáveis de material, como foi o caso. Idealmente pretendia-se que as partículas de cimento reciclado possuíssem dimensão inferior a 45  $\mu\text{m}$ , mas tal como sucedido em trabalhos anteriores (Neto 2019, Carvalho 2020), isso implicaria várias horas de peneiração e um rendimento incompatível com a realização do extenso trabalho experimental previsto. Desse modo, optou-se por peneirar o material para dimensões inferiores a 250  $\mu\text{m}$ , sabendo que o desempenho do cimento reciclado deverá ser superior para granulometrias mais finas (Bogas et al. 2019, Rocha 2016). A percentagem de material retido neste peneiro foi de apenas 5%, o que permitiu atingir rendimentos de peneiração aceitáveis.

#### 3.2.5 Termoativação

Finalmente, o material moído foi sujeito a termoativação para obtenção do cimento reciclado. O tratamento térmico foi realizado num forno elétrico rotativo, especificamente produzido pela *ThermoLab Scientific Equipments* para o efeito (Figura 3.6). A utilização do forno rotativo visa obter uma desidratação mais homogênea do material, sendo também mais representativo do que se prevê para a sua utilização industrial.



Figura 3.6 - Forno elétrico rotativo ThermoLab Scientific Equipments

O procedimento de termoativação seguiu o definido em trabalhos prévios realizados no IST, no âmbito do projeto de investigação em que se insere a presente dissertação. Assim, tendo por base o estudo de otimização realizado por Carvalho (2020) e Real et al. (2020), em que se considerou a influência de diferentes temperaturas de termoativação, optou-se por considerar uma temperatura de tratamento de 650°C. Esta temperatura garante condições ótimas de reativação para um mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> por descarbonatação.

No entanto introduziu-se uma novidade neste trabalho, que foi a inclusão de um patamar de 1 hora a 150 °C, de modo a facilitar a expulsão de água gerada na fase mais importante de desidratação do material. Assim, a curva de aquecimento adotada consistiu em: aquecimento até o patamar de 150 °C, onde o material foi sujeito a um tempo de residência de 1 hora; aquecimento até o patamar de 650 °C, em que o material foi sujeito a um tempo de arrefecimento de 3 horas. Entre patamares, estipulou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. O arrefecimento foi efetuado lentamente dentro do forno, até à temperatura ambiente. Para este processo térmico observou-se uma perda de massa de, aproximadamente, 25%.

### 3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO

#### 3.3.1 Produção do betão de origem

Tal como para o cimento reciclado, foi necessário produzir primeiro um betão de origem que depois permitisse produzir resíduos de construção representativos de um betão antigo. Esses betões foram produzidos no âmbito do projeto *EcoHydB*, apresentando cerca de 18 meses de idade. O cimento utilizado nesse betão foi o tipo CEM I 42,5 R, com as características indicadas na Tabela 3.1. A opção por este cimento resulta do melhor controlo da sua variabilidade e da maior facilidade em permitir estudar a influência de diferentes percentagens de incorporação de adições. Em termos de agregados, foram utilizados três tipos de britas calcárias e duas areias siliciosas naturais. Os agregados finos, compostos por uma areia 0-4 e uma areia 0-2, foram provenientes da Herdade de Mesquita (Sesimbra) e de Pinhal do Conde (Seixal), respetivamente. Os agregados grossos de natureza calcária, compostos por brita 2, brita 1 e bago de arroz, foram todos provenientes da Pedreira do Galo (Sesimbra). As principais propriedades dos agregados utilizados resumem-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades dos Agregados Naturais (AN) utilizados

Propriedade	Norma	AN calcários			AN siliciosos	
		Brita 2	Brita 1	Bago de Arroz	Areia Grossa	Areia Fina
Massa Volúmica do material impermeável (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6 (2016)	2683	2706	2698	2617	2608
Massa Volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6 (2016)	2650	2683	2669	2599	2598
Massa Volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6 (2016)	2662	2691	2680	2606	2602
Absorção de água às 24h (%)	NP EN 1097-6 (2016)	0,46	0,31	0,39	0,26	0,15
Baridade seca não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-3 (2002)	1382	1355	1347	1532	1512
Índice de Vazios (%)	NP EN 1097-3 (2002)	45,5	47,5	45,4	38,4	39,1
Índice de Achatamento	NP EN 933-3 (2014)	8,2	15,3	25,2	-	-
Fragmentação Los Angeles (%)	NP EN 1097-2 (2011)	28,8	27,0	-	-	-

As curvas granulométricas dos vários agregados naturais utilizados neste trabalho apresentam-se na Figura 3.7.

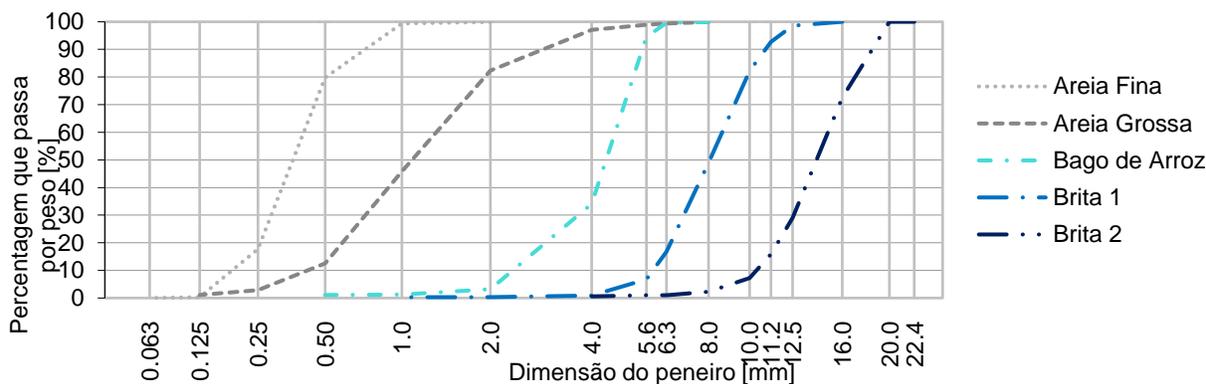


Figura 3.7 - Granulometria dos agregados naturais utilizados

Para o betão de origem considerou-se igualmente uma relação água/cimento (a/c) de 0,55, conforme realizado para as pastas de origem, de modo a apresentarem matrizes cimentícias de compacidade semelhante. O betão foi formulado de acordo com o método de Faury, para uma dosagem de 360 kg/m<sup>3</sup> de cimento, definida de modo a ser representativo de betões correntes e com vista a permitir uma classe

de consistência S3 sem problemas de segregação. Na Tabela 3.4 apresenta-se a composição do betão de origem.

Tabela 3.4 - Composição do Betão de Origem

Material	A/C	Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Bago de arroz (kg/m <sup>3</sup> )	Areia grossa (kg/m <sup>3</sup> )	Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (L/m <sup>3</sup> )
<b>Betão de origem</b>	0,55	586	302	195	411	293	360	198

O betão de origem foi produzido com auxílio de uma misturadora de eixo vertical, de 80L de capacidade, conforme ilustrado na Figura 3.8. Iniciou-se a mistura colocando a totalidade dos agregados por ordem decrescente de granulometria, juntamente com metade da água total e misturado durante 2 minutos. Após um período de repouso de 1 minuto, retomou-se a mistura por mais 1 minuto em seguida adicionou-se de forma gradual o cimento e a restante água da mistura, misturando-se por mais 3 minutos.



Figura 3.8 - Betoneira utilizada para produção de betão

Tal como o realizado para a pasta de origem (subcapítulo 3.2.1), o betão foi moldado em provetes de 300x150x150 mm. Após desmoldagem às 24 horas, os provetes foram armazenados no exterior do laboratório, sujeito a condições atmosféricas variáveis, tal como ocorrido em ambiente real. Durante os primeiros 7 dias procedeu-se à cura por aspersão de água dos provetes de betão. Foram também produzidos provetes cúbicos de 150mm de aresta, com o intuito de determinar a sua resistência à compressão aos 28 dias. Estes provetes foram sujeitos a cura húmida até à idade de ensaio, numa câmara com humidade relativa superior a 95%.

### 3.3.2 Caracterização do Betão de Origem

O betão de origem foi caracterizado em termos de abaixamento, ensaio de massa volúmica fresca e resistência à compressão aos 28 dias, seguindo as normas portuguesas NP EN 12350-2 (2009), NP EN 350-6 (2009) e NP EN 12390-3 (2011), respetivamente. No âmbito da caracterização do betão de origem

obteve-se um abaixamento de 150mm (S3), massa volúmica fresca de 2450 kg/m<sup>3</sup> e resistência média à compressão aos 28 dias de idade de 46,2 MPa.

### 3.3.3 Agregado reciclado britado (ARB)

Na produção dos agregados reciclados, o betão de origem, com pelo menos 120 dias de idade, foi britado na britadeira de maxilas existente no Laboratório de Construção do IST e descrita no subcapítulo 3.3.2, tendo-se obtido partículas de dimensão máxima de 6 cm. Em seguida, após apenas uma passagem na britadeira, procedeu-se à peneiração dos agregados reciclados britados (ARB) em diferentes frações granulométricas. A caracterização dos agregados obtidos, por fração granulométrica, apresenta-se na Tabela 3.6, no que se refere à massa volúmica, absorção de água e índice de vazios. Em alguns casos foi ainda determinado o índice de achatamento e índice de Los Angeles (LA). Estas propriedades foram determinadas com o fim de se comparar posteriormente as características dos dois tipos de agregados reciclados produzidos neste estudo, nomeadamente o ARB e o agregado reciclado tratado termicamente (ART), conforme o subcapítulo 3.3.4. Na Tabela 3.5 foram apenas consideradas as frações obtidas entre 2 e 12,5 mm, visto que foram as únicas utilizadas na produção dos betões.

*Tabela 3.5 - Propriedades do Agregado Reciclado Britado (ARB)*

Propriedade	Fração do ARB		
	2-4mm	4-8mm	8-12,5mm
<b>Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2675	2622	2632
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2216	2288	2290
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2387	2415	2420
<b>Absorção<sub>,total</sub> 1h (%)</b>	7,26	5,32	5,21
<b>Absorção<sub>,total</sub> 24h (%)</b>	7,75	5,58	5,68
<b>Quantidade de Pasta (%Massa)</b>	16,9	14,5	15,9
<b>Quantidade de Pasta (%Volume)</b>	28,4	25,2	27,6
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1136	1167	1177
<b>Vazios (%)</b>	57,54	55,49	55,27
<b>Índice de achatamento</b>	-	27,17	16,46
<b>Fragmentação LA (%)</b>	-	-	42,54%

### 3.3.4 Agregado reciclado tratado termicamente (ART)

Conforme discutido no capítulo 2, a presença de pasta reduz o desempenho dos agregados reciclados, depreciando as propriedades dos betões com ele produzidos (Pawluczuk et al., 2019). Assim, de modo a

melhorar a qualidade dos agregados reciclados foi realizado um tratamento térmico dos ARB, que promove a geração de variações dimensionais diferenciais entre a pasta e o agregado (desidratação da pasta e diferentes coeficientes de expansão), facilitando a sua separação.

De acordo com o trabalho realizado por Hu (2019), também no âmbito do presente projeto, para temperaturas de tratamento entre 300°C e 500°C, foi concluído que o maior rendimento de separação agregado-pasta, sem alteração das características dos agregados, ocorria para temperaturas na ordem de 400°C. Estes resultados estão igualmente de acordo com o observado por Chang (2007). Desse modo, optou-se por considerar essa temperatura de tratamento no presente trabalho. Idealmente, conforme realizado por Hu (2019), o tratamento térmico deveria ser efetuado em forno rotativo. No entanto, o forno existente no IST não permite o tratamento de um volume aceitável de agregado, pelo que se recorreu ao forno elétrico horizontal apresentado na Figura 3.9. No entanto, ao contrário do pretendido, não foi possível fazer uma otimização prévia da curva de queima do forno, e os agregados acabaram por ser tratados a apenas 300°C (Figura 3.10), temperatura para a qual o nível de eficiência de separação é significativamente inferior (Hu 2019). Se aliarmos ainda o facto de se ter procedido ao tratamento em forno horizontal, conclui-se que o rendimento de separação terá sido significativamente reduzido face ao procedimento otimizado por Hu (2019).



Figura 3.9 - Forno Horizontal utilizado

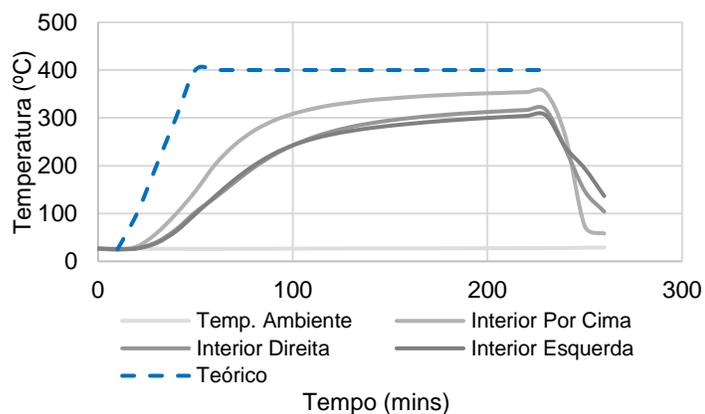


Figura 3.10 – Curva térmica de tratamento do agregado, monitorizada por termopares, associados a um equipamento Delta-T Data-Logger, posicionados em vários locais diferentes do forno

Após a curva de aquecimento e conseqüente arrefecimento, o agregado foi sujeito a moagem autogénea durante 10 minutos, com recurso ao equipamento de Los Angeles. No final deste processo, e através de um processo de peneiração, foram finalmente obtidas as várias frações de agregado reciclado tratado termicamente (ART). Na Tabela 3.6, apresentam-se as principais propriedades deste agregado para cada fração analisada.

Tabela 3.6 - Propriedades do Agregado Reciclado Tratado Termicamente (ART)

Propriedade	Fração do ART		
	2-4mm	4-8mm	8-12,5mm
<b>Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2688	2694	2677
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2277	2334	2348
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2430	2467	2471
<b>Abs<sub>total</sub> 1h (%)</b>	5,85	5,14	4,6
<b>Abs<sub>total</sub> 24h (%)</b>	6,72	5,73	5,25
<b>Abs<sub>porosidade</sub> 24h (%)</b>	5,86	5,00	4,67
<b>Abs<sub>hidratação</sub> 24h (%)</b>	0,86	0,73	0,58
<b>Material limpo (%)</b>	55%	39%	27%
<b>Quantidade de Pasta (%Massa)</b>	13,0	12,3	11,4
<b>Quantidade de Pasta (%Volume)</b>	22,4	21,8	20,2
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1247	1249	1291
<b>Vazios (%)</b>	53,6	53,64	51,78
<b>Índice de achatamento</b>	-	12,55	5,46
<b>Fragmentação LA (%)</b>	-	-	40

Na Tabela 3.6, a  $Abs_{total}$  refere-se à absorção de água dos agregados após tratamento a elevada temperatura, medido a um dado instante. A  $Abs_{porosidade}$  e  $Abs_{hidratação}$ , refere-se à absorção de água do agregado após reidratação da pasta que o compõe e à absorção correspondente à hidratação da pasta, respetivamente. Estas absorções são determinadas de acordo com o ensaio especificado na EN 1097-6 (2016). Face ao agregado ARB, apesar de se confirmar uma redução na absorção dos ART em todas as frações analisadas (24%, 10% e 17,7% na fração 2-4, 4-8 e 8-12,5, respetivamente), e portanto uma redução na quantidade de pasta aderida, pelos motivos referidos não se atingiu o nível de separação inicialmente pretendido. Ao contrário do observado por Hu (2019), a menor eficiência de separação não ocorreu nas frações mais grosseiras, acima de 8mm.

Para realizar uma avaliação à percentagem de pasta nas frações 2-4 mm, 4-8 mm e 8-12,5 mm do ARB e do ART, foi realizado um ensaio expedito de termogravimetria descontínua entre 350 °C e 550 °C. Nesta série de temperaturas ocorre a desidroxilação da fração cimentícia, assim como alguma desidratação parcial de produtos de hidratação remanescentes pelo que estimou-se a quantidade de pasta aderida, com base na perda de massa das amostras de ARB, ART e amostra de pasta de cimento (Tabelas 3.5 e 3.6). Idêntico ao relatado por Hu (2019), os AR apresentam perdas de massa muito reduzidas para esta gama de temperaturas, assim como o nível de carbonatação da fração cimentícia foi semelhante na pasta e no betão.

Através deste método, estimou-se uma percentagem em massa de pasta aderida nos ARB entre 15 e 17% (Tabela 3.5). Confirma-se assim mais pasta aderida nos agregados com maior absorção. Em paralelo foram estimados os valores de volume de pasta aderida (Tabela 3.5 e 3.6), tendo em conta as massas volúmicas dos AR e adotando  $1310 \text{ kg/m}^3$  como massa volúmica seca da pasta (para um grau de hidratação de 75%). Assim, o volume de pasta aderida variou entre cerca de 25% e 28% nos ARB.

Por outro lado, é também possível estimar a percentagem de volume de pasta aderida nos ARB e ART, tendo por base as massas volúmicas secas dos AN, ARB e ART indicadas nas Tabelas 3.3, 3.6 e 3.7, respetivamente, e adotando  $1310 \text{ kg/m}^3$  para a massa volúmica seca da pasta. Na Tabela 3.7, estão apresentadas estas estimativas assumindo a massa volúmica seca dos AN ser  $2637 \text{ kg/m}^3$  (considerando a sua proporção na mistura, Tabela 3.4). Estas estimativas de percentagem em volume de pasta foram, em média, apresentam valores entre 5% inferiores e 15% superiores aos determinados pela termogravimetria simplificada, verificando que as duas metodologias são elegíveis para a estimativa do volume de pasta. Deste modo, verificou-se que a redução da percentagem de pasta do ARB em comparação com o ART varia entre 17 e 21%.

*Tabela 3.7 - Percentagem de volume de pasta estimada no ARB e ART*

Tipo de AR	% em volume de pasta por fração de agregado		
	2-4 mm	4-8 mm	8-12,5 mm
ARB	31,7	26,3	26,1
ART	25,8	21,8	20,7

No entanto, como referido, os resultados obtidos estão ainda muito longe dos obtidos por Hu (2019), em que para mais de 80% do volume de agregado entre a fração 2 e 6 mm observou-se menos de 1% de pasta aderida. Constatou-se também uma redução significativa no índice de achatamento do ART face ao ARB (cerca de 54% e 66,8% para a fração 4-8 e 8-12,5, respetivamente), o que se justifica pela etapa de moagem autogénea imposta aos ART. A maior esfericidade atingida na forma do agregado permite também que a percentagem estimada de vazios seja inferior no ART do que no ARB, em cada fração. Isso é importante pois facilita a colocação do betão e reduz a sua exigência de água.

### **3.4 PRODUÇÃO DE BETÃO**

Neste subcapítulo descrevem-se os materiais utilizados, a composição e o processo de produção e cura dos vários betões produzidos, nomeadamente os de referência com cimento Portland e agregado natural, bem como os betões com incorporação de cimento reciclado e agregado reciclado.

### 3.4.1 Materiais

Na produção dos betões foram utilizados os agregados naturais (AN) descritos no subcapítulo 3.3.1, os agregados reciclados de betão (ARB) caracterizados no subcapítulo 3.3.3 e os agregados reciclados termicamente tratados (ART) descritos no subcapítulo 3.3.4. Na produção de betão foram também incorporadas adições de cinzas volantes (provenientes da queima de combustíveis fosseis da Central Termoelétrica de Sines) e *filler* calcário, de modo a analisar uma eventual sinergia destes materiais com o cimento reciclado.

Aproveitando o estudo prévio de Hu (2019), no âmbito do projeto em que se insere este trabalho, foi também utilizado *filler* de betão como adição resultante do processo de separação da pasta dos agregados provenientes de RCD. Dado que este processo de separação não é aplicável a partículas inferiores a 150  $\mu\text{m}$ , considerou-se o reaproveitamento desta fração como adição mineral de menor reatividade. As propriedades do *filler* de betão, assim como das cinzas volantes e *filler* calcário, indicam-se na Tabela 3.8, sendo que as suas curvas granulométricas estão caracterizadas na Figura 3.11.

Tabela 3.8 - Propriedades das adições utilizadas

Parâmetro	Norma	Cinzas Volantes	Filler Calcário	Filler de Betão
Massa Volúmica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	LNEC E 64	2.300	2.600	2.630
Índice de atividade (%)		74.9	-	-
Perda ao fogo (950°C) (%)		2.69	42.96	28.71
Resíduo insolúvel (%)		84.92	<0.52	18.77
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	EN 196-2	56.52+22.70+7.02	0.42+0.18+0.1	20.61+2.55+0.97
$\text{CaO}+\text{MgO}$ (%)	EN 196-2	2.94+1.64	55.14+0.32	40.55+0.77

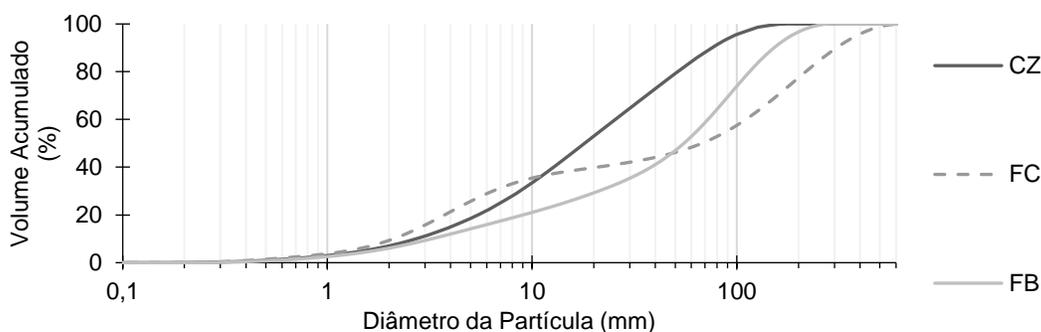


Figura 3.11 - Curvas granulométricas das adições utilizadas

De modo a obter betões mais fluidos e consequentemente valores mais apropriados do ensaio de abaixamento, em algumas das misturas realizadas no âmbito desta dissertação foi adicionado adjuvante superplastificante redutor de água. O adjuvante usado foi o *MasterEase 5025*, indicando-se na Tabela 3.9 as principais propriedades físicas e químicas disponibilizadas pelo fornecedor (<https://www.master-builders-solutions.com/pt-pt>).

Tabela 3.9 - Características do superplastificante, MasterEase 5025

Parâmetros	Valores
Cor	Amarelo Turvo
Densidade	1,058 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Cloretos	< 0,1 %
Alcalino	< 1,0 %
pH	5,3 ± 1
Viscosidade	< 90 caps.

Todos os trabalhos envolvidos nesta campanha experimental foram realizados com o mesmo tipo de cimento, CEM I 42,5 R, proveniente do mesmo lote, de modo a evitar a introdução de variáveis adicionais nos resultados. Como tal, na produção dos betões foi utilizado o cimento descrito no subcapítulo 3.2.1, designado de agora em diante de “CEM I”. No âmbito desta investigação, foi adotado o cimento reciclado produzido de acordo com o indicado no subcapítulo 3.2, proveniente de resíduos de pasta de origem com relação água-ligante 0,55 (designação “CRP”). Antes de se proceder à termoativação do cimento reciclado, o material encontra-se na forma não tratada (designação “NT”). Este material NT foi também considerado no trabalho, de modo a confirmar a sua inatividade reativa como adição. As propriedades destes dois materiais estão descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Propriedades dos materiais cimentícios utilizados

Parâmetro	Norma	CEM I	NT	CRP	CRC	CRS
Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )		3.07 <sup>a)</sup>	2.445 <sup>b)</sup>	3.005 <sup>b)</sup>	2.964 <sup>b)</sup>	3.036 <sup>b)</sup>
Superfície Específica (BET) (cm <sup>2</sup> /g)	EN 196-6	18134	-	156853	78673	120574
Perda na Ignição (950°C) (%)		2.48	20.65	8.41	-	-
Resíduo Insolúvel (%)		0.89	0.8	<0.52	-	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	EN 196-2	19.64+5.34 +3.05	14.78+3.97 +2.49	19.14+5.13 +3.00	-	-
CaO+MgO (%)	EN 196-2	62.80+1.80	50.08+1.29	60.79+1.77	-	-
CaO Livre (%)	EN 451-1	0.70	-	13.94	-	-
Exigência de Água (A/L)	EN 196-3	0.31	-	0.74	0.5	0,64
Presa Inicial/Final (min)	EN 196-3	170/180	-	290/385	375/415	570/635

a) Norma LNEC E 64    b) Picnometria de hélio

No seguimento do projeto, no qual esta dissertação se insere, foi também utilizado cimento reciclado obtido a partir de pastas de origem com relação água-ligante 0,35 (designação “CRS”), seguindo o mesmo

método de produção do cimento reciclado descrito no subcapítulo 3.2. Da mesma forma, o material correspondente, não tratado e com relação água-ligante 0,35 tem a designação “NT35”. As curvas granulométricas dos vários produtos descritos acima apresentam-se na Figura 3.12.

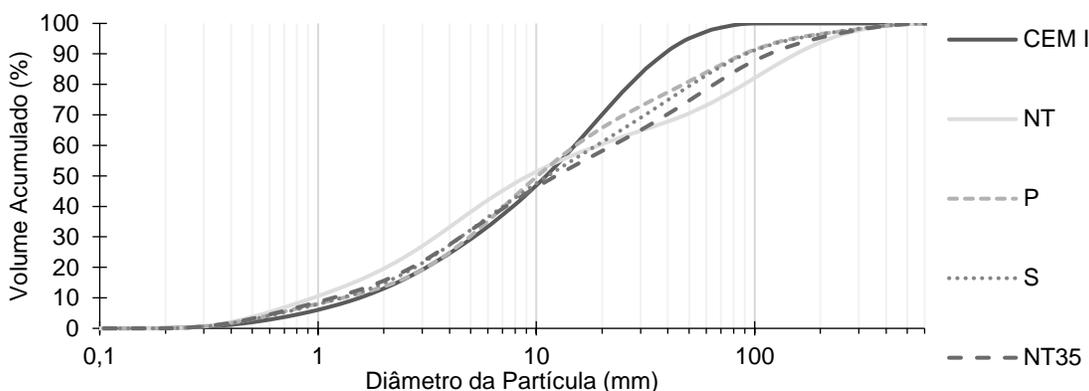


Figura 3.12 - Curva Granulométrica dos cimentos utilizados

Finalmente, foi ainda utilizado um cimento reciclado produzido a partir do betão de origem conforme o subcapítulo 3.3.3 e sujeito ao processo de separação desenvolvido por Bogas et al. (2020a), de designação “CRC”. Este processo de separação está descrito no trabalho de Hu (2019) e na patente desenvolvida por Bogas et al. (2020a). De acordo com Hu (2019), o cimento reciclado após separação apresentava cerca de 76% e 24% em massa, de matriz cimentícia e agregados naturais, respetivamente. Posteriormente, este material foi peneirado num peneiro de 250  $\mu\text{m}$  e submetido a termoativação, de acordo com as mesmas metodologias descritas nos subcapítulos 3.2.4 e 3.2.5.

Foram também realizadas análises de difração de raios X (DRX) de modo a identificar as fases cristalinas formadas nos cimentos reciclados (Figura 3.13). Para tal, utilizou-se o difratómetro *PANalytical X'pert Pro* com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , sendo os materiais sujeitos a um varrimento de  $2\theta$  compreendido entre 5 e  $60^\circ$ , com um passo de  $0,03^\circ$  e um tempo equivalente por passo de 100s.

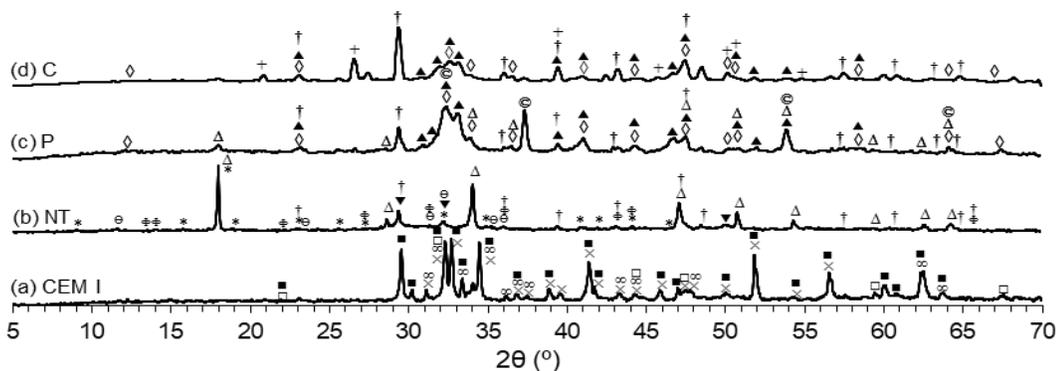


Figura 3.13 - Análises DRX realizadas para os materiais CEM I, NT, CRP (P) e CRC (C). Legenda:  $\Delta$  CH (portlandite);  $\dagger$   $\text{CaCO}_3$  (calcite); \* AFt (etringite);  $\infty$  gesso;  $\odot$  CaO;  $\blacksquare$   $\text{C}_3\text{S}$ ;  $\blacktriangledown$  C-S-H;  $\times$   $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$ ;  $\blacktriangle$   $\alpha'$ - $\text{C}_2\text{S}$ ;  $\square$  aluminoferrite de cálcio;  $\diamond$   $\text{C}_4\text{AF}$  (brownmillerite);  $\Phi$  aluminohydrocalcite; + quartz.

Adicionalmente foi realizada a análise termogravimétrica (TG) do cimento Portland de referência (CEM I 42,5 R), do cimento reciclado CRP e dos materiais cimentícios NT e CC (material que quando termoativado representa CRC) (Figura 3.14). Estas análises TG foram realizadas por meio do equipamento PC LUXX Thermobalance, utilizando-se uma rampa de aquecimento de 10 °C/min, para variação de massa até aos 950 °C em atmosfera de azoto.

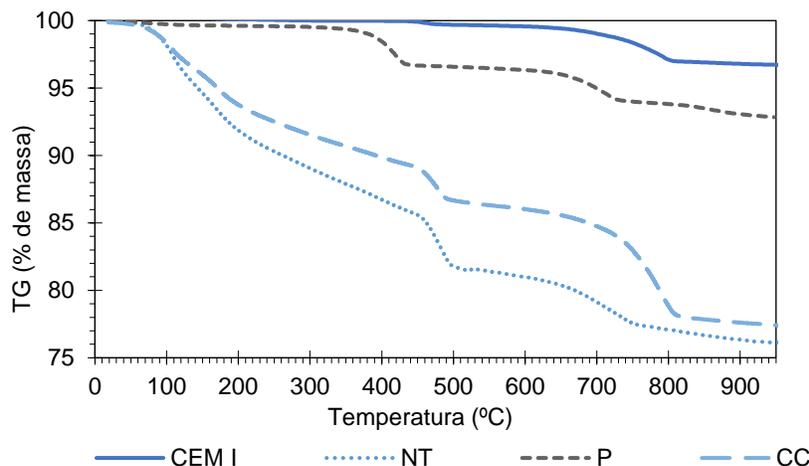


Figura 3.14 – Análises TG efetuadas para CEM I, NT, P e CC

Como seria de esperar, a análise DRX do CEM I indica maior cristalinidade dos seus compostos, indicada por picos mais finos e mais bem definidos (Figura 3.13). Esta análise apresenta os principais constituintes do clínquer, nomeadamente os silicatos tricálcicos e bicálcicos, na forma de alite e Iarnite, respetivamente. Apenas revelou-se variações significativas de massa entre os 600 °C e os 800 °C, correspondendo essa fase à descarbonatação do *filler* calcário presente no CEM I.

O CRP produzido, com capacidade de hidratação, é composto principalmente por  $\alpha'_L$ -C<sub>2</sub>S e CaO, assim como traços de calcite (Figura 3.13). Além disso, as análises DRX e TG demonstraram que o tratamento térmico a 650°C possibilitou a decomposição dos produtos de hidratação da pasta de cimento hidratado não tratado (NT), nomeadamente hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), sem descarbonatação significativa (Figuras 3.13 e 3.14). A quantidade de CH estimada a partir da análise TG (11%), através da desidroxilação, sugeriu a ocorrência de pré-hidratação durante o arrefecimento e armazenamento do CRP (Figura 3.14). A análise TG do NT também indicou que a pasta de origem tinha um grau de hidratação acima de 75%, sendo representativo de resíduos de betão bem hidratado.

No mesmo sentido, o cimento reciclado proveniente de betão (CRC) apresentou compostos cristalinos semelhantes aos do CRP, exceto para o quartzo, que é atribuído à areia residual do betão de origem presente neste ligante (Figura 3.13). Além disso, os picos de calcite foram mais intensos do que no CRP, verificada pela análise TG (Figura 3.14) que apresentou variações de massa muito semelhantes aos do

NT, exceto para a fase de decarbonatação, que é atribuído à maior percentagem de calcite, consequência da presença de agregado residual de calcário do betão de origem.

De modo a caracterizar os cimentos reciclados, foram produzidas pastas com relação a/l de 0.72 (CRP e CRS), tendo sido avaliada a sua resistência mecânica ao longo do tempo (resistência à compressão e tração por flexão). De referir que, a pasta com CRC foi produzida com relação a/l de 0.5, que, tendo em conta apenas a sua fração cimentícia, corresponderá a uma relação idêntica à das restantes pastas. Na Figura 3.15, apresenta-se a evolução da resistência mecânica das pastas consideradas, bem como a da pasta de referência com CEM I de idêntica relação a/l à das pastas com cimento reciclado CRP e CRS. Nestes dois gráficos é possível observar que as resistências das pastas produzidas com CRC e CRP foram muito semelhantes, apresentando reduções das resistências à compressão aos 28 dias de idade de 27 e 31%, respetivamente, em relação à pasta de CEM I. Quanto à pasta produzida com CRS, esperava-se resistências mecânicas similares às do cimento CRP, no entanto este resultado não foi atingido, mostrando uma redução de resistência à compressão aos 28 dias de 62 e 44% menor quando comparado com CEM I e CRP, respetivamente.

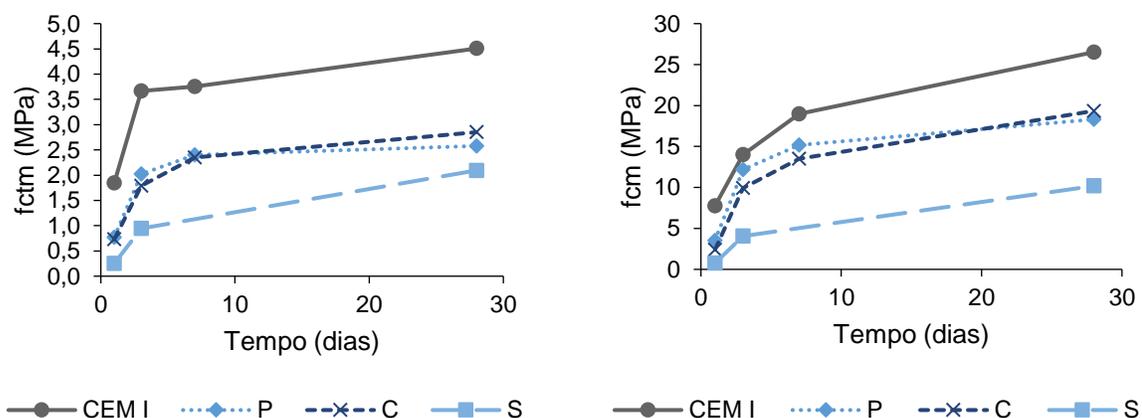


Figura 3.15 - Resistências de pastas com cimentos CEM I, C, P e S, com diferentes relações a/l

### 3.4.2 Composições

De modo a ter em consideração uma gama abrangente de composições, foram produzidos betão com relação a/l de 0,35, 0,55 e 0,65. A relação a/c de 0,55 foi adotada como referência, dado ser a mais representativa de betões correntes. Em paralelo foram produzidos betões de controlo com apenas cimento CEM I 42,5R e agregado normal, para a mesma gama de relações a/l, R35, R55 e R65.

Para a relação a/l de referência (a/l=0,55), analisou-se a substituição, em massa, de CEM I por 5%, 15%, 30% e 40% de cimento reciclado, permitindo abranger vários níveis de incorporação de adições. Para 30 e 40% de incorporação foi necessário adicionar elevados teores de SP de modo a compensar a

maior exigência de água e menor trabalhabilidade destes cimentos. Igualmente por este motivo, apenas nos betões com a/l de 0,65 foi possível incorporar 100% de cimento reciclado.

Para a relação a/l de 0,55 foram ainda produzidos betões com os cimentos reciclados provenientes de pastas de relações água-ligante 0,55 (CRP) e 0,35 (CRS), assim como cimento reciclado proveniente de betão (CRC), todos sujeitos ao mesmo tratamento térmico. Tal como referido, o material não tratado proveniente das pastas (NT) foi igualmente considerado para uma percentagem de substituição de 15%.

Nas betonagens com cinzas volantes, *filler* calcário e *filler* de betão foram apenas analisadas percentagens de incorporação de 15% e 30%. Porém, também foram estudadas misturas ternárias com 15% de cimento reciclado e 15% de cinzas volantes ou 15% de *filler* calcário, em substituição de CEM I.

Para a análise de betões com cimento e agregados reciclados foi também considerado o agregado reciclado britado (ARB) e o agregado tratado termicamente (ART). Devido à menor dimensão do agregado ART, com  $D_{max}$  limitado a 12,5 mm, foi necessário prever uma série complementar de betões de referência e com agregado reciclado de menor diâmetro máximo. De facto, apenas dessa forma se permite fazer uma comparação rigorosa entre betões e uma avaliação mais correta da influência de se utilizar ART em lugar de ARB ou agregados naturais. Neste estudo complementar, utilizou-se agregados naturais para frações menores que 2 mm, e analisou-se a incorporação de cimento reciclado em 15% e 30% de substituição de CEM I.

Finalmente foi ainda produzido um betão com 15% de cimento reciclado e a/l de 0.62 (15P62), apresentando a mesma trabalhabilidade do betão de controlo R55. Desse modo, permite-se a comparação entre betões com a mesma trabalhabilidade e sem adição de superplastificante.

Todos os betões foram formulados com base no método de Faury. As composições adotadas neste trabalho resumem-se na Tabela 3.11, sendo os vários betões designados com base nas nomenclaturas apresentadas para cada tipo de ligante ou adição (CRP, CRC, CRS, CZ, FC, FB, NT), tipo de agregado (AN, ARB, ART), dimensão do agregado (D para  $D_{max}$  de 12,5 mm) e na relação a/l da mistura (0,35 a 0,65).

Tabela 3.11 - Composições utilizadas nas betonagens

Designação	a/l	Mligante (kg/m <sup>3</sup> )	Incorporação (%)	Agregado	V <sub>agregado</sub> grosso (L/m <sup>3</sup> )	V <sub>agregado</sub> fino (L/m <sup>3</sup> )	V <sub>água</sub> (L/m <sup>3</sup> )	SP (% Mligante)
R35	0,35	450	-	AN <sup>a)</sup>	406	270	157,5	0,50
R55	0,55	360	-	AN <sup>a)</sup>	400	266	198	-
R65	0,65	360	-	AN <sup>a)</sup>	378	252	234	-
15NT55	0,55	360	15%NT	AN <sup>a)</sup>	397	264	198	-
15P35	0,35	450	15%CRP	AN <sup>a)</sup>	404	269	157,5	1.00 <sup>c)</sup>
5P55	0,55	360	5%CRP	AN <sup>a)</sup>	399	266	198	-
15P55	0,55	360	15%CRP	AN <sup>a)</sup>	399	266	198	-
30P55	0,55	360	30%CRP	AN <sup>a)</sup>	398	266	198	0,40
40P55	0,55	360	40%CRP	AN <sup>a)</sup>	394	263	198	1.50 <sup>c)</sup>
100P65	0,65	360	100%CRP	AN <sup>a)</sup>	373	268	234	3.75 <sup>c)</sup>
15P62	0,62	360	15%CRP	AN <sup>a)</sup>	384	256	223,2	-
15P65	0,65	360	15%CRP	AN <sup>a)</sup>	377	252	234	-
30P75	0,75	360	30%CRP	AN <sup>a)</sup>	355	237	270	-
30S55	0,55	360	30%CRS	AN <sup>a)</sup>	398	265	198	0,35
15C55	0,55	360	15%CRS	AN <sup>a)</sup>	398	265	198	-
30C55	0,55	360	30%CRS	AN <sup>a)</sup>	397	265	198	0,15
15CZ55	0,55	360	15%CZ	AN <sup>a)</sup>	396	264	198	-
15FC55	0,55	360	15%FC	AN <sup>a)</sup>	398	265	198	-
15FB55	0,55	360	15%FB	AN <sup>a)</sup>	398	265	198	-
30CZ55	0,55	360	30%CZ	AN <sup>a)</sup>	393	262	198	-
30FC55	0,55	360	30%FC	AN <sup>a)</sup>	396	264	198	-
30FB55	0,55	360	30%FB	AN <sup>a)</sup>	396	264	198	-
15P15CZ55	0,55	360	15%CRP+15%CZ	AN <sup>a)</sup>	396	264	198	0,20
15P15FC55	0,55	360	15%CRP+15%FC	AN <sup>a)</sup>	397	265	198	0,20
R55D	0,55	390	-	AN <sup>b)</sup>	334	296	214,5	-
ARBR55D	0,55	390	-	ARB <sup>b1)</sup>	334	296	214,5	-
ARTR55D	0,55	390	-	ART <sup>b1)</sup>	334	296	214,5	-
ART15P55D	0,55	390	15%CRP	ART <sup>b1)</sup>	333	295	214,5	-
ART30P55D	0,55	390	30%CRP	ART <sup>b1)</sup>	332	294	214,5	0,40

AN - Agregado Natural; ARB - Agregado Reciclado Britado; ART - Agregado Reciclado Tratado Termicamente

<sup>a)</sup> Dmax 22,5 mm

<sup>b)</sup> Dmax 12.5 mm

<sup>b1)</sup> Dmax 12.5 mm, frações <2mm de Agregado Natural

<sup>c)</sup> Teor de água no SP contabilizado, de acordo com a EN 206 (2013)

### 3.4.3 Produção e cura dos provetes

No âmbito desta campanha experimental, os provetes foram produzidos de acordo com o mesmo procedimento descrito no subcapítulo 3.3.1, utilizando uma misturadora de eixo vertical com descarga de fundo. A moldagem e compactação seguiu também os mesmos materiais e processos descritos no

subcapítulo 3.3.1. Consoante o tipo de ensaio, foram produzidos moldes cúbicos de 150 mm e 100 mm de aresta, cilindros com  $\Phi 150 \times 300$  mm e prismas de dimensões 100x100x350 mm.

Os provetes sujeitos aos ensaios mecânicos e de massa volúmica no estado endurecido foram curados continuamente em água até a idade de ensaio. Os provetes sujeitos a retração foram colocados numa câmara de ambiente controlado (temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa, HR, de  $65 \pm 5\%$ ) após a desmoldagem, que ocorreu às 24 horas de idade.

Na Tabela 3.12, resumem-se os provetes produzidos em cada tipo de ensaio e o processo de cura utilizado, bem como as idades em que se procedeu à sua caracterização.

*Tabela 3.12 - Tipo de provete e procedimento de cura para os ensaios realizados*

<b>Ensaio</b>	<b>Tipo de Proвете</b>	<b>Idade</b>	<b>Procedimento de Cura</b>
<b>Massa Volúmica Seca</b> (NP EN 12390-7 2009)	2 cubos 100x100x100 mm	28 dias	
<b>Resistência à compressão</b> (NP EN 12390-3 2011)	3 cubos 150x150x150 mm	3, 7, 28 e 90 dias	Cura húmida a $\text{HR} > 95\%$ , até idade do ensaio
<b>Resistência à tração</b> (NP EN 12390-6 2011)	3 cilindros $\Phi 150 \times 300$ mm	28 dias	
<b>Módulo de elasticidade</b> (LNEC E 397)	3 cilindros $\Phi 150 \times 300$ mm	28 dias	
<b>Retração</b> (LNEC E 398)	2 primas 100x100x350 mm	Contínuo	Câmara a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} = 65 \pm 5\%$

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DE BETÃO NO ESTADO FRESCO

#### 3.5.1 Trabalhabilidade do betão

A trabalhabilidade do betão foi medida com base no ensaio de abaixamento (cone de Abrams), de acordo com o especificado na norma NP EN 12350-2 (2009). Este ensaio foi realizado logo após a amassadura. Basicamente, o ensaio consiste na compactação de uma amostra de betão fresco no interior de um molde de forma troco-cónico, seguido da sua remoção e medição da altura de abaixamento, que corresponde à diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do betão deformado (Figura 3.16).



Figura 3.16- Ensaio de abaixamento segundo NP EN 1 2350-2

### 3.5.2 Massa volúmica fresca

Os ensaios de massa volúmica fresca foram realizados segundo a norma NP EN 12350-6 (2009). O betão fresco foi compactado dentro de uma recipiente rígido e estanque, de volume e massa conhecidos, registando-se a sua massa.

Para este ensaio utilizou-se um recipiente metálico com volume interior de 10L, sendo o betão vibrado por recurso a vibrador de agulha. Uma vez compactado, a parte superior foi nivelada com auxílio de colher de pedreiro, tendo sempre o cuidado de limpar o exterior do molde. A massa volúmica fresca resulta do quociente entre a massa da amostra de betão e o volume do recipiente.

## 3.6 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização dos betões no estado endurecido envolveu a realização dos ensaios de massa volúmica seca, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de ultrassons e medição da retração total por secagem.

### 3.6.1 Massa volúmica seca

Os ensaios de massa volúmica seca foram realizados segundo a norma NP EN 12390-7 (2009). Neste ensaio, foram utilizados provetes cúbicos de 100mm de aresta com 28 dias de idade, sendo ensaiados 2 provetes por mistura. Após a cura em câmara húmida, para cada provete, foi efetuada a pesagem hidrostática (Figura 3.17) e medida a massa saturada com superfície seca. Posteriormente, os provetes foram colocados em estufa a 100°C até apresentarem massa constante. Este procedimento permitiu determinar o volume do cubo e a sua massa seca, calculando-se a massa volúmica seca.



Figura 3.17 - Pesagem hidrostática

### 3.6.2 Velocidade de propagação de ultrassons

A medição da velocidade de propagação de ultrassons, de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007), foi realizada em provetes cúbicos com 150 mm de aresta aos 28 dias de idade. Este ensaio foi efetuado imediatamente antes do ensaio de resistência à compressão, pelo que foram ensaiados três provetes por composição. Para este ensaio foi utilizado o equipamento da marca *Pundit – Série Pundit Lab*, ilustrado na Figura 3.18.



Figura 3.18 - Equipamento de medição de velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio consiste na medição do tempo de propagação de ondas ultrassónicas através do provete de betão, transmitidas entre o emissor e o recetor de ondas. A velocidade média de propagação é dada pelo quociente entre a distância que a onda percorre, aresta do provete (150mm), e o tempo medido.

### 3.6.3 Retração e resistência à compressão

O ensaio de retração foi realizado segundo a especificação LNEC E 398 (1993). A avaliação da retração consistiu na medição da variação de comprimento ocorrida entre dois pinos, distanciados de 200 mm, que foram fixados ao provete 24h horas após a betonagem (Figura 3.19) através de uma resina de

fixação. Para cada composição foram ensaiados 2 provetes, tendo-se registado os valores de retração diários 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, seguido de medições aos 60, 90 e 120 dias de idade. Para este ensaio foi utilizada um equipamento da marca *Mitutoyo* ilustrado na Figura 3.19, com precisão de leitura de 1  $\mu$ m e curso de 5,0 mm.

Os ensaios de resistência à compressão foram executados segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Estes ensaios foram realizados em provetes cúbicos com 150 mm de aresta, aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade. Foram ensaiados três provetes por composição.

Para a realização deste ensaio, foi utilizada a prensa *TONI PACT 3000* apresentada na Figura 3.20a). Os ensaios foram realizados com carga aplicada perpendicularmente à direção de moldagem, a uma velocidade constante de 13,5 kN/s, que corresponde a 0,6MPa/s.



Figura 3.19 - Equipamento de medição Mitutoyo em ensaio de retração



Figura 3.20 – a) Prensa TONI PACT 3000 b) Provede após ensaio de compressão

#### 3.6.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado segundo a norma NP EN 12390-6 (2011), recorrendo a 3 provetes cilíndricos de dimensões  $\Phi 150 \times 300$ mm, que foram ensaiados aos 28 dias de idade. Utilizou-se a mesma prensa *TONI PACT 3000* apresentada na Figura 3.20a), para uma velocidade de carga constante de 3,5 kN/s, que corresponde a 0,05MPa/s.

O ensaio consiste na aplicação de carga uniforme ao longo da geratriz do cilindro, resultando em trações perpendiculares ao plano de carga que provocam a rotura. Para tal, foi utilizada uma estrutura metálica que permite a transmissão de uma carga para uniforme sobre o provete, conforme ilustrado na Figura 3.21.



Figura 3.21 – Ensaio à tração por compressão diametral

### 3.6.5 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a especificação LNEC E 397 (1993). Para tal, para cada mistura foram ensaiados 3 cilindros de dimensões  $\Phi 150 \times 300 \text{ mm}$  com 28 dias de idade.

Este ensaio foi realizado recorrendo à prensa *INSTRON* ilustrada na Figura 3.22a), e consiste na medição da deformação axial do provete quando exercidos ciclos de carga até cerca de 30% da resistência à compressão do mesmo. Para medir a deformação axial foram utilizados dois transdutores de deslocamentos, montados numa estrutura fixa ao provete, ilustrada na Figura 3.22b), e colocados em geratrizes diametralmente oposta. Após os provetes serem centrados cuidadosamente na máquina de ensaio, evitando possíveis excentricidades, foram realizados pelo menos oito ciclos de carga e descarga, sendo o ensaio finalizado quando a diferença entre valores da extensão média foi inferior a 10%.

Os ciclos de carga foram definidos para uma força aplicada inicial de 17.7 kN (1Mpa), aumentando posteriormente de forma gradual, a uma velocidade de 8.85 kN/s (0,5MPa/s), até à carga definida como limite, lendo-se continuamente as extensões correspondentes.



Figura 3.22 – a) Prensa INSTRON b) Estrutura utilizada com transdutores de deslocamento

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

---

O presente capítulo tem como objetivos principais a análise e discussão dos resultados obtidos através dos ensaios realizados na campanha experimental (capítulo 3). Os betões produzidos serão avaliados de acordo com o seu comportamento no estado fresco, bem como no estado endurecido, em termos de resistência mecânica e retração.

Na Tabela 4.1, resumem-se os resultados médios dos ensaios de abaixamento, massa volúmica fresca ( $\rho_{fresca}$ ) e massa volúmica seca ( $\rho_{seca}$ ), bem como os valores médios de resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), aos 3, 7, 28 e 90 dias, velocidade de ultrassons ( $V_{US}$ ), resistência à tração aos 28 dias ( $f_{ctm}$ ) e módulo de elasticidade aos 28 dias ( $E_{cm}$ ). No subcapítulo 4.2.6, serão apresentados os resultados referentes ao ensaio de retração. Na mesma tabela apresentam-se ainda os resultados do coeficiente de variação de cada uma das propriedades analisadas, que exceto para a resistência à tração, foram baixos e dentro do usualmente reportado na literatura (Bogas 2011, NP EN 12390-3 2011, Bogas e Gomes 2014, Bogas e Nogueira 2014). Sobretudo, importa salientar que a variabilidade observada não foi afetada pelo tipo de ligante ou de agregado, concluindo-se que os betões com cimento ou agregados reciclados apresentaram coeficientes de variabilidade da mesma ordem de grandeza do dos betões de referência.

Tabela 4.1 - Tabela dos resultados da campanha experimental

Designação	a/l	Abaix. (mm)	$\rho_{fresca}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{seca}$ (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>vazios</sub> (L/m <sup>3</sup> )	fcm <sub>3d</sub> (MPa)	CV fcm,3d (%)	fcm <sub>7d</sub> (MPa)	CV fcm,7d (%)	fcm <sub>28d</sub> (MPa)	CV fcm,28d (%)	fcm <sub>90d</sub> (MPa)	CV fcm,90d (%)	VUS <sub>,28d</sub> (m/s)	CV <sub>,VUS</sub> (%)	fctm <sub>28d</sub> (MPa)	CV fctm,28d (%)	Ecm <sub>28d</sub> (GPa)	CV <sub>Ecm,28d</sub> (%)
R35	0,35	150	2360	2330	34	63,6	3	72,1	3	84,4	1	93,5	4	5180	0	5,5	12	-	1
R55	0,55	150	2330	2220	13	33,7	1	42,0	3	52,2	1	59,2	0	4716	0	3,6	6	40,0	1
R65	0,65	Fluído	2280	2100	8	27,9	1	33,4	2	39,8	3	-	-	4620	0	2,7	2	-	-
15NT55	0,55	110	2270	2130	38	29,0	2	35,8	3	43,1	3	-	-	4520	1	3,2	11	-	-
15P35	0,35	100	2340	2310	35	76,3	3	86,1	1	90,0	4	-	-	5268	0	5,5	-	-	-
5P55	0,55	130	2320	2220	17	35,8	1	44,5	1	53,2	3	-	-	4762	0	4,0	7	-	-
15P55	0,55	90	2290	2190	27	34,7	1	42,9	3	52,4	1	56,9	2	4771	1	4,1	2	38,8	3
30P55	0,55	110	2280	2170	30	33,7	2	40,1	0	47,8	2	50,7	5	4646	0	3,3	3	36,4	2
40P55	0,55	190	2290	2160	19	37,4	1	44,4	1	52,5	2	-	-	4663	0	3,6	9	-	-
100P65	0,65	100	2220	2090	24	28,5	0	30,2	1	33,2	2	-	-	4415	0	2,2	6	-	-
15P65	0,65	190	2230	2090	26	27,9	1	33,5	1	40,1	1	-	-	4586	0	3,5	1	-	-
15P62	0,62	140	2260	2110	28	31,1	2	35,8	1	44,6	2	-	-	4650	1	3,5	11	-	-
30S55	0,55	170	2260	2170	38	29,4	2	35,8	5	46,8	1	53,7	3	4699	1	3,1	9	35,6	3
15C55	0,55	120	2290	2190	28	30,0	1	42,2	2	52,0	1	-	-	4745	0	3,8	0	-	-
30C55	0,55	130	2270	2160	33	24,2	1	36,5	1	45,0	0	-	-	4626	1	3,3	0	-	-
15CZ55	0,55	190	2280	2190	26	27,2	1	33,3	2	44,2	0	56,5	2	4640	1	3,4	16	37,0	2
15FC55	0,55	170	2310	2190	17	27,5	1	35,2	1	42,9	1	47,3	1	4581	1	2,8	5	36,2	1
15FB55	0,55	130	2300	2150	21	29,5	2	35,6	3	43,1	3	-	-	4618	0	2,7	10	-	-
30CZ55	0,55	180	2310	2170	11	20,8	2	24,9	1	38,4	1	50,1	1	4644	0	2,5	11	-	1
30FC55	0,55	150	2300	2150	19	23,5	1	27,4	2	33,8	5	36,1	4	4457	0	2,6	14	-	1
30FB55	0,55	140	2300	2130	21	22,3	1	26,8	3	32,8	0	-	-	4524	0	2,4	14	-	-
15P15CZ55	0,55	160	2300	2160	14	28,2	2	34,7	1	44,3	3	56,7	1	4648	0	2,6	6	35,9	2
15P15FC55	0,55	150	2300	2170	17	27,7	1	34,3	2	40,9	2	46,1	1	4630	0	2,7	5	-	-
R55D	0,55	140	2290	2140	14	37,4	2	-	-	50,3	2	-	-	4823	0	-	-	-	-
ARBR55D	0,55	130	2210	2020	7	33,9	2	-	-	46,7	2	-	-	4447	0	-	-	-	-
ARTR55D	0,55	170	2220	2060	15	36,0	1	-	-	49,3	1	-	-	4451	0	-	-	-	-
ART15P55D	0,55	110	2190	2040	23	35,0	4	-	-	48,3	2	-	-	4444	0	-	-	-	-
ART30P55D	0,55	130	2160	2020	38	33,0	3	-	-	44,2	4	-	-	4372	0	-	-	-	-

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

### 4.1.1 Trabalhabilidade

No presente trabalho foram produzidos betões com valores semelhantes de trabalhabilidade, procurando-se atingir a classe de consistência S3, segundo a norma portuguesa NP EN 206 (2013), a que correspondem abaixamentos entre 100 e 150 mm. Devido à natureza desta campanha experimental, com o intuito de estudar as propriedades da incorporação de cimento reciclado e devido à vasta gama de composições estudadas, não foi possível garantir a classe de abaixamento S3 para todos os betões produzidos, em especial quando não se recorreu a SP. Neste caso, atribuiu-se maior relevância à composição das misturas, nomeadamente à relação a/l e à percentagem de incorporação de adições, em detrimento da classe de consistência, para propósitos de comparação.

Conforme referido no subcapítulo 2.3.3, é relatada uma maior exigência de água por parte do CR, quando comparado com o CEM I. Esta elevada exigência de água tem sido discutida em diversos estudos (Shui et al. 2009, Vysvaril et al. 2014, Serpell e Zunino 2017, Carriço et al. 2020a), sendo atribuída à elevada superfície específica, elevada porosidade, formação de CaO livre (Shui et al. 2009, Carriço et al. 2020a), aglomeração de partículas (Yu e Shui 2013, Neto 2019) e elevada absorção de água (Zhang et al., 2018). Como tal, para percentagens de substituição de CR superiores a 30%, foi necessário incorporar quantidades elevadas de SP, a fim de cumprir a classe de consistência S3. Mesmo para uma substituição de apenas 15% de CEM I por CR, para se atingir o mesmo abaixamento, sem recurso a SP, foi necessário aumentar a relação a/l de 0,55 para 0,62 (Tabela 4.1).

#### 4.1.1.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

A Figura 4.1 mostra o abaixamento dos betões produzidos em função da percentagem de incorporação de CRP para relações a/l de 0,35, 0,55 e 0,65. Como esperado, confirma-se a perda de trabalhabilidade com o aumento de percentagem de incorporação de CR, conforme documentado na literatura (Shui et al. 2009, Serpell e Zunino 2017, Bogas et al. 2019). Sem a incorporação de SP, a mistura com 15% de CRP apresentou uma redução de abaixamento de 40% em relação ao betão de referência com a mesma relação a/l de 0,55. Ainda assim, a mistura apresentou trabalhabilidade suficiente para a sua adequada produção e compactação.

A Figura 4.2 mostra a trabalhabilidade ao longo do tempo da mistura 15P65. Ao contrário do que ocorre em misturas de CEM I, apesar de apenas se ter incorporados 15% de CRP, observa-se uma rápida redução da trabalhabilidade nos primeiros 15 minutos, devido à reação exotérmica de hidratação do CaO livre, bem como à absorção de água das partículas porosas de CR. Após 45 minutos, a trabalhabilidade foi diminuindo gradualmente, em resultado da hidratação progressiva do ligante, que no CR também tende a ser rápida devido à sua elevada superfície específica.

O SP utilizado mostrou-se eficaz na melhoria da trabalhabilidade dos betões com CRP, podendo compensar a maior necessidade de água deste ligante face ao CEM I. No entanto, face aos betões de referência usuais produzidos com CEM I, o cimento reciclado exigiu maiores dosagens de SP para compensar uma dada quantidade de água. Neste caso, para 100% CRP, foi necessário adicionar até cerca de 3,8% de SP, o que indicia um ponto de saturação do SP mais elevado. Este aumento do ponto de saturação do SP pode ser atribuído à elevada superfície específica e elevada porosidade do cimento reciclado (Shui et al., 2009), aumentando o teor de adjuvante adsorvido.

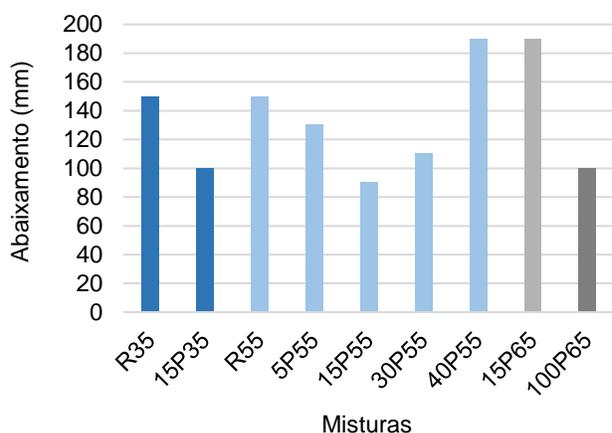


Figura 4.1 – Trabalhabilidade das misturas com P

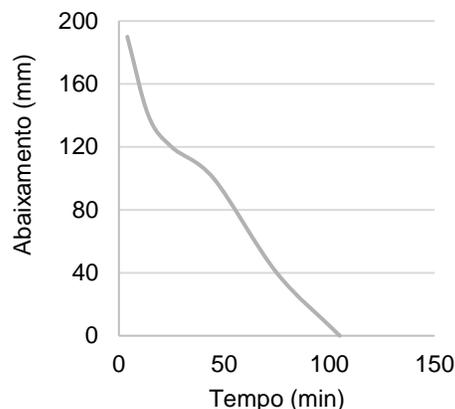


Figura 4.2 – Trabalhabilidade do betão 15P65 ao longo do tempo

#### 4.1.1.2 Influência do tipo de cimento

A Figura 4.3 mostra o abaixamento dos betões produzidos com diferentes tipos de cimento em função da percentagem de incorporação. A substituição parcial de CEM I por cimento reciclado proveniente de betão (CRC) levou a abaixamentos maiores do que os obtidos para a mesma percentagem de substituição de CEM I por CRP. Para 15% de incorporação de CRC, a trabalhabilidade foi 25% inferior face ao betão de referência e 33% superior em relação ao 15P55. Sendo o CRC proveniente de betão, este apresenta-se contaminado com cerca de 26% de agregados não porosos, o que corresponde a uma relação água/CR maior para a mesma relação a/l (Hu, 2019). Isto leva a uma redução significativa da água necessária para a consistência normal da pasta ( $a/l = 0,5$ , Tabela 3.10) em comparação com o CPR ( $a/l = 0,72$ , Tabela 3.10).

Relativamente ao CR proveniente da pasta de maior compacidade (CRS), este apresentou menor exigência de água ( $a/l = 0,64$ , Tabela 3.10) do que o CRP, pois devido à sua menor porosidade estava associado a uma menor superfície específica. O abaixamento do betão com 30% de incorporação deste ligante foi cerca de 60% superior ao do betão com a mesma percentagem de substituição de CEM I por CRP.

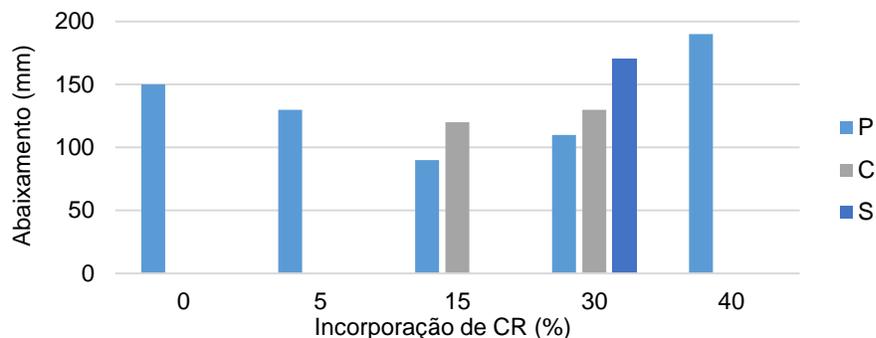


Figura 4.3 – Trabalhabilidade de betões com diferentes tipos de cimento

#### 4.1.1.3 Influência do tipo de adição

A Figura 4.4 mostra o abaixamento dos betões produzidos com as adições CZ e FC, assim como a sua incorporação em misturas ternárias com CRP. A utilização de CZ promoveu um aumento de trabalhabilidade nas misturas, essencialmente devido à sua maior esfericidade e menor superfície específica (Tabela 3.8), que, conforme reportado na literatura (Kim et al., 2012, Bogas 2011) conduzem a uma menor exigência de água. Para a mesma relação a/l de 0,55, a sua incorporação traduziu-se num aumento de trabalhabilidade de 27 e 20% para 15 e 30% de incorporação, respetivamente. Na mistura ternária com 15% de CZ e 15% de CRP foi possível compensar a elevada redução de trabalhabilidade das misturas com igual teor de CR, permitindo atingir um nível de abaixamento muito similar ao do betão de referência (R55).

Em comparação com o betão de referência (R55), a substituição até 30% de CEM I por FC não conduziu a variações significativas na trabalhabilidade. Estes resultados encontram-se de acordo com a literatura (Wang et al., 2018), que revelam que a incorporação de FC tem pouco efeito na trabalhabilidade das misturas. Na mistura ternária com 15% de FC e 15% de CRP, a presença de CR obrigou à adição de pequena dosagem de SP para se atingir uma trabalhabilidade similar à do betão de referência (R55).

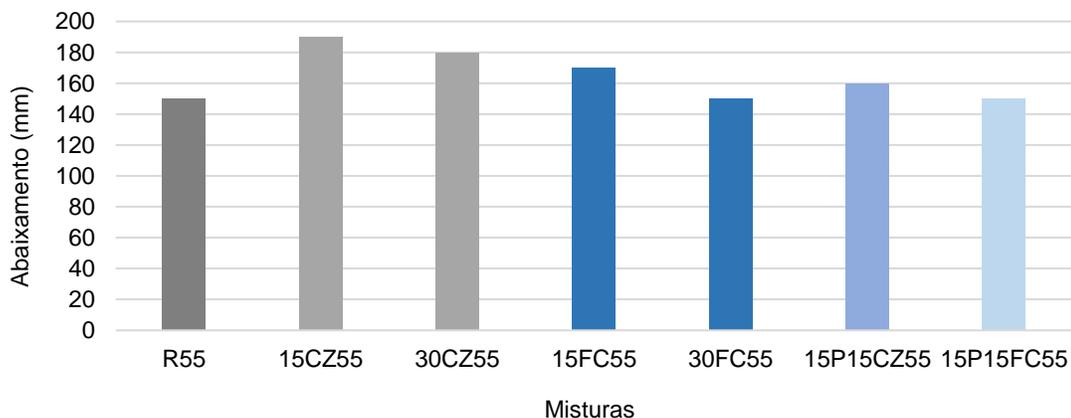


Figura 4.4 - Trabalhabilidade das misturas com adições CZ, FC e CRP

Para igual relação a/l, as misturas com incorporação de 15% de NT ou 15% de FB revelaram trabalhabilidades maiores do que as misturas com 15% de CRP, mas menores do que as misturas com *filler* de calcário, FC (Figura 4.5). Observou-se um aumento de abaixamento em relação ao betão 15P55 de 22 e 44%, para o 15NT55 e o 15FB55, respetivamente. Face ao CRP, o NT apresenta menor porosidade, natureza quase inerte e ausência de CaO livre, o que reduz a sua exigência de água. Por sua vez, o FC contém apenas partículas não porosas de agregado, permitindo o melhor comportamento em termos de trabalhabilidade. Finalmente, o *filler* de betão (FB) é constituído por um misto de pasta porosa e agregado, apresentando uma exigência de água intermédia entre o NT e o FC.

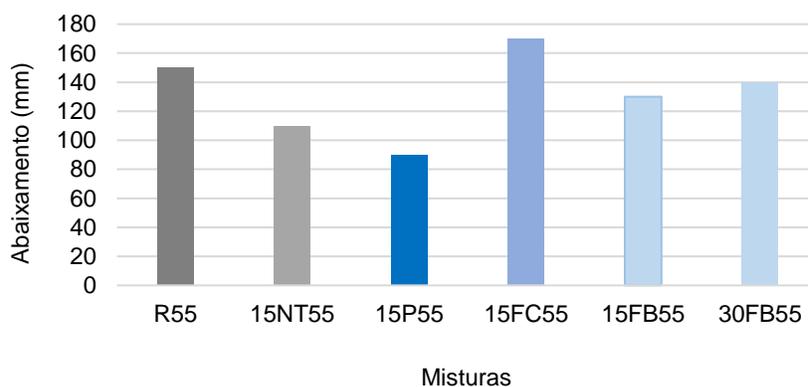


Figura 4.5 - Trabalhabilidade das misturas com fillers NT, FB e FC

#### 4.1.1.4 Influência do tipo de agregado

A Figura 4.6 mostra o abaixamento dos betões produzidos com agregado reciclado proveniente de britagem primária (ARB) ou de tratamento térmico adicional. A substituição de AN por ARB teve uma influência pouco significativa na trabalhabilidade, o que se justifica pelo facto de estes apresentarem índice de achatamento semelhante (Tabelas 3.3 e 3.5). Para a ligeira redução de abaixamento no betão com ARB contribui o facto de este apresentar menor massa volúmica, visto ser a força motora que controla este ensaio.

Por sua vez, a substituição de AN por ART conduziu a um aumento de trabalhabilidade em relação ao betão de referência. De facto, o processo de produção dos ART, que envolveu uma etapa mecânica de abrasão, promoveu uma diminuição importante no índice de achatamento (Tabela 3.6), apresentando forma mais arredonda do que os ARB. Kim et al. (2012) afirma que o incremento do abaixamento pode ser justificado com o aumento da percentagem de substituição de agregados de forma mais esférica e superfície mais lisa. Pelos motivos já referidos, a adição de CRP fez reduzir a trabalhabilidade dos betões com ART.

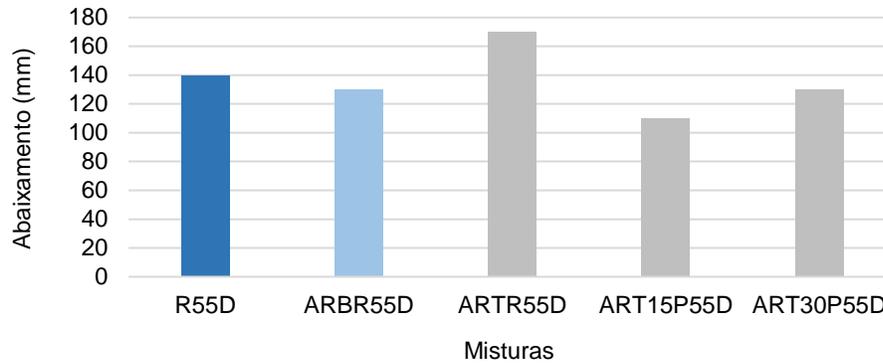


Figura 4.6 - Trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados ARB e ART

#### 4.1.2 Massa volúmica fresca

A massa volúmica fresca das misturas produzidas no âmbito deste trabalho variaram entre 2360 e 2160 kg/m<sup>3</sup>, sendo afetada por vários fatores, como a relação a/l da mistura, o tipo de cimento utilizado, o volume de vazios e o tipo de agregado.

##### 4.1.2.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

A Figura 4.7 mostra a massa volúmica fresca dos betões produzidos em função da percentagem de incorporação de CRP. Como esperado, a massa volúmica fresca é mais afetada pela relação a/l do que pela incorporação de CRP, que possui massa volúmica ligeiramente inferior à do CEM I (Tabela 3.10).

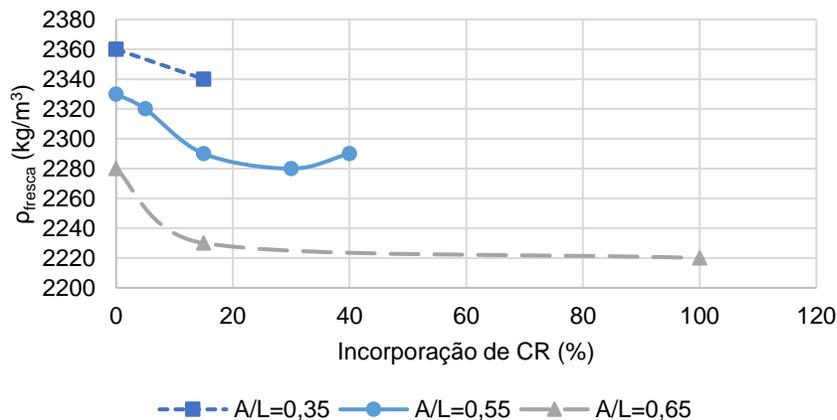


Figura 4.7 - Massa volúmica fresca, para a/l de 0,35, 0,55 e 0,65, em função da incorporação de CRP

Além disso, conforme mencionado, devido à maior necessidade de água do CR em relação ao CEM I, os betões produzidos com CR tendem a apresentar menor trabalhabilidade do que os betões de referência com a mesma relação a/l, o que pode justificar o menor grau de compactação e, como tal, maiores quantidades de vazios (Tabela 4.1). Isto permite explicar a redução acentuada de massa volúmica fresca nos betões produzidos com até 15% CR e sem utilização de SP. A massa volúmica fresca diminuiu

até 2,6 % com a incorporação de CRP, para mesma relação a/l. Para a incorporação de 15% CRP, observou-se uma redução de massa volúmica fresca de 0,8%, 1,7% e 2,2% para as relações a/l de 0,35, 0,55 e 0,65, respetivamente. Para 40% de substituição de CRP, verifica-se uma inversão na tendência de redução da massa volúmica (Figura 4.7). Isso pode ser explicado pelo ganho de compacidade alcançado através da adição de elevada dosagem de SP, com conseqüente benefício para a melhor dispersão das partículas de CRP e CEM I.

No betão de igual trabalhabilidade com 15% CRP (a/l de 0.62), o aumento da relação a/l fez com que a redução de massa volúmica face ao betão de referência (R55) atingisse os 2,9% (Tabela 4.1).

#### 4.1.2.2 Influência do tipo de cimento reciclado

Na Figura 4.8 apresenta-se a massa volúmica fresca dos betões produzidos em função da percentagem de incorporação dos diferentes cimentos, para a relação a/l de 0,55. A redução de massa volúmica com o aumento do teor de CR pode ser atribuído ao facto de os cimentos CRP, CRC e CRS possuírem massas volúmicas ligeiramente menores do que o CEM I, e sobretudo à tendência dos betões produzidos com CR apresentarem menor trabalhabilidade e menor grau de compactação (menor teor de vazios, Tabela 4.1).

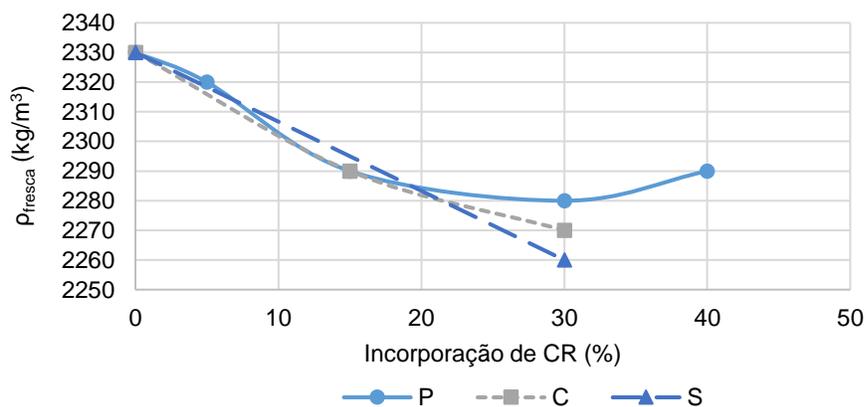


Figura 4.8 - Massa volúmica fresca em função da percentagem de incorporação de diferentes cimentos

Para a incorporação de 30% de CR, observou-se uma redução de massa volúmica fresca de 2,1%, 2,5% e 3% para o CRP, CRC e CRS, respetivamente. Em geral, as diferenças de massa volúmica foram pequenas entre estes betões, pois as percentagens de incorporação foram reduzidas. No entanto, para 30% de substituição a contaminação de agregado no CRC, de menor massa volúmica do que o CRP, conduz a maiores reduções de massa volúmica fresca.

#### 4.1.2.3 Influência do tipo de adição

A Figura 4.9 mostra a massa volúmica fresca dos betões produzidos com adições CZ e FC, assim como a incorporação conjunta destas adições e CR. Devido à sua menor massa volúmica, a substituição parcial de CEM I por CZ e FC reduziram de forma expectável a massa volúmica fresca do betão (Tabela 3.8). A exceção ocorreu no betão com 30% de CZ, cuja melhoria na trabalhabilidade terá permitido uma melhor compactação do mesmo, resultando numa maior massa volúmica fresca. Da mesma forma, dado que o NT e o FB também possuem massa volúmica menor do que o cimento CEM I (Tabelas 3.8 e 3.10), a massa volúmica fresca do betão produzido com essas adições diminuiu com a percentagem de substituição de CEM I (Figura 4.10). A incorporação de 15% de NT ou FB resultou na redução de 2,6 e 1,3% na massa volúmica fresca, respetivamente. A maior massa volúmica fresca do betão com FB face com CRP, justifica-se pela maior compactação atingida neste betão.

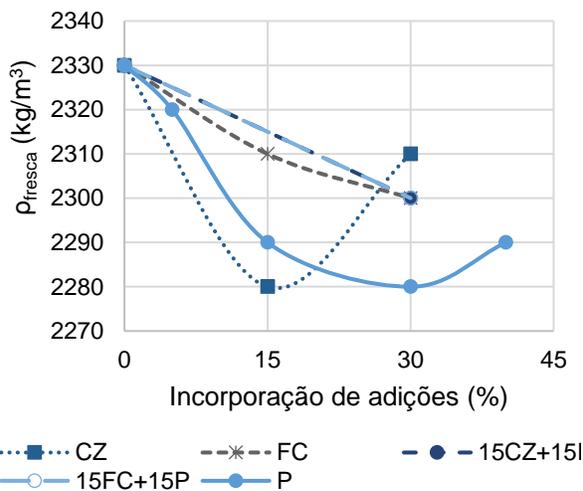


Figura 4.9 - Massa volúmica fresca em função da incorporação de CRP, CZ e FC

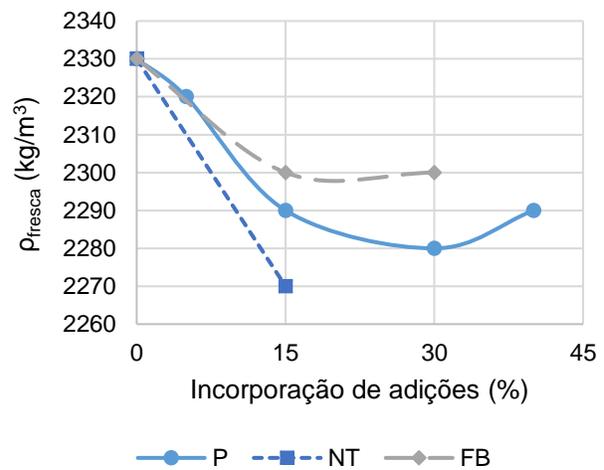


Figura 4.10 - Massa volúmica fresca em função de incorporação de CRP, NT e FB

#### 4.1.2.4 Influência do tipo de agregado

A Figura 4.11 mostra a massa volúmica fresca dos betões produzidos com diferentes agregados reciclados e percentagens de incorporação de CR, em comparação com o betão de referência (R55D) produzido com agregado normal. Como esperado, a massa volúmica fresca é mais afetada pela utilização de agregado reciclado do que pela incorporação de CR, visto que o primeiro introduz uma variação mais significativa do rácio volume de pasta versus volume de agregado. Dado que os ARB possuem menor massa volúmica do que os agregados naturais (Tabelas 3.3 e 3.5), a massa volúmica fresca do betão ARB foi cerca de 3,5% inferior à do betão de referência. A utilização de ART conduziu a um ligeiro aumento da massa volúmica fresca quando comparado com o betão com ARB, em resultado da remoção de cerca de 20% de pasta aderida no agregado (subcapítulo 3.3.4).

À semelhança do observado nos betões agregados naturais, nos betões com ART ocorreu a mesma tendência de redução de massa volúmica fresca com o aumento da percentagem de incorporação de CRP. Para a incorporação de 15 e 30% de CRP, obteve-se uma redução de massa volúmica fresca de cerca de 1,4 e 3,6%, semelhante ao verificado para os betões com agregados naturais.

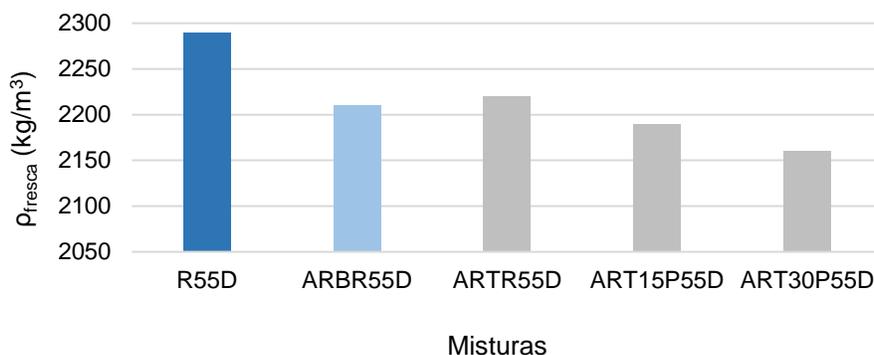


Figura 4.11 - Massa volúmica fresca dos betões com agregados reciclados ARB e ART

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DE BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.2.1 Massa volúmica seca

A massa volúmica seca dos betões produzidos na campanha experimental variou entre 2000 e 2330 kg/m<sup>3</sup>, tendo seguido, em geral, a mesma tendência do observado para a massa volúmica fresca. Nesse sentido, aplicam-se basicamente as mesmas justificações para as tendências observadas.

#### 4.2.1.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

A Figura 4.12 mostra a massa volúmica seca dos betões produzidos em função da percentagem de incorporação de CRP. Para a mesma relação a/l, a massa volúmica seca também só diminuiu até 2,6% com a incorporação de CRP. Além disso, a diferença média entre a massa volúmica fresca e seca foi semelhante nos betões com incorporação de CRP e no betão de referência de igual relação a/l (Tabela 4.1). Isso sugere que o CEM I e o CRP tendem a reter uma quantidade semelhante de água combinada, manifestando semelhante capacidade e nível de hidratação.

Em relação às misturas de igual trabalhabilidade, o betão com 15% CRP e maior relação a/l do que o betão de referência com CEM I apresentou uma massa volúmica seca 4,8% inferior. Neste caso, ocorreu uma maior diferença entre a massa volúmica fresca e seca, devido ao maior volume de água livre no betão 15P62.

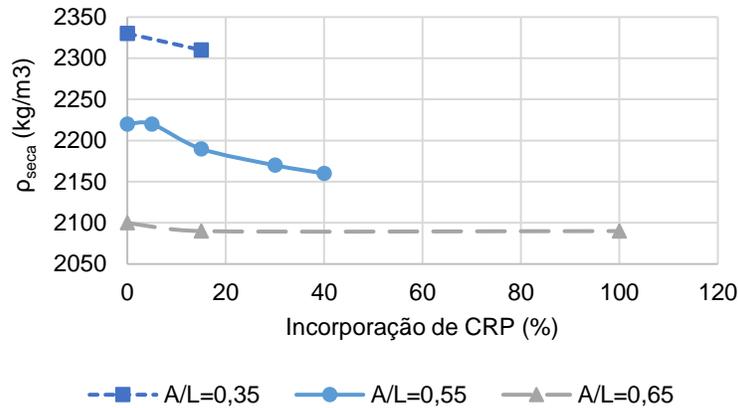


Figura 4.12 - Massa volúmica seca em função da incorporação de CRP

#### 4.2.1.2 Influência do tipo de cimento e adições

A massa volúmica seca seguiu a mesma tendência da massa volúmica fresca, diminuindo com a percentagem de incorporação dos diferentes CR (Figura 4.13). Para a incorporação de 30% de CR, observou-se uma redução de massa volúmica seca de 2,2%, 2,6% e 1,3% para o CRP, CRC e CRS, respetivamente, apresentando diferenças médias entre a massa volúmica fresca e seca semelhantes (Tabela 4.1).

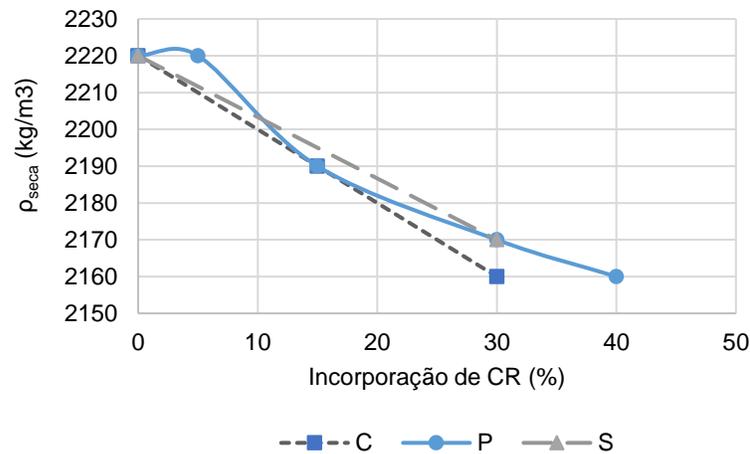


Figura 4.13 - Massa volúmica seca em função do tipo de cimento

Verifica-se a tendência para a massa volúmica seca diminuir com o aumento da percentagem de substituição de cimento por CZ, FC, FB e NT, devido às suas massas volúmicas inferiores à do CEM I, bem como à redução do nível de produtos de hidratação formados (Figura 4.14, Figura 4.15). Ao contrário do observado para o CR, ocorreu uma maior redução na massa volúmica seca dos betões produzidos com estas adições do que o sucedido na massa volúmica fresca. Isso demonstra a baixa reatividade destas adições, em especial dos vários tipos de *filler* estudados, de natureza quase inerte.

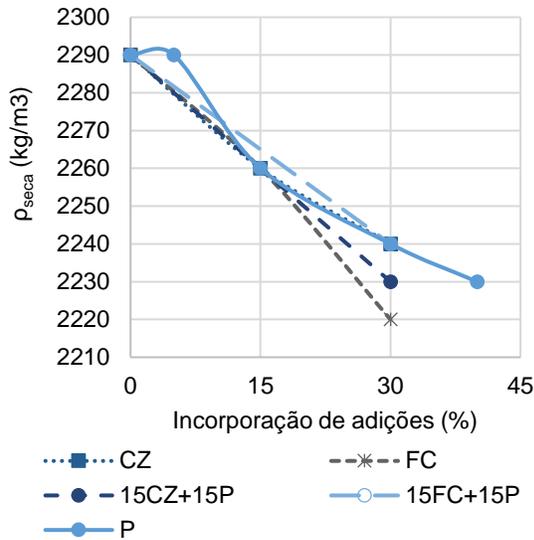


Figura 4.14 - Massa volúmica seca em função da incorporação de adições CZ e FC

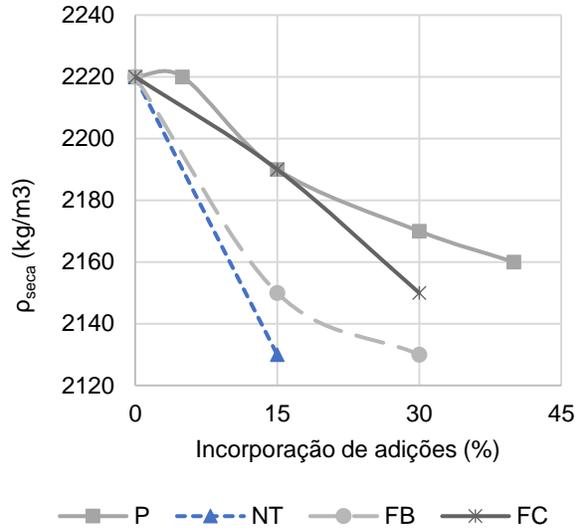


Figura 4.15 - Massa volúmica seca em função da incorporação das adições NT, FB e FC

#### 4.2.1.3 Influência do tipo de agregado

Tal como verificado na massa volúmica fresca, a massa volúmica seca foi mais afetada pela utilização de agregado reciclado do que pela incorporação de CRP (Figura 4.16). No betão com ARB, a massa volúmica seca foi cerca de 6% menor do que a do betão de referência de composição semelhante. Esta diferença foi superior à observada para a massa volúmica fresca (3,5%), pois o devido à porosidade do ARB, a saturação deste agregado durante a mistura faz aumentar a massa volúmica fresca. Essa diferença é reduzida nos betões com ART, pois ao reduzir o teor de pasta aderida, diminui este efeito de absorção. Com a incorporação de 15% e 30% de CRP, observou-se uma redução de massa volúmica seca de cerca de 1% e 2% respetivamente, estando de acordo com as reduções verificadas nos betões com agregados naturais.

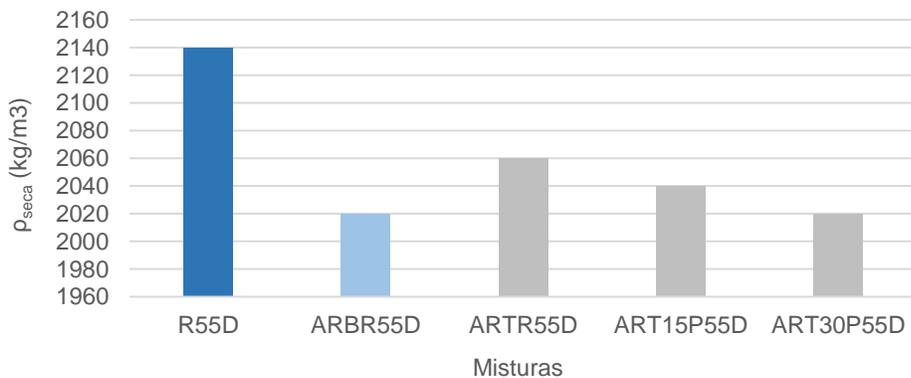


Figura 4.16 - Massa volúmica seca em betões com agregado ARB e ART

#### 4.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão aos 28 dias de idade variou entre 32,8 e 90MPa, dependendo do tipo de ligante e de agregado. Estes betões possuem classes de resistência de C20/25 a C70/85, de acordo com a NP EN 206 (2013), abrangendo uma vasta gama de betões estruturais comuns.

##### 4.2.2.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

Na Figura 4.17 apresenta-se a resistência à compressão aos 28 dias de betões com diferentes relações a/l em função da percentagem de incorporação de CRP. Para a mesma relação a/l, a resistência à compressão não foi influenciada significativamente pela percentagem de incorporação de CRP, mesmo tendo em consideração elevadas percentagens de incorporação, até 100%, o que demonstra o potencial deste novo ligante. Conforme demonstrado em outros estudos (Bogas et al 2020b, Real et al. 2020), o CRP apresenta capacidade de reidratação, gerando produtos de hidratação semelhantes ao CEM I. Desse modo, confirma-se que o cimento reciclado é um ligante de elevada reatividade, que se distingue claramente de grande parte das adições minerais comuns utilizadas na construção e consideradas neste estudo.

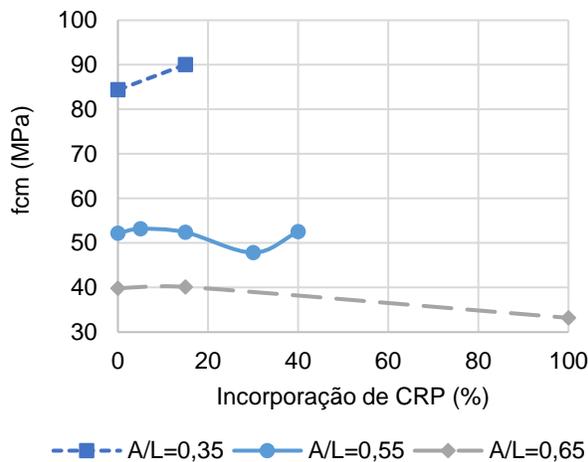


Figura 4.17 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da incorporação de CR e a/l.

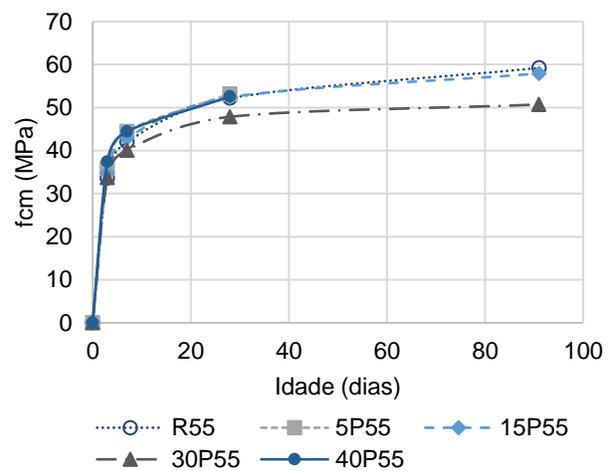


Figura 4.18 – Resistência à compressão, ao longo do tempo, de betões com a/l 0,55 e incorporação de CRP

Para a mesma relação a/l, verifica-se que a resistência à compressão tende a aumentar ligeiramente para percentagens de incorporação de CRP até 15%. O aumento máximo, de cerca de 6,7%, foi atingido no betão com a/l de 0,35. É possível que as partículas mais finas de CRP tenham promovido um efeito *filler* e nucleação, melhorando o desenvolvimento de hidratação e refinamento da microestrutura, devido à sua superfície específica elevada (Qian et al. 2020, Neto 2019, Yu e Shui 2013). Este efeito deve ser mais relevante para as resistências em idades iniciais. Para percentagens de substituição de cimento reciclado de até 15%, Yu e Shui (2013), Letelier et al. (2017) e Qian et al. (2020) também reportaram alterações pouco significativas na resistência à compressão. Neste estudo, a resistência ótima no betão com a/l de

0,55 foi atingida para 5% de incorporação de CRP. Para pastas de cimento com  $a/l$  de 0,3, Yu e Shui (2013) referem que a resistência ideal foi atingida para 5 a 10% de CRP.

Importa salientar a capacidade do CR permitir o desenvolvimento de microestruturas mais refinadas do que o CEM I, principalmente em idades iniciais, até cerca de 28 dias (Carvalho 2020, Bogas et al., 2020b). Na realidade, de acordo com o discutido por Bogas et al. (2020b), ao contrário das pastas com CEM I, a microestrutura das pastas de CR tende a desenvolver-se de acordo com duas fases distintas, uma relacionada com a porosidade interna das próprias partículas anidras de CR e outra relativa à matriz exterior que envolve as partículas. Estas fases serão em diante definidas como microestrutura interpartícula e intrapartícula, respetivamente. Assim, devido à natureza porosa das partículas de CR, parte da água da mistura é absorvida e utilizada no desenvolvimento da microestrutura interpartícula, conduzindo à redução da relação  $a/l$  na matriz que envolve as partículas. Assim, a microestrutura intrapartícula tende a ser mais densa, assemelhando-se a pastas de menor  $a/l$ . Desse modo, apesar da porosidade global ser pelo menos semelhante à das matrizes com CEM I, a microestrutura tende a ser mais densa, compostas por maior número de poros de menor dimensão. De facto, isso foi confirmado por Bogas et al. (2020), tendo em consideração análises de microscopia eletrónica de varredura (MEV) e de microporometria por intrusão de mercúrio (MIP). Para níveis de porosidade semelhante, os autores reportam maior número de poros com dimensão inferior a 50 nm em pastas com CR do que com CEM I. No entanto, a longo prazo, verifica-se também que o CEM I tende a desenvolver mais produtos externos, o que justifica a redução relativa da capacidade dos betões com grande teor de CR face aos betões com CEM I.

De facto, para teores de CRP superiores a 15%, a resistência à compressão tende a diminuir. Como referido, isso pode ser atribuído ao efeito de diluição da quantidade de CEM I, mas também à redução da trabalhabilidade e consequente compactação (aumento de teor de vazios) do betão com incorporação de quantidades elevadas de CRP. Tal como analisado no subcapítulo 3.4.1, pastas produzidas com CRP apresentaram resistência à compressão aos 28 dias cerca de 31% menor do que a das pastas de CEM I de igual  $a/l$ , mostrando menor desenvolvimento de produtos de hidratação a longo prazo do que o CEM I (Figura 3.15). Na verdade, parte da água de mistura é rapidamente consumida na hidratação de produtos internos na estrutura interpartícula (Bogas et al., 2020b). Por outro lado, conforme observado na Tabela 4.1, o volume estimado de vazios tende a aumentar com a percentagem de incorporação de CRP. A elevada necessidade de água de CRP reduz a fluidez do betão, afetando a sua compactação e, consequentemente, a resistência mecânica. De facto, em comparação com o betão de referência, a substituição total do CEM I por CRP no betão com  $a/l$  de 0,65 resultou no aumento do volume de vazios em cerca de 16 L/m<sup>3</sup> (Tabela 4.1) e numa redução de 17% na resistência à compressão aos 28 dias. Além disso, conforme indicado na Tabela 4.1, o volume de vazios aumentou para 15% de incorporação de CRP, o que também contribuiu para a resistência ótima atingida para 5% de CRP.

No entanto, para 40% de incorporação de CRP, observou-se uma tendência inversa, com aumento da resistência à compressão. Para tal contribuiu a incorporação de elevadas quantidades de SP, tendo dispersado de forma mais efetiva, não apenas as partículas aglomeradas de CRP, mas também o CEM I. Desse modo, o crescimento dos produtos de hidratação é mais eficaz e ocorre de forma mais homogênea, compensando os efeitos negativos anteriormente mencionados. Para além disso, a adição de SP permite contrariar a menor trabalhabilidade e maiores dificuldades de compactação dos betões com CR, associados a maior exigência de água. Estes aspetos permitem também explicar a menor redução de resistência obtida com 100% de incorporação de CRP no betão do que em pastas de cimento produzidas por Real et al. (2020) sem adição de SP.

Por outro lado, conforme mencionado, o CRP tendeu a ser mais eficiente em betões com menor relação a/l. A incorporação de 15% de CRP resultou num aumento de 6,7%, 0,5% e 0,8% da resistência à compressão aos 28 dias em relação ao betão de referência, para os betões com relação a/l de 0,35, 0,55 e 0,65, respetivamente. Mais uma vez isso está relacionado com a incorporação de SP nos betões de menor a/l, o que permitiu facilitar a compactação do betão (teor de vazios semelhante ao do betão de referência, Tabela 4.1) e ainda promoveu a melhor desaglomeração e contribuição mais efetiva das partículas do cimento CRP.

A Figura 4.19 mostra a evolução da resistência à compressão do betão R55 de referência assim como da mistura de igual trabalhabilidade 15P62, de a/l 0,62 e incorporação de 15% de CRP. Com o aumento da relação a/l, em cerca de 13%, a resistência à compressão aos 28 dias diminuiu 13,5% em relação ao betão com R55.

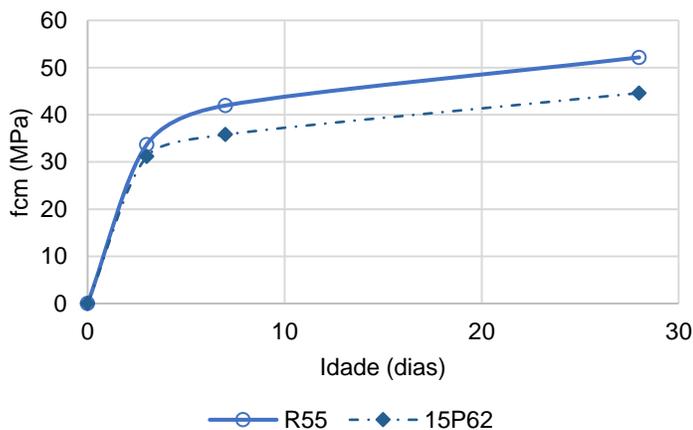


Figura 4.19 - Resistência à compressão para misturas de igual trabalhabilidade

De salientar, que para percentagens de incorporação de CRP entre 5 e 100%, foi possível produzir betões estruturais da classe C25/30 a C70/85. Inclusivamente, mesmo tendo em conta elevadas relações a/l, entre 0,55 e 0,65, betões com 40% e 100% de CRP, atingiram classes de resistência C35/45 e C25/30, respetivamente. Isso significa, que é possível produzir betões correntes utilizando níveis elevados de

substituição de CR por CEM I, superiores aos usualmente considerados nos cimentos compostos normalizados na NP EN 197-1 (2012). Mais se acrescenta, que mesmo os betões com 40% de substituição, foram produzidos apenas com cerca de 220 kg/m<sup>3</sup> de cimento, o que implica um passo importante para a produção de betões de maior sustentabilidade. De acordo com o estudo de Guedes (2020), cada kg de CR em substituição de CEM I pode significar uma redução superior a 60% no nível de emissões de CO<sub>2</sub>. Desse modo, em betões com 40% e 100% de substituição, isso significa uma redução superior a cerca de 60 kg e 150 kg de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de betão produzido, respetivamente. Isso pode significar uma redução de cerca de 20% e 50% nas emissões de CO<sub>2</sub> do betão, respetivamente.

#### 4.2.2.2 Influência do tipo de cimento e adições

A Figura 4.20 mostra a resistência à compressão dos betões produzidos com diferentes tipos de cimento em função da percentagem de incorporação. Tal como sucedeu com o CRP, a incorporação de até 15% CRC não afetou significativamente a resistência à compressão. Porém, a incorporação de 30% de CRC conduziu a uma redução de cerca de 14% face ao betão de referência. Como referido, os betões com este cimento, ao estarem contaminados com cerca de 26% de agregado, apresentam uma relação água/ fração cimentícia superior à do CRP, nomeadamente 0.57 e 0.6 para 15% e 30% CRC, respetivamente. Apesar desta variação ser pouco relevante para 15% de CRC, assume alguma importância para 30% de CRC. A ligeira redução de a/l no caso de 15% de CRC, terá sido compensado pelo efeito de *filler* e nucleação proporcionado por este ligante.

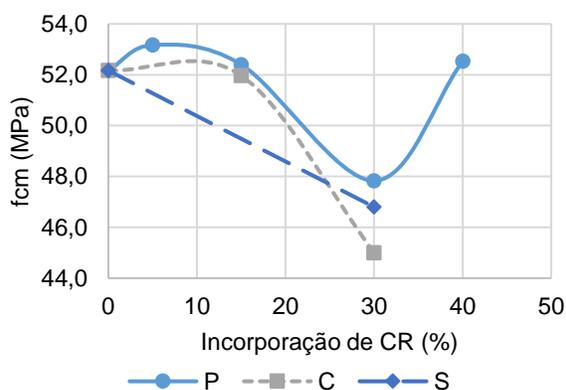


Figura 4.20 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em função do tipo de cimento

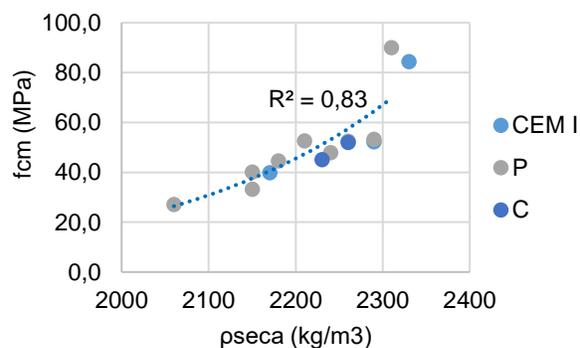


Figura 4.21 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em função da massa volúmica seca

A incorporação de 30% de CRS (CR proveniente de pasta de maior compactidade) resultou na diminuição de cerca de 10% na resistência à compressão, sendo ligeiramente inferior à dos betões com 30% CRP (Figura 4.20). O teor de ar ligeiramente superior nestes betões aliado à menor porosidade e à superfície específica do CRS, que aumenta a relação a/l intrapartícula, deverão ser as principais razões para esta redução de resistência adicional. Esta tendência está igualmente de acordo com a menor reatividade e maior tempo de início e fim de presa das pastas produzidas com CRS do que com CRP (Tabela 3.10).

Na Figura 4.21, é possível observar uma boa correlação entre a massa volúmica seca e a resistência à compressão aos 28 dias, dado que ambas as propriedades são afetadas pela porosidade do betão, que depende principalmente da relação a/l, e em segundo plano, do volume de vazios e do tipo de ligante.

A Figura 4.22 apresenta a resistência à compressão aos 28 dias de idade dos betões produzidos com diferentes adições (para a/l de 0,55), assim como a incorporação conjunta de adição e CR, em função da percentagem de incorporação. Face ao betão de referência aos 28 dias de idade, os betões com 30% de incorporação de CZ e FC apresentaram um decréscimo do  $f_{cm}$  de cerca de 26% e 35%, respetivamente. Assim, confirma-se que estas adições minerais manifestaram muito menor reatividade do que qualquer um dos CR considerados neste estudo. A baixa reatividade aos 28 dias da cinza utilizada neste trabalho está de acordo as propriedades determinadas e indicadas na Tabela 3.8, em que esta apresentou um limite de atividade de apenas 75%, que coincide com a exigência mínima definida na NP EN 450-1 (2012). Desse modo, será de esperar o desenvolvimento de mais produtos de hidratação em idades mais avançadas, dando tempo ao desenvolvimento das reações pozolânicas lentas das cinzas volantes. De facto, o contributo das CZ foi maior aos 90 dias, com as misturas de 30CZ55 a atingiram 85% da resistência à compressão do betão de referência (R55) (Tabela 4.1).

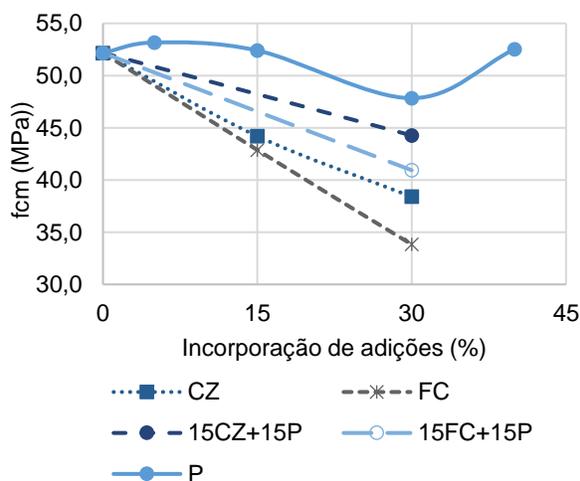


Figura 4.22 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade das misturas com adições CZ e FC

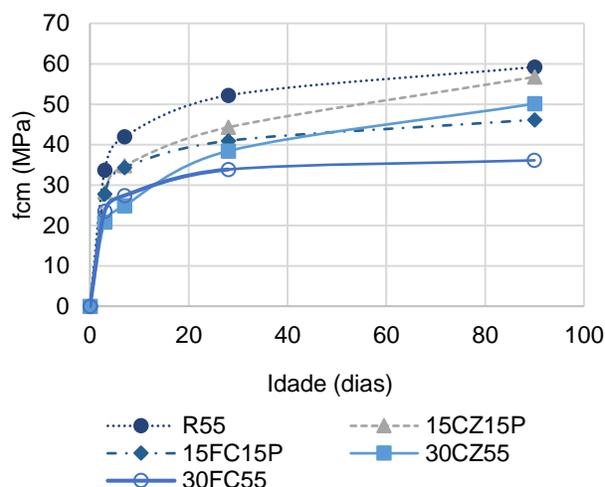


Figura 4.23 - Resistência à compressão em função das adições CZ e FC

Por sua vez, o *filler* FC, FB e NT têm uma natureza quase inerte, podendo contribuir apenas pelo seu efeito físico de *filler* e nucleação, o que justifica a sua baixa contribuição para a resistência mecânica (Figura 4.24). Nesta propriedade verificaram-se diferenças pouco significativas entre os diferentes tipos de *filler*. Desse modo, qualquer uma das adições referidas vai implicar uma diluição do teor de clínquer nas misturas, com conseqüente redução da resistência à compressão.

Ainda assim, tanto a CZ como qualquer um dos tipos de *filler* contribuiu para o aumento de resistência à compressão, como material de adição. De facto, se por absurdo considerar-se que estas adições funcionam como micro areia, para 15% de substituição a relação a/l de 0,55 corresponde a uma relação

a/c equivalente de 0,65. Finalmente, comparando os valores de resistência nos betões com 15% de CZ ou 15% de *filler* com o do betão de referência R65 (a/l de 0,65), confirma-se que esta é superior (Tabela 4.1).

As misturas ternárias 15CZ+15P e 15FC+15P permitiram aumentar a resistência à compressão em 15% e 21% face às misturas com 30% de CZ e FC, respetivamente. No entanto, conduziram a resistências inferiores ao dos betões com 30% de CRP. Assim, confirma-se o maior potencial do CRP como material de adição do que a CZ e os vários tipos de *filler*. No entanto, não é possível confirmar uma possível maior reatividade da CZ na presença do CRP do que quando apenas na presença de CEM I, conforme sugerido por Gouveia (2019). De facto, a maior disponibilidade de CaO livre no CRP em idades iniciais poderia fomentar uma reatividade mais rápida nas CZ.

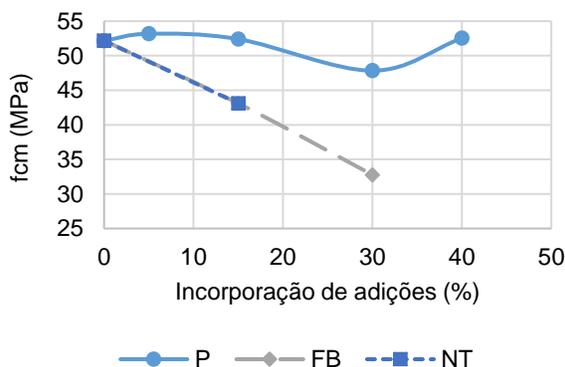


Figura 4.24 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade dos betões com FB, NT e CRP

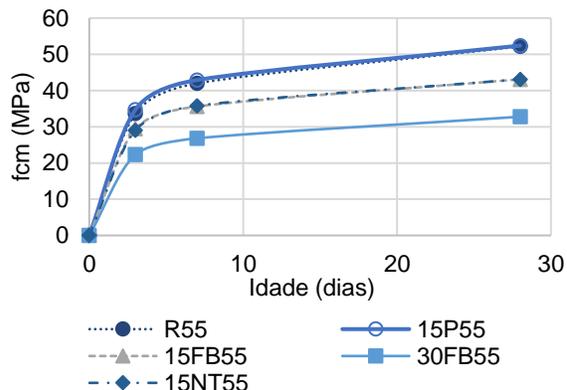


Figura 4.25 - Resistência à compressão em função das adições FB, NT e CRP, ao longo do tempo

#### 4.2.2.3 Influência do tipo de agregado

A Figura 4.26 compara a resistência à compressão dos betões produzidos com agregado ARB e ART face ao betão de referência com apenas AN.

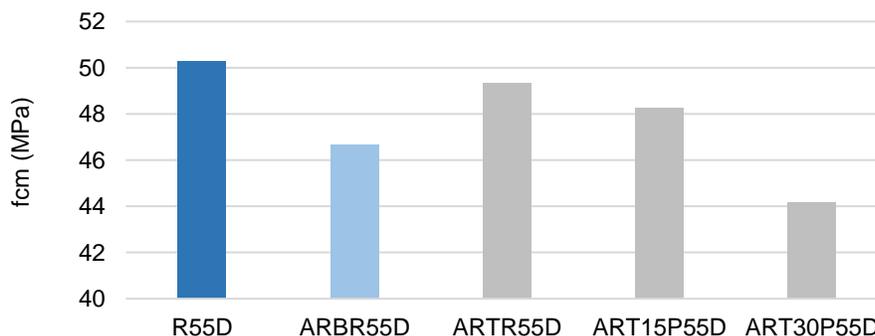


Figura 4.26 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do agregado e incorporação de CRP

Verifica-se que o betão com ARB apresentou uma resistência à compressão apenas cerca de 7% menor do que a do betão de referência. De facto, os ARB são compostos por pasta e agregado e apesar

de a relação a/c da pasta neste agregado ser idêntica à da matriz do betão em que este está incorporado, o seu processo de produção (britagem) pode ter reduzido a qualidade da pasta. De facto, é de esperar que após a ação de britagem do ARB, a pasta aderida possa ser depreciada (microfissurada) e reduzir as suas propriedades mecânicas.

Por outro lado, o betão ARTR55D apresentou uma redução muito menos significativa da resistência à compressão, atingindo cerca de 98% da resistência do betão R55D. Conforme referido, o processo térmico de beneficiação aplicado ao ART permitiu remover cerca de 20% do teor de pasta aderida, o que foi suficiente para melhorar significativamente a resistência à compressão do betão reciclado. Em face da importante melhoria observada para uma redução não muito elevada de teor de pasta, é ainda possível que a pasta removida, de mais fácil eliminação, seja a de qualidade inferior. Desse modo, confirma-se a importância e efetividade do método de tratamento utilizado para melhoria da qualidade dos agregados reciclados.

Tal como analisado para os betões com agregados naturais, a resistência à compressão dos betões com ART não foi significativamente influenciada pela incorporação de até 15% de CRP. Apenas para 30% de CRP ocorreu uma redução de cerca de 10% na resistência, que foi independentemente do tipo de agregado utilizado (Figura 4.26). Conforme indicado na Tabela 4.1, o maior volume de vazios estimado nos betões com 30% de CRP terá contribuído para estes resultados, tal como já tinha influenciado a resistência nos betões com AN. Uma vez mais, isso é atribuído à elevada exigência de água do CRP, que reduz a fluidez do betão, afetando a sua compactação e, conseqüentemente, a sua resistência mecânica.

#### 4.2.3 Resistência à tração

As resistências à tração aos 28 dias de idade dos betões produzidos na campanha experimental variaram entre 2,2 e 5,5 MPa, tendo sido essencialmente afetada pela relação a/l. Em geral, a resistência à tração seguiu uma tendência semelhante à observada para a resistência à compressão, atribuindo-se as mesmas justificações referidas no subcapítulo 4.2.2. Tal como referido e observado na Tabela 4.1, salienta-se a maior variabilidade desta propriedade, cujo ensaio envolve apenas um plano de corte (diminuindo a sua representatividade) e a rotura ocorre de forma frágil sem desenvolvimento de deformação plástica e, como tal, implicando fraca capacidade de redistribuição de tensões (Bogas e Nogueira, 2014).

##### 4.2.3.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

Na utilização do CRP, a resistência máxima à tração foi obtida para 15% de incorporação, para a relação a/l de 0,55 e 0,65. Inclusivamente, para a mesma relação a/l, a resistência à tração do betão com 15% de CRP foi até 15 a 28% superior à do betão de referência (Figura 4.27). A exceção ocorreu para o betão com a/l de 0,35, cuja resistência à tração foi semelhante. Neste betão de elevada resistência e

comportamento frágil, pequenas diferenças na resistência à compressão entre diferentes composições, tem pouco significado na resistência à tração (da ordem de grandeza da variabilidade do ensaio).

No entanto, tal como sucedeu na resistência à compressão, a resistência à tração do betão com 30% de CRP foi certa de 8% inferior à do betão de referência com o mesmo  $a/l$  de 0,55. Pelas mesmas razões referidas no subcapítulo 4.2.2, a tendência decrescente da resistência com o aumento da percentagem de incorporação de CRP inverteu-se no betão 40P55, associado a elevado teor de SP.

No betão 100P65, produzido com 100% de CRP e  $a/l$  de 0,65, foi observada a maior redução de resistência à tração em relação ao betão de referência (19%). Ainda assim, tal como observado para a resistência à compressão, confirma-se que a resistência mecânica não é significativamente afetada pela incorporação de cimento reciclado em substituição de cimento, desde que para elevados teores de CRP se preveja a utilização de SP de modo a compensar a elevada exigência de água e elevada aglomeração deste ligante. Mais uma vez, demonstra-se a elevada potencialidade do cimento reciclado, com adequada capacidade de reidratação após termoativação.

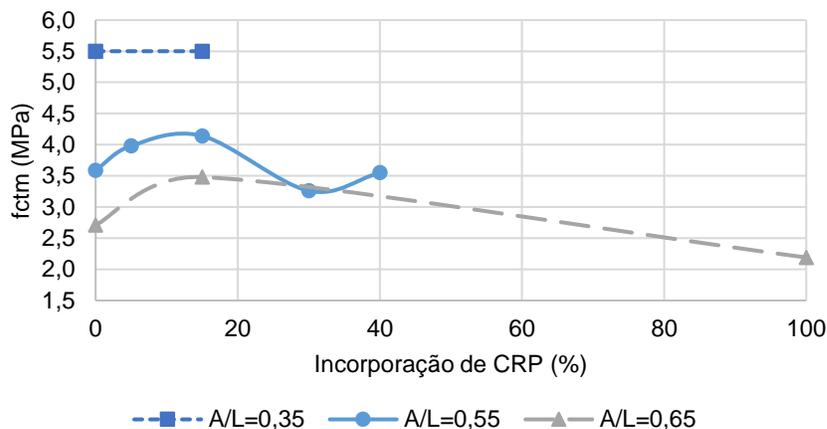


Figura 4.27 - Resistência à tração aos 28 dias em função da percentagem de incorporação de CRP

Mesmo tendo em consideração misturas de idêntica trabalhabilidade, sem SP, a resistência à tração dos betões com 15% CRP foi apenas 3% superior no betão de referência. Neste caso, o ligeiro aumento na relação  $a/c$  efetiva do betão com 15% de CRP de igual trabalhabilidade ( $a/l$  de 0,62), é compensado pela maior eficiência e adensamento da microestrutura atingida após adição de pequenas dosagens de cimento reciclado.

#### 4.2.3.2 Influência do tipo de cimento e adições

A Figura 4.28 mostra a resistência à tração dos betões produzidos com CRP, CRC e CRS para as diversas percentagens de incorporação. A incorporação do CRC apresentou uma tendência muito similar à do CRP, apresentando a máxima resistência à tração para 15% de incorporação. Para 30% de CRC, a redução de resistência à tração foi inferior a 10% e idêntica à obtida no betão com 30% de CRP, apesar

de, como referido, este apresentar-se contaminado com agregado. Conclui-se assim que, em face da variabilidade do ensaio e da pequena diferença de composição entre os betões, a utilização de até 30% de cimento reciclado proveniente de betão em lugar de CRP não afetou de forma significativa a resistência à tração do betão.

A redução de resistência obtida para 30% de CRC, cujo a/c efetivo devido à contaminação de agregado foi de 0,60, foi ligeiramente superior ao obtido para o betão com 15P62, de maior relação a/c (0,62), concluindo-se que a resistência à tração foi menos afetada pela alteração da relação a/l do que a resistência à compressão.

Tal como observado na resistência à compressão, o betão com 30% de CRS apresentou um menor desempenho do que o betão com igual teor de CRP. A mesma justificação pode ser atribuída para esta tendência, nomeadamente o facto deste cimento ter manifestado reatividade mais lenta.

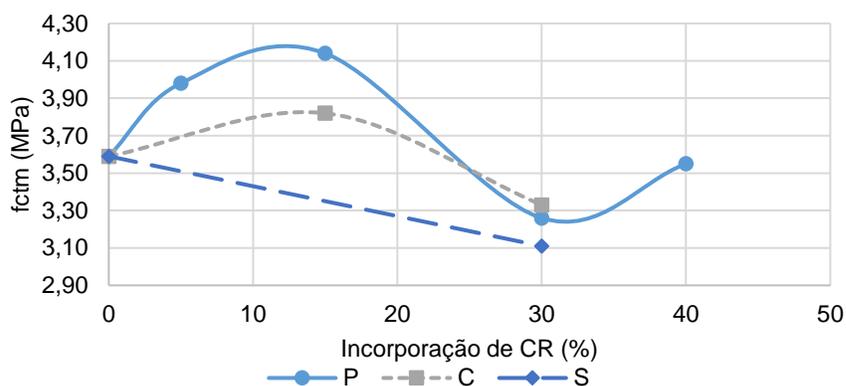


Figura 4.28 - Resistência à tração aos 28 dias em função do tipo de cimento

A Figura 4.29 mostra a resistência à tração aos 28 dias de idade dos betões produzidos com diferentes adições, assim como a incorporação conjunta de adição e CR, em função da percentagem de incorporação.

Para 15% de incorporação, a CZ confirmou a sua maior reatividade face ao FC, conduzindo a muito menores reduções de resistência face ao betão de referência R55 e ao betão de igual teor de CRP. Ainda assim, mesmo o betão com 15% de FC atingiu maior resistência à tração do que o betão de referência R65, de igual relação a/c equivalente, o que confirma a contribuição positiva destas adições para esta propriedade. Salienta-se ainda, mais uma vez, a maior potencialidade do cimento reciclado na substituição do CEM I, apresentando inclusivamente maior eficiência do que o CEM I.

Tendo em consideração a maior reatividade das cinzas volantes, confirmada para 15% de substituição e nos resultados de resistência à compressão, seria de esperar uma maior diferença entre os betões com 30% de CZ e os restantes betões com iguais teores de *filler*, FC ou FB (Tabela 4.1, Figuras 4.29 e 4.30). Como se sabe, uma dada variação na resistência à compressão tem menor importância na resistência à

tração, visto que  $f_{ctm}$  relaciona-se com  $f_{cm}^{1/2}$  a  $f_{cm}^{2/3}$  (EN1992-1-1 2004 , ACI 318 2019). Desse modo, sabendo que a resistência à compressão do betão com 30% de CZ foi cerca de 14% superior ao dos betões com as restantes adições, para a relação referida, a resistência à tração seria apenas 7% superior, o que está dentro da variabilidade observada para este ensaio.

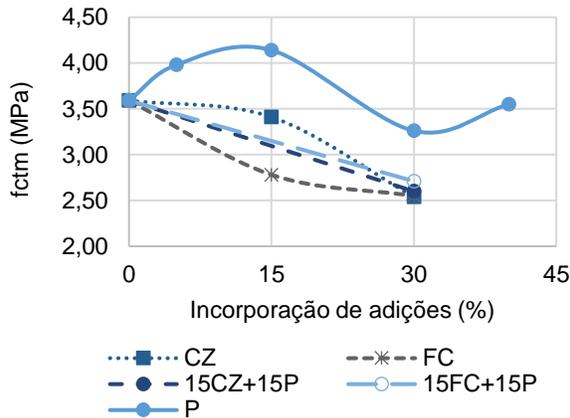


Figura 4.29 - Resistência à tração aos 28 dias em função da incorporação de adições CZ, FC e CRP

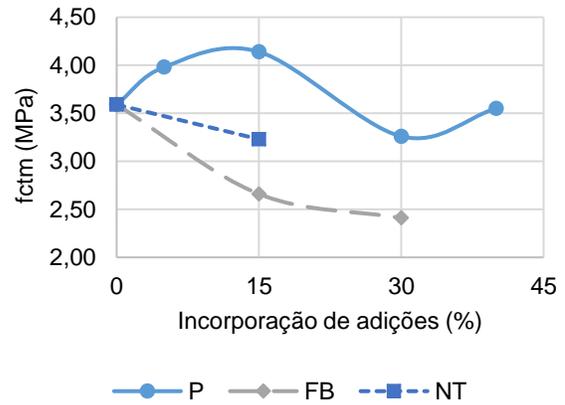


Figura 4.30 - Resistência à tração aos 28 dias em função da incorporação de adições FB, NT e CRP

Ao contrário do observado na resistência à compressão, a incorporação de CRP nas misturas 15CZ+15P e 15FC+15P resultou em resistências à tração semelhantes às obtidas para a incorporação de 30% de CZ ou FC (Figura 4.29). Assim, não se confirmou uma ação sinérgica benéfica resultante da adição simultânea destas adições.

Comparando os diferentes tipos de *filler* entre si, ao contrário do observado para a resistência à compressão, verificou-se um desempenho ligeiramente superior do NT face ao FC e FB, os quais conduziram a decréscimos de resistência à tração idênticos (Figuras 4.29 e 4.30). Face ao betão de referência, a redução de resistência foi de cerca de 11%, 23% e 26% para 15% de incorporação de NT, FC e FB, respetivamente. Conforme mencionado, a incorporação destas adições leva à diminuição da quantidade total de produtos de hidratação, devido à sua baixa reatividade.

A EN 1992-1 (2004) sugere as equações (1) e (2) para a estimativa da resistência à tração,  $f_{ctm}$ , em função da resistência à compressão e da massa volúmica seca do betão. Nestas equações, a resistência à compressão em provetes cilíndricos,  $f_{cm,cil}$ , foi determinada com base na relação entre esta e a resistência à compressão em provetes cúbicos proposta na EN 1992-1 (2004). Por sua vez, admite-se que a resistência à tração axial,  $f_{ctm}$ , (obtida das equações 1 e 2) corresponde a cerca de 90% da resistência à tração por compressão diametral (Bogas e Nogueira, 2014). Em geral, verifica-se que as equações propostas na norma europeia foram capazes de prever de forma razoável a resistência à tração experimental, independentemente do tipo de ligante. Verifica-se apenas que existe uma ligeira subestimativa da resistência à tração nos betões de maior resistência à compressão (Figura 4.31).

$$f_{ctm} = 0.30 \times (f_{cm,cil} - 8)^{\frac{2}{3}} \times \left[ 0.4 + \frac{0.6\rho_{seca}}{2200} \right] \quad \text{para } 20 < f_{cm,cil} < 68 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \times \ln\left(\frac{1 + f_{cm,cil}}{10}\right) \times \left[ 0.4 + \frac{0.6\rho_{seca}}{2200} \right] \quad \text{para } f_{cm,cil} > 68 \text{ MPa} \quad (2)$$

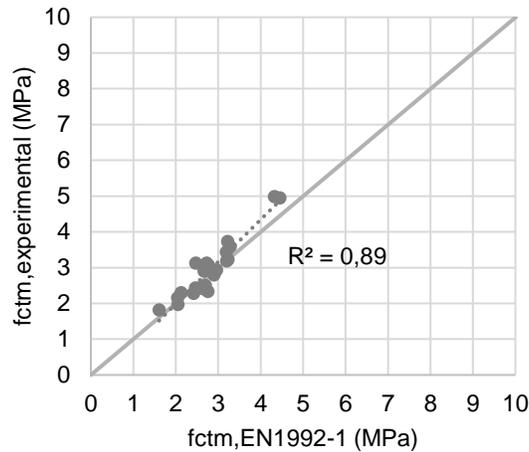


Figura 4.31 – Comparação entre os resultados experimentais de resistência à tração aos 28 dias de idade e valores estimados pela EN 1992-1 (2004)

#### 4.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade aos 28 dias de idade variou entre 35,3 e 40 GPa, dependendo do tipo de ligante. Note-se que esta propriedade foi apenas analisada nos betões com a/l de 0,55.

Na Figura 4.33 apresenta-se o módulo de elasticidade dos betões produzidos com CRP e CRS para diferentes percentagens de incorporação. Verifica-se que o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da percentagem de incorporação de CRP, seguindo uma tendência diferente do observado para resistência à compressão, em que esta aumentou até 15% de CRP (subcapítulo 4.2.2.1). Conforme reportado por Yu e Shui (2013), as partículas porosas de CR apresentam menor dureza e rigidez do que as de CEM I. Isso explica o módulo de elasticidade ligeiramente inferior no betão 15% de CRP face ao betão de referência, de idêntica resistência à compressão (Tabela 4.1). Para percentagens de incorporação superiores, até 30% de CRP, verificou-se uma redução mais acentuada e não proporcional do módulo de elasticidade, que foi cerca de 3 vezes maior do que obtido para 15% de CRP. Isso justifica-se pelo facto do betão com 30% de CRP ter apresentado menor compacidade e menor resistência à compressão do que o R55. Além disso, os betões produzidos com CRP foram produzidos com um volume de pasta ligeiramente superior ao betão de referência de igual relação a/l (Tabela 3.11), o que também contribuiu para a redução do módulo de elasticidade. No entanto, esta variação do volume de pasta não foi significativa, em especial para teores baixos de CRP, até 15%.

Tal como para as restantes propriedades mecânicas analisadas no presente trabalho, o módulo de elasticidade do betão com 30% de CRS foi ligeiramente menor do que o obtido no betão com a mesma percentagem de incorporação de CRP, observando-se um decréscimo de 11% em relação ao betão de referência. A menor reatividade deste ligante face ao CRP terá conduzido a matrizes cimentícias de menor rigidez. A reduzida diferença entre betões, inferior a 1 GPa, justifica-se também pela baixa percentagem de incorporação de cimento reciclado, com impacto pouco significativo na resistência mecânica dos betões (subcapítulos 4.2.2 e 4.2.3).

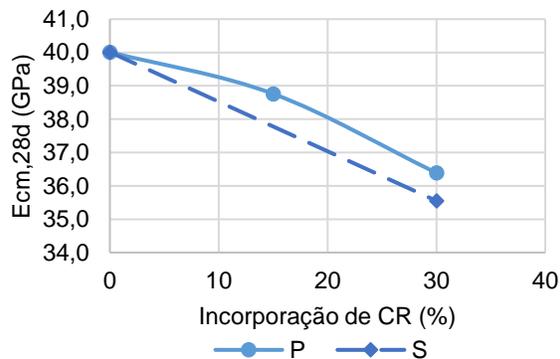


Figura 4.32 - Módulo de elasticidade aos 28 dias, para  $a/l=0,55$ , em função da percentagem de incorporação de CRP e CRS

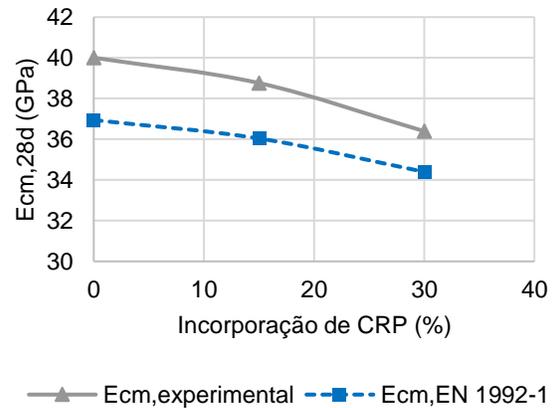


Figura 4.33 - Módulo de elasticidade aos 28 dias,  $E_{cm,28d}$ , do betão com  $a/l$  de 0,55 e diferentes percentagens incorporação de CRP e valores estimados pela EN 1992-1 (2004)

Na EN 1992-1 (2004) é sugerida a equação (3) para estimar o módulo de elasticidade em função da resistência à compressão em provetes cilíndricos,  $f_{cm,cil}$ , e a massa volúmica seca,  $\rho_{seca}$ , do betão. Tal como referido para a resistência à tração,  $f_{cm,cil}$ , foi estimado a partir da resistência à compressão média em provetes cúbicos de acordo com a relação proposta na EN 1992-1 (2004). Verifica-se que a expressão proposta na norma conduz a estimativas conservativas, tendo-se determinado módulos de elasticidade 6 a 8% inferiores aos obtidos experimentalmente. Porém, a expressão seguiu a tendência dos resultados experimentais (Figuras 4.32 e 4.33).

$$E_{cm} = 22000 \times \left(\frac{f_{cm,cil}}{10}\right)^{0.3} \times \left(\frac{\rho_{seca}}{2200}\right) \quad \text{para } 20 < f_{cm,cil} < 98 \text{ MPa} \quad (3)$$

Na Figura 4.33 apresenta-se o módulo de elasticidade dos betões produzidos 15% CZ e 15% FC face aos betões com CRP. Tal como sucedeu na resistência mecânica, a CZ contribuiu para uma menor redução do módulo de elasticidade do betão do que o FC, que apresenta natureza quase inerte e baixa capacidade de desenvolvimento de produtos de hidratação adicionais, capazes de densificar a matriz cimentícia e aumentar a sua rigidez. Como seria de esperar e analogamente constatado nas restantes propriedades mecânicas analisadas, o CRP foi bastante mais eficiente do que estas adições minerais

correntemente utilizadas na indústria da construção, conduzindo a variações pouco significativas do módulo de elasticidade face ao betão de referência R55, pelo menos para teores de CRP até 15%.

A mistura ternária constituída por 15% CZ e 15% CRP conduziu a uma redução intermédia do módulo de elasticidade face aos betões com apenas igual teor de CZ ou CRP.

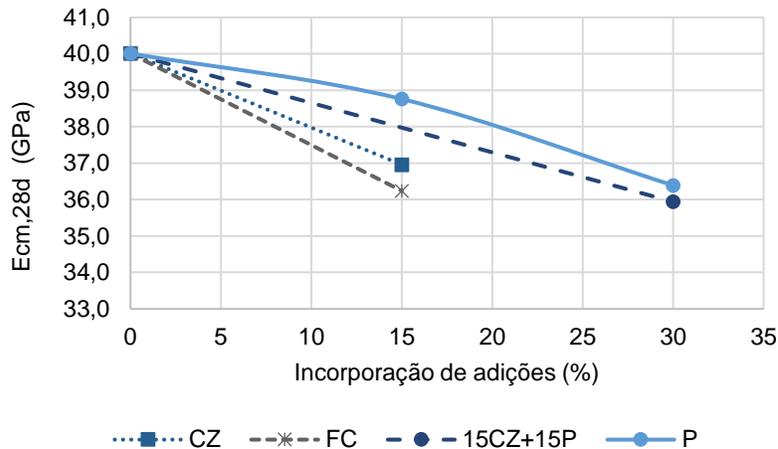


Figura 4.34 - Módulo de elasticidade aos 28 dias, para  $a/l=0,55$  em função da incorporação de adições CZ, FC e CRP

#### 4.2.5 Velocidade de ultrassons

A velocidade de ultrassons ( $V_{us}$ ) medida aos 28 dias de idade dos betões produzidos na campanha experimental variaram entre 4330 e 5268 m/s, tendo sido essencialmente afetada pela relação  $a/l$  e tipo de agregado utilizado. De maneira geral, a  $V_{us}$  seguiu uma tendência semelhante à observada para a resistência à compressão.

##### 4.2.5.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

A  $V_{us}$  é essencialmente afetada pela sua massa volúmica e rigidez, podendo considerar-se que a equação (4) é aplicável, em que  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico,  $\rho$  é a massa volúmica seca e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson (Mindess et al. 2003, Bogas 2012).

$$V_{us} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (4)$$

Por esse motivo, a  $V_{us}$  foi essencialmente influenciada pela relação  $a/l$ , assumindo maior importância do que o teor de ligante, que afeta de forma menos significativa a rigidez e massa volúmica do betão.

Por sua vez, a rigidez e a massa volúmica são diretamente controladas pela microestrutura do betão, que se relaciona com a resistência à compressão. Desse modo, a curva de evolução da  $V_{us}$  em função da percentagem de incorporação de CRP seguiu a mesma tendência do observado para a resistência à

compressão. De facto, a  $V_{us}$  aumentou até percentagens de 15% de substituição e diminuiu para percentagens de incorporação de CRP mais elevadas. No entanto, conforme observado nos subcapítulos 4.2.4 e 4.2.1, tanto o módulo de elasticidade como a massa volúmica decresceram com o aumento da percentagem de incorporação de CRP. Isso permite explicar a redução contínua de  $V_{us}$  com a substituição de CEM I por CRP nos betões com  $a/l$  de 0,65, bem como a variação pouco significativa da  $V_{us}$  com a incorporação de CRP nos betões com  $a/l$  de 0,55 (Figura 4.35).

Assim, exceto para reduzidas percentagens de incorporação, até 15% de CRP, em que ocorreu uma densificação da microestrutura (betões com  $a/c$  de 0,55 e 0,35, subcapítulo 4.2.2), a  $V_{us}$  tendeu a decrescer com o aumento de CRP, quer devido ao aumento do volume de vazios nestas misturas, quer devido ao decréscimo de rigidez da matriz cimentícia, derivado da natureza porosa das partículas de CRP. Conforme discutido em Bogas et al. (2020b), apesar de poder ocorrer um refinamento da matriz cimentícia devido à redução da relação  $a/l$  na região intrapartícula, a porosidade global tende a ser superior à da pasta com apenas CEM I. De qualquer forma, pode concluir-se que a incorporação de CRP teve uma influência pouco significativa na variação da  $V_{us}$ , tendo-se registado variações máximas de 2% entre betões.

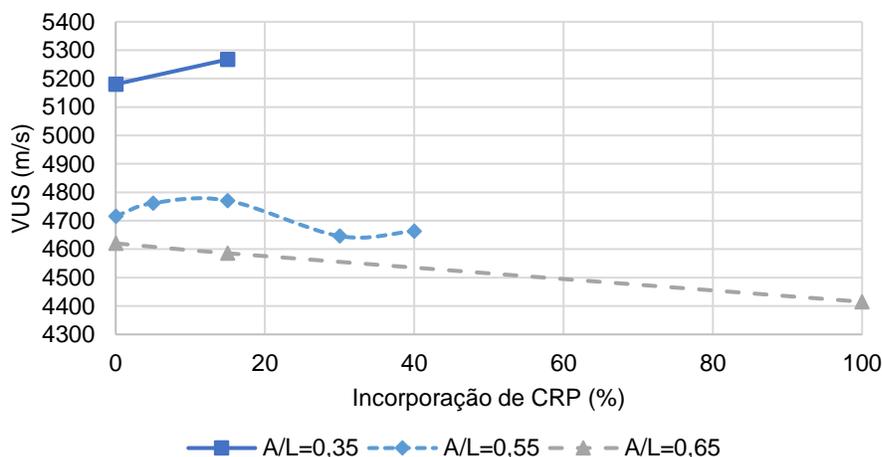


Figura 4.35 - Velocidade de propagação de ultrassons em função da incorporação de CRP

Em betões de idêntica trabalhabilidade, a  $V_{us}$  do betão de referência ( $a/l$  de 0,55) foi apenas 1,4% superior ao do betão com 15% de CRP e  $a/l$  de 0,62. Esta pequena variação para um aumento de 13% na relação  $a/l$  justifica-se pelo facto de a  $V_{us}$  variar aproximadamente com a raiz sexta da resistência à compressão. De facto, tendo em consideração a equação (4) e assumindo que o módulo de elasticidade do betão é proporcional a  $f_{cm}^{0,3} \cdot \rho^2$ , conforme o sugerido na EN 1992-1-1 (2004), então a  $V_{us}$  relaciona-se com esta propriedade de acordo com a equação (5) (Bogas et al., 2013).

$$V_{us} \approx k \cdot f_{cm}^{0,15} \cdot \rho^{0,5} \quad (5)$$

Tendo em consideração a equação (5), a redução de 14,5% na resistência à compressão entre o betão R55 e 15P62, corresponde a uma diminuição inferior a 1,5% em  $V_{us}$ , o que está de acordo com o observado no presente estudo.

#### 4.2.5.2 Influência do tipo de cimento

Os betões com cimento CRC apresentaram valores muito próximos dos atingidos nos betões com igual percentagem de incorporação de CRP. A relação água/fração cimentícia equivalente ligeiramente maior destes betões foi parcialmente compensada pelo aumento de massa volúmica do ligante, devido à sua contaminação com agregado, o que torna os valores da  $V_{us}$  muito próximos entre as diferentes misturas.

Ao contrário do observado na resistência mecânica, os betões com 30% de CRS apresentaram uma  $V_{us}$  ligeiramente mais elevada do que as misturas com 30% de CRP (Figura 4.36), o que se pode justificar pela maior rigidez das partículas de CRS provenientes de resíduos de pastas de maior compacidade, e portanto, associadas a menor porosidade e maior massa volúmica, o que compensou a eventual menor reatividade e menor desenvolvimento de produtos de hidratação deste ligante.

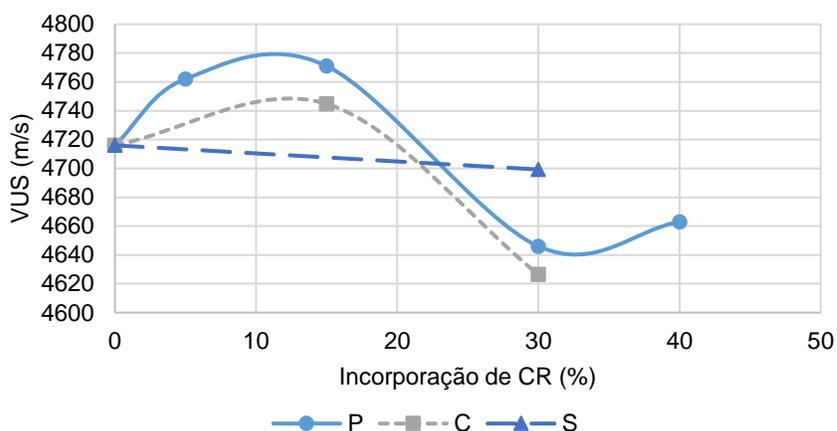


Figura 4.36 - Velocidade de propagação de ultrassons para betões com cimentos CRP, CRC e CRS

#### 4.2.5.3 Influência do tipo de adição

A velocidade de ultrassons dos betões com FC foi naturalmente inferior à dos betões com igual percentagem de incorporação de CRP. Neste caso, a matriz cimentícia apresenta menor rigidez, resultante do não desenvolvimento de produtos de hidratação. O ligeiro aumento de volume de pasta com a incorporação destas adições de menor massa volúmica também contribui para a redução de rigidez e da  $V_{us}$  dos betões. Neste caso, os betões com *filler* calcário (FC) e *filler* de betão (FB) apresentaram uma  $V_{us}$  ligeiramente superior à do betão com NT (Figuras 4.37 e 4.38), visto que o FC e o FB contêm agregado na sua constituição, aumentando a sua massa volúmica. No betão 15NT55, a  $V_{us}$  foi mais próxima da

mistura com a/l de 0,65 e 100% de CRP, visto que para 15% de NT, o a/l de 0,55 corresponde a uma relação a/c equivalente de 0,65 (mas ainda assim associada a menor volume de pasta).

Por sua vez, nos betões com igual percentagem de substituição de CZ, a  $V_{us}$  foi superior à dos betões com *filler* (Figura 4.37), visto que estes têm uma maior reatividade e contribuem mais para o incremento de rigidez da matriz cimentícia. No entanto, não era esperado que em face dos resultados obtidos para a resistência à compressão, a  $V_{us}$  aumentasse com a percentagem de incorporação de CZ, verificando-se inclusivamente que para 30% de CZ, a  $V_{us}$  foi semelhante à dos betões com 30% de CRP. Para tal, terá contribuído a maior compactidade atingida nestes betões, associados a menor teor de vazios acidentais e maior massa volúmica seca (Tabela 4.1). As misturas ternárias com CRP e CZ ou CRP e FC conduziram a valores intermédios dos obtidos nos betões com igual teor de CZ, CRP ou FC.

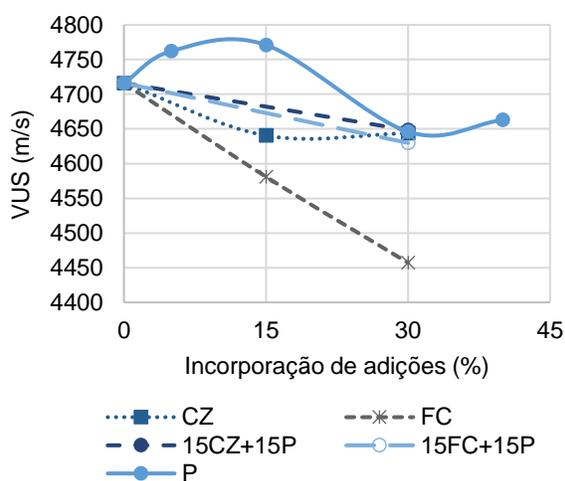


Figura 4.37 - Velocidade de propagação de ultrassons em betões com adições CZ e FC

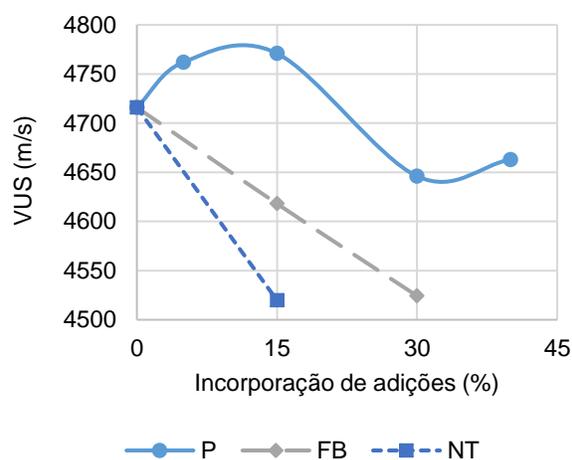


Figura 4.38 - Velocidade de propagação de ultrassons em betões com adições FB e NT

#### 4.2.5.4 Influência do tipo de agregado

Na Figura 4.39 apresenta-se a velocidade de propagação de ultrassons dos betões produzidos com agregado ARB e ART. Face ao betão de referência com agregados normais, constata-se um decréscimo muito acentuado de  $V_{us}$  nos betões com agregados reciclados, devido à maior porosidade e conseqüente menor massa volúmica dos AR (Tabela 3.5 e 3.6). Nos betões com ARB, a redução foi de 7,8%, o que pelos motivos referidos traduz uma importante variação na resistência mecânica ou massa volúmica dos betões. Neste caso, contribui o facto dos ARB introduzirem mais cerca de 50% de pasta do que a existente nos betões com AN (tendo em conta que cerca de 55% de NA foi substituído por ARB com 25 a 30% de pasta aderida, subcapítulo 3.3.4), aumentando significativamente a porosidade global do betão. A utilização de ART, capaz de reduzir em cerca de 20% o teor de pasta inicialmente existente no ARB, contribuiu para apenas um aumento desprezável de  $V_{us}$  (Figura 4.39). Isso traduz a modesta diferença de massa volúmica observada entre ARB e ART no subcapítulo 3.3.4.

Em geral, conclui-se que o tipo de agregado assume maior relevância em  $V_{us}$  do que a incorporação de CR. De facto, os betões com ART, para até 30% de substituição, apresentaram uma redução máxima de  $V_{us}$  de apenas 1,8%, semelhante ao observado nos betões com AN e igual teor de CRP (subcapítulo 4.2.5.1).

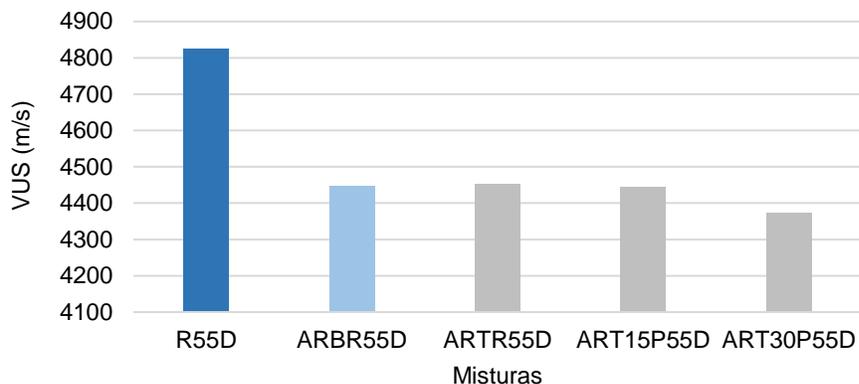


Figura 4.39 - Velocidade de propagação de ultrassons de betões com ARB e ART

#### 4.2.5.5 Relação entre $V_{us}$ e a resistência mecânica e massa volúmica

Segundo a metodologia sugerida por Bogas et al. (2013), tendo por base a equação (2), na Figura 4.40 verifica-se uma boa correlação entre a  $V_{us}$  e o termo que depende da resistência e da massa volúmica ( $R^2 > 0.9$ ), sustentando a validade dos resultados obtidos neste estudo. Para além da própria variabilidade do ensaio, esta relação é afetada pelo facto de os ensaios terem sido realizados em provetes saturados e a humidade influenciar de forma diferente a resistência mecânica, a massa volúmica e a  $V_{us}$ .

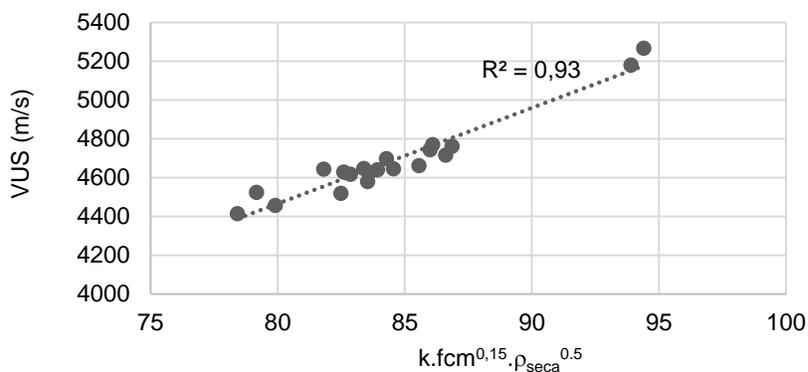


Figura 4.40 – Correlação entre  $V_{us}$  e a resistência mecânica e massa volúmica

#### 4.2.6 Retração

Para a mesma composição, ou seja, para a mesma proporção agregado/pasta, a retração do betão é essencialmente afetada pelo volume de água evaporável e a sua reação a/l (Bogas et al., 2014). Dado que

os betões foram comparados para o mesmo  $a/l$ , a retração dependeu essencialmente da porosidade e rigidez da microestrutura da matriz de pasta que envolve os agregados.

#### 4.2.6.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado

Na Figura 4.41 apresenta-se a retração do betão com diferentes percentagens de incorporação de CRP, para uma relação  $a/l$  de 0,55. Em geral, a retração a longo prazo, até 120 dias, seguiu a mesma tendência da resistência à compressão. A retração por secagem diminuiu ligeiramente com a incorporação de até 15% de CRP, mas acima desta percentagem aumentou com o teor CRP, exceto para o betão com 40% de CRP, que foi produzido com uma dosagem elevada de SP. Conforme discutido anteriormente, os betões com até 15% de CRP foram capazes de desenvolver microestruturas intrapartícula mais densas de menor porosidade. No entanto, devido à maior porosidade e menor rigidez das partículas de CRP, o módulo de elasticidade foi menor neste betão. Como tal, até 15% de incorporação de CRP, a retração foi apenas ligeiramente menor do que a do betão de referência (R55). Assim, e tendo em consideração alguma variabilidade do ensaio, pode concluir-se que a retração ao longo do tempo é semelhante nos dois tipos de betões, sem prejuízo da incorporação de pequenas percentagens de CRP.

O betão produzido com 30% de CRP desenvolveu uma microestrutura menos densa (subcapítulo 4.2.2) e apresentou um módulo de elasticidade mais reduzido (subcapítulo 4.2.4). Além disso, os betões com CRP tenderam a apresentar volumes de pasta ligeiramente maiores do que os betões com CEM I. Estes aspetos justificam o facto da retração aos 120 dias ter sido 18% mais elevada do que nos betões com apenas 15% CRP. No entanto, tal como observado na resistência à compressão, verificou-se uma tendência inversa após a incorporação de 40% de CRP. Como discutido para outras propriedades, a utilização de teores elevados de SP terá melhorado a dispersão e hidratação do CRP e do CEM I, levando à formação de uma microestrutura mais densa, associada a maior rigidez e menor quantidade de água evaporável. Embora seja necessário continuar os ensaios para idades mais avançadas, conforme está a ser realizado no âmbito do projeto de investigação EcoHydb que está a ser desenvolvido no IST, parece ainda existir uma maior estabilização da retração a longo prazo nos betões com CRP (Figura 4.41).

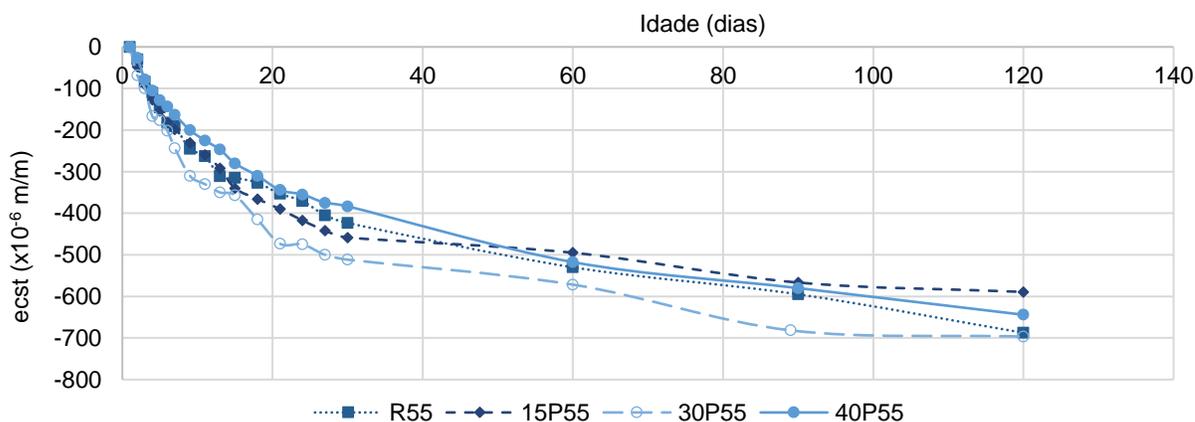


Figura 4.41 – Retração,  $ecst$ , de betões com  $a/l$  0,55, em função da percentagem de incorporação de CRP

Tal como abordado no subcapítulo 4.2.2, tendo em conta composições de igual  $a/l$  e semelhante porosidade global Bogas et al. (2020b) verificaram microestruturas mais refinadas em pastas com CRP do que com CEM I, pelo menos até 28 dias de idade. Este fenómeno, que foi justificado pelo desenvolvimento de porosidade intrapartícula mais fina, poderá promover o aumento da ação capilar em poros predominantemente mais estreitos, e consequentemente maior fonte de retração. Isso deverá ser mais importante em idades iniciais, quando o grau de hidratação tende a ser maior nas misturas com CRP do que com CEM I. Isso poderá explicar a retração ligeiramente maior nos betões com até 30% CRP até aos 7 dias de idade, face ao betão de referência R55 (Figura 4.42).

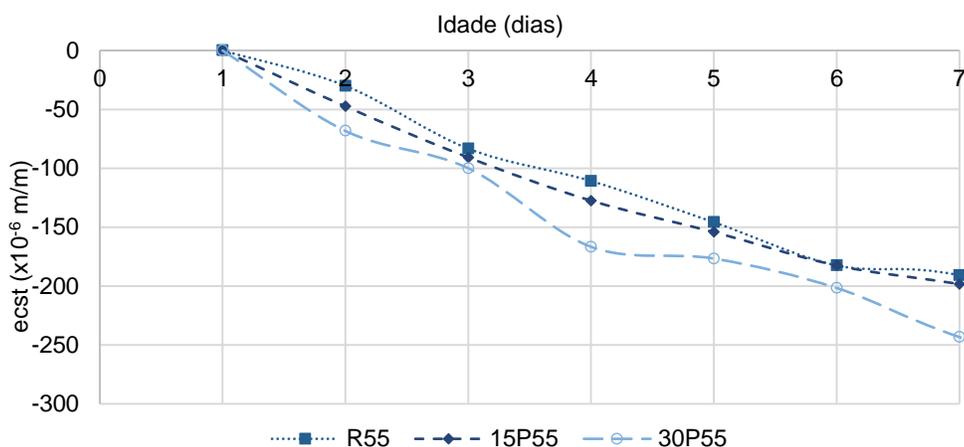


Figura 4.42 - Retração por secagem de betões com  $a/l$  0,55, para diferentes percentagens de incorporação de CRP entre 0% e 30%. Retração até 7 dias de idade.

Por sua vez, Qian et al. (2020), no único trabalho publicado até ao momento em que se considera a retração de betões com cimento reciclado, verificaram que a retração autógena em betões de ultraelevada resistência aumentou com a incorporação de até 25% CRP. Os autores atribuíram essa tendência à elevada superfície específica das partículas de CRP, que aumentaram a exigência de água e reduziram a humidade relativa interior do betão, promovendo uma maior auto-dessecação e consequente retração. De qualquer forma, em face da variabilidade do próprio ensaio e visto que no presente estudo os ensaios foram conduzidos apenas após 24 horas, não é possível estabelecer uma relação rigorosa entre a retração a idades iniciais e o teor de CRP.

Na Figura 4.43 apresenta-se a retração até 120 dias do betão com 100% de cimento CRP, bem como a do betão de referência, com relação  $a/l$  de 0,65. Em face dos recentes resultados reportados por Bandeira (2020), envolvendo argamassas produzidas com cimento reciclado, seria de esperar uma retração maior no betão 100P65, associado à substituição total de CEM I por CRP. De facto, de acordo com os subcapítulos 4.2.2 e 4.2.4, o betão com 100% CRP está associado a uma microestrutura menos densa e menos rígida do que o R65. No entanto, foram observados retrações anormalmente muito baixas neste betão.

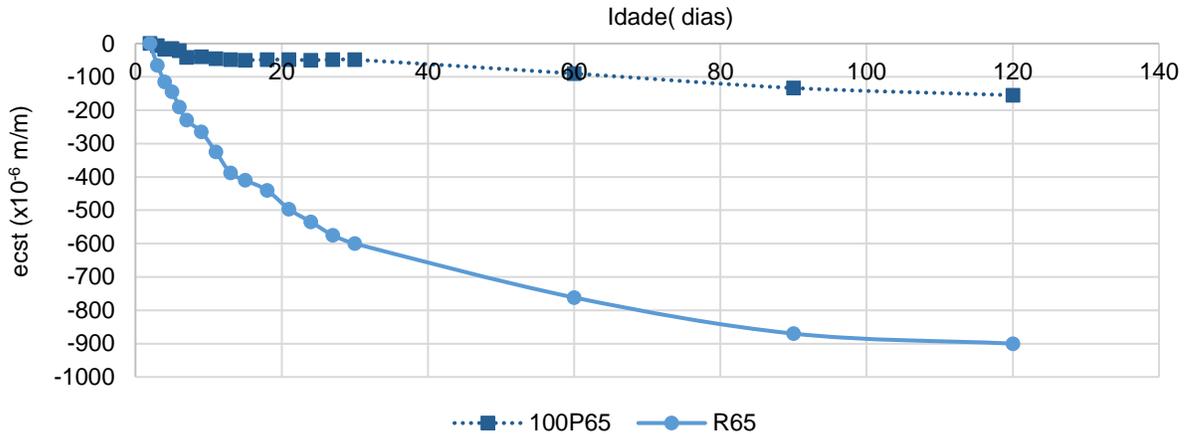


Figura 4.43 - Retração, *ecst*, de betões com *a/l* 0,65, em função da percentagem de incorporação de CRP

A análise microscópica do betão 100P65 (através de microscópio digital modelo AM7915 MZt da *Dino-Lite*, com até 220x de ampliação) revelou a formação de fissuração superficial nas faces dos provetes, incluindo a de medição da retração (Figura 4.44). Esta fissuração terá resultado do desenvolvimento de gradientes de humidade na espessura do provete que conduziram a retração diferencial e subsequente desenvolvimento de tensões de tração na superfície do provete. Estas tensões, terão sido suficientes para vencer a baixa resistência à tração destes betões em idade inicial, permitindo a geração de fissuras intermédias que impediram a medição correta da variação dimensional do provete.

O mesmo fenómeno não se observou na análise microscópica do betão de referência (R65), onde se verificou uma face homogénea com reduzida microfissuração de pouca importância (Figura 4.45). Neste caso, a retração do betão R55 seguiu uma tendência expectável com o reportado na literatura (Bogas 2011, ACI209.1R 2005, Blanks et al. 1940).

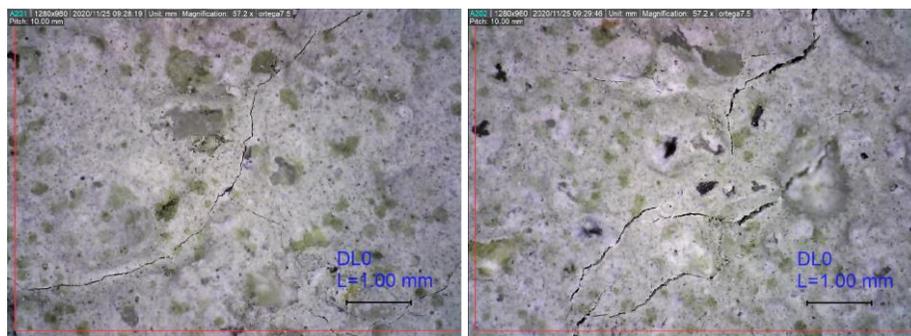


Figura 4.44 - Fotografias microscópicas das fissuras observadas no betão 100P65

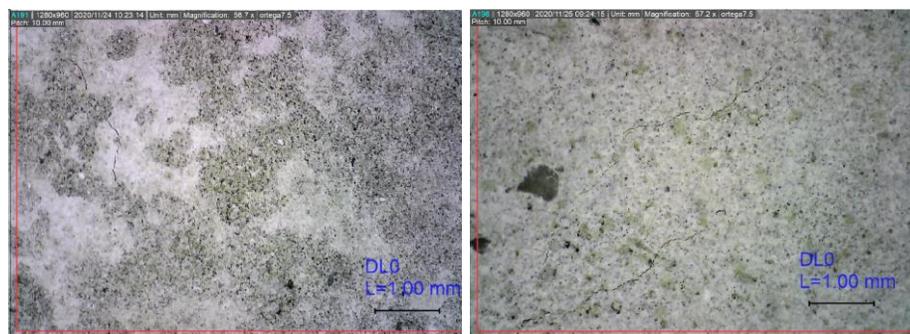


Figura 4.45 - Fotografias microscópicas do betão R65

Como esperado, para a mesma trabalhabilidade, a retração betão com incorporação de 15% de CRP (a/l de 0,62) foi ligeiramente superior à do betão de referência (Figura 4.46). Nesse caso, a maior relação a/l do betão com CRP reduziu a relação agregado/pasta e aumentou a quantidade de água evaporável, bem como a porosidade da microestrutura. Como tal, a fonte de retração foi aumentada e a ação de restrição promovida pela estrutura do agregado e microestrutura da pasta foi reduzida.

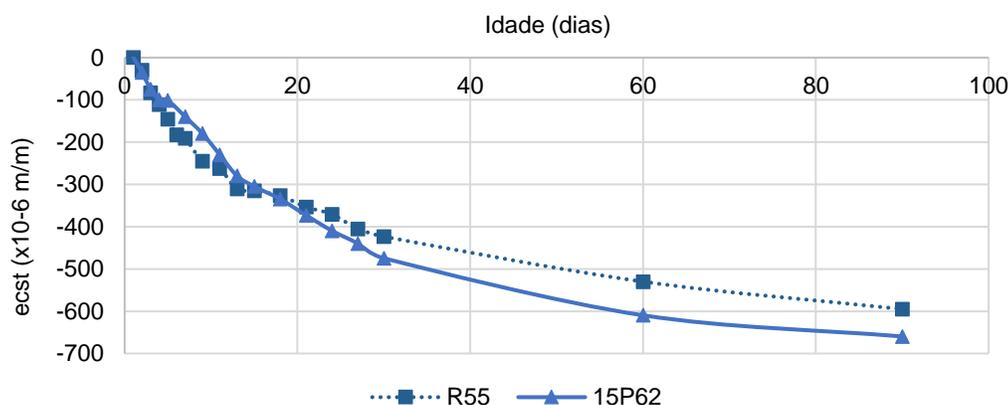


Figura 4.46 - Retração,  $ecst$ , de betões R55 e 15P62, de mesma trabalhabilidade

#### 4.2.6.2 Influência do tipo de cimento

Os betões com 15 e 30% de diferentes tipos de CR apresentaram retrações idênticas a longo prazo (Figuras 4.47 e 4.48). Em relação ao betão com cimento reciclado proveniente de betão, CRC, este apresentou maior relação água/fração cimentícia do que o betão com CRP, e como tal, menor rigidez e maior volume de água evaporável. No entanto, isso terá sido compensado pela contaminação de agregado no CRC, cerca de 26%, o que promoveu uma redução no volume de pasta, e, portanto, na fonte de retração. O CRS, proveniente de uma pasta de maior compacidade (a/l de 0,35), apesar de ter conduzido a microestruturas menos densas (subcapítulo 4.2.2), não afetou significativamente a retração face ao betão com igual teor de CRP (Figura 4.47). Conforme analisado no subcapítulo 4.2.4, para as reduzidas

percentagens de incorporação consideradas e para as pequenas diferenças entre estes dois tipos de cimento reciclado, o módulo de elasticidade foi semelhante nestes betões.

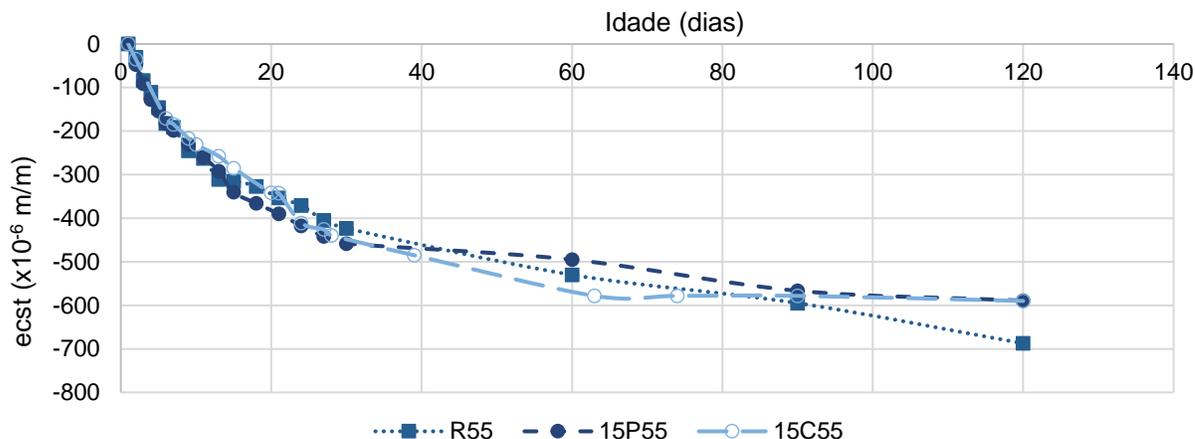


Figura 4.47 - Retração, *ecst*, de betões com *a/l* 0,55, com 15% de incorporação de CRP e CRC

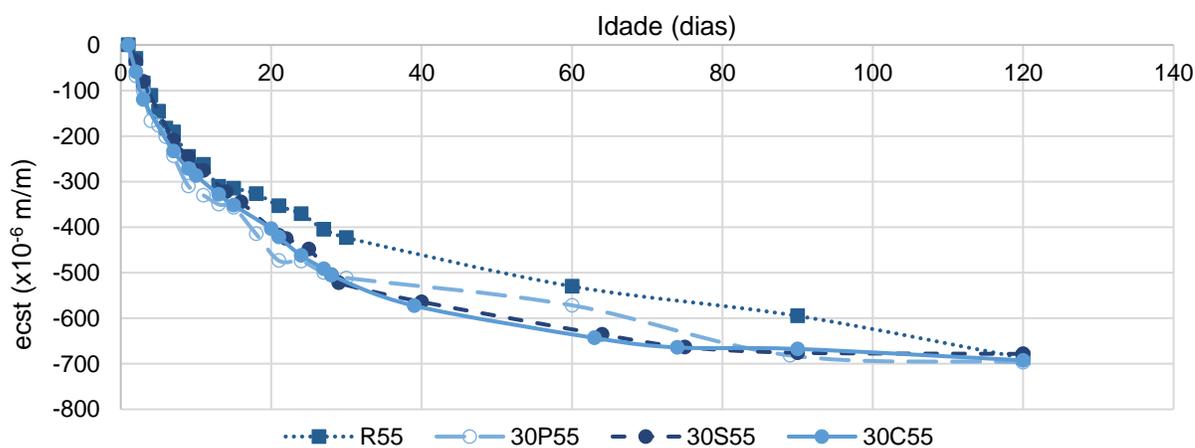


Figura 4.48 - Retração, *ecst*, de betões com *a/l* 0,55, com 30% de incorporação de CRP, CRS e CRC

#### 4.2.6.3 Influência do tipo de adição

A incorporação de até 30% de CZ ou FC conduziu a retrações semelhantes a ligeiramente inferiores à do betão de referência R55 e à dos betões com igual teor de CRP (Figuras 4.49 e 4.50). Se por um lado, estas adições contribuem para o desenvolvimento de microestruturas menos densas e menos rígidas, por outro lado ocorre uma menor ação da retração devido à maior inatividade destas adições de baixa reatividade. De facto, conforme observado por Bogas et al. (2014) e reportado por Malhotra (1990), visto que as reações de hidratação são menos importantes nos betões com CZ ou *filler*, a estrutura porosa tende a ser mais grosseira, o que aumenta a taxa de secagem, mas pode reduzir a ação capilar responsável pela retração. Por outras palavras, estas adições de baixa reatividade podem funcionar como microagregado, diminuindo a fonte de retração e aumentando o efeito de restrição sobre a variação

volumétrica do betão. Na prática, o efeito é semelhante ao de betões com menor volume de pasta. Este efeito é tanto mais importante quanto maior a percentagem de substituição, conforme igualmente observado por Termkhajornkit et al. (2005) em betões correntes com CEM I. A incorporação simultânea de CZ e CRP conduziu a retrações similares à dos betões com apenas 30% de CZ ou 30% de CRP. A maior reatividade e desenvolvimento de microestruturas mais densas nesta mistura ternária é compensada pela maior ação da tensão capilar responsável pela retração. As pequenas diferenças observadas entre as várias composições estudadas resulta de estas terem sido produzidas com idêntica relação a/l e agregado/pasta.

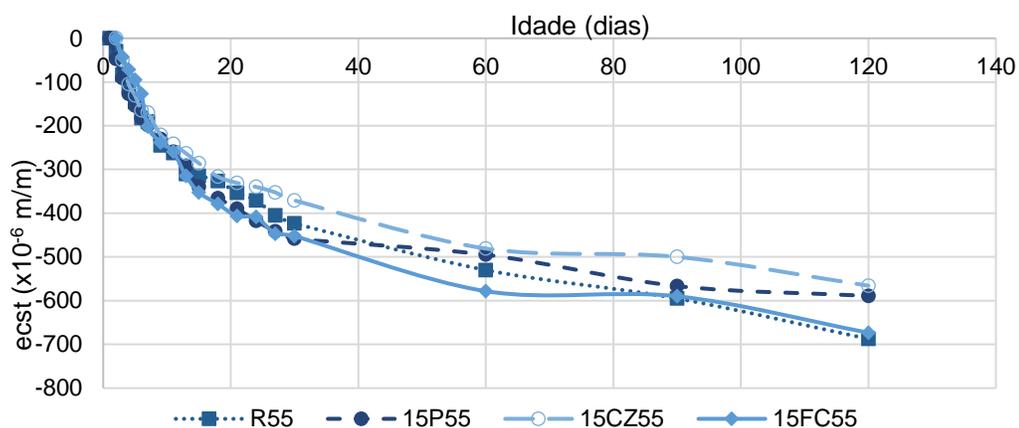


Figura 4.49 - Retração, *ecst*, de betões com a/l 0,55, com 15% de incorporação de CZ e FC e CRP

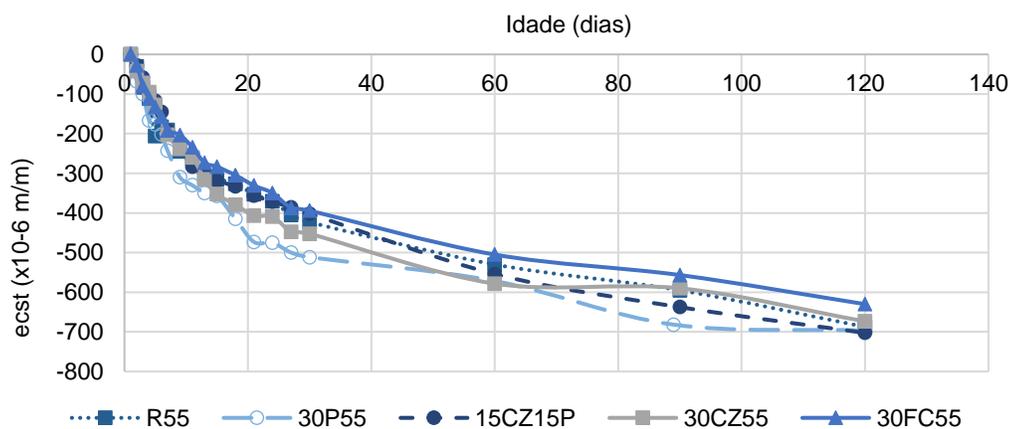


Figura 4.50 - Retração, *ecst*, de betões com a/l 0,55, com 30% de incorporação de CZ e FC e CRP

#### 4.2.6.4 Influência do cimento reciclado por tipo de agregado

Na Figura 4.51 apresenta-se a retração até 90 dias de idade dos betões produzidos com agregado reciclado ARB e ART, bem como a evolução da retração do betão de referência R55D. Conforme esperado e reportado por outros autores (Fan et al., 2015; Khatib, 2005; Verian et al., 2018), a substituição de AN

por agregado reciclado conduziu ao aumento da retração a curto e a longo prazo. Isso é atribuído ao maior teor de pasta nos betões com agregados reciclados, resultante da pasta antiga aderida aos agregados naturais. Essa pasta aderida, de elevada porosidade, vai absorver água de durante a mistura que vai sendo libertada por evaporação ao longo da vida útil do betão aumentando a sua fonte de variação dimensional. Por outro lado, esta pasta aderida apresenta em geral fraca qualidade, o que reduz também o efeito de restrição sobre a retração, pois aumenta o rácio pasta/agregado no betão.

Por esse motivo verificou-se um aumento significativo de retração nos betões com ARB face aos betões com AN. No entanto, esse aumento, de até 88% aos 90 dias de idade, foi superior ao esperado, em face do reportado no ACI 555 (2001), que aponta para aumentos entre cerca de 20 e 50%.

Por sua vez, o tratamento térmico adicional realizado ao agregado reciclado britado permitiu reduzir de forma significativa o impacto da retração no betão. Apesar de se ter removido apenas cerca de 20% de pasta (subcapítulo 3.3.4), a retração nos betões com ART foi apenas 18% superior à do betão com AN. Conclui-se assim que o tratamento de beneficiação do agregado reciclado foi efetivo em reduzir a retração do betão reciclado, que é um dos aspetos negativos usualmente apontados a este tipo de betões. A incorporação de 30% CRP nos betões com ART teve um efeito semelhante ao observado nos betões com AN, levando apenas a um ligeiro aumento da retração aos 90 dias, inferior a 5%.

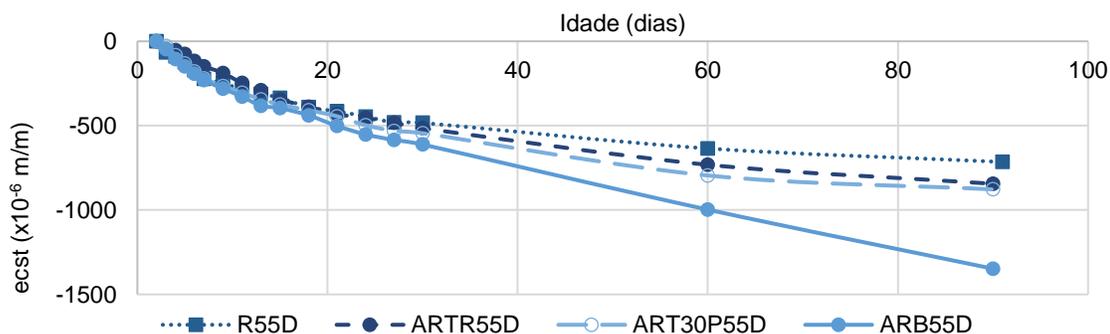


Figura 4.51 - Retração, esct, de betões com a/l 0,55, com agregado ARB e ART em função da percentagem de incorporação de CRP

## 5. CONCLUSÃO

---

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi analisado o desempenho no estado fresco e, sobretudo, foi caracterizado o comportamento mecânico e a retração a longo prazo de betões produzidos com incorporação total ou parcial de cimento reciclado a partir de pasta de cimento ou resíduos de betão.

Numa primeira fase foram produzidos os betões de origem a reciclar bem como os respetivos cimentos reciclados, obtidos após termoativação a 650°C de 3 tipos de resíduos cimentícios proveniente de: pastas de a/l de 0,55 (CRP); pastas de a/l de 0,35 (CRS); betões com a/l de 0,55 (CRC). Adicionalmente foram ainda considerados betões produzidos com agregados reciclados provenientes de britagem primária (ARB) e os mesmos agregados sujeitos a um tratamento de beneficiação térmica e mecânica adicional (ART). Após o tratamento, foi possível reduzir a percentagem de pasta adicionada em cerca de 20%, dependendo do tipo de fração considerada. Maiores níveis de remoção teriam sido alcançados caso se tivesse adotado uma temperatura de 400 °C (Hu, 2019), conforme inicialmente planeado.

Para a mesma trabalhabilidade, o betão com CRP requereu mais água de mistura ou SP do que o betão com CEM I, devido à maior exigência de água do cimento reciclado resultante da sua maior porosidade e superfície específica. No entanto, até 15% de incorporação de CRP, a trabalhabilidade não foi significativamente afetada e a mistura de CR pôde ser produzida sem correção da composição da mistura. O SP foi eficaz em compensar a menor trabalhabilidade de betões com elevadas percentagens de incorporação de CRP, embora esteja associado a maiores teores de saturação. A rápida perda de trabalhabilidade aliado à maior necessidade de água dos betões com CRP são duas das principais dificuldades na utilização deste ligante na construção.

A massa volúmica fresca e a massa volúmica seca seguiram tendências semelhantes, diminuindo com o aumento da percentagem de incorporação de CRP. Isso é essencialmente atribuído à maior exigência de água por parte do CR em relação ao CEM I, que reduz a trabalhabilidade das misturas, levando a uma maior dificuldade de compactação, e conseqüentemente, maiores quantidades de vazios.

Para a mesma relação a/l, a resistência à compressão e à tração não foram significativamente influenciada pela substituição de CEM I por CRP, mesmo tendo em conta elevadas percentagens de incorporação, demonstrando o elevado potencial deste ligante, ecologicamente mais eficiente. Em geral, as equações propostas na norma EN 1992-1 (2004) permitiram a estimativa razoável da resistência à tração de betões produzidos com cimento reciclado, sendo extensível a sua validade a este tipo de ligante.

A percentagem ótima de incorporação foi atingida para até 15% de CRP, apresentando resistência mecânica semelhante ou superior à do betão de referência. O desempenho do CR foi significativamente

afetado pela sua dispersão efetiva e pela trabalhabilidade do betão no estado fresco, que foram melhoradas com a adição de SP.

Face ao CRP, a utilização de cimento reciclado a partir de betão (CRC) até 15% de incorporação, não afetou de forma significativa a resistência mecânica. Para teores até 30%, o aumento de 9% provado na relação a/c efetiva conduziu a uma ligeira redução das propriedades mecânicas analisadas. Ainda assim, conclui-se que o cimento reciclado derivado de resíduos de betão, de acordo com o método desenvolvido e patenteado no IST (Bogas et al. 2020a), pode ser praticamente tão eficaz quanto aquele obtido diretamente de resíduos de pasta de cimento de igual composição.

Por sua vez, a termoativação de resíduos de betão a partir de betões de maior compacidade (CRS) parece ser ligeiramente menos eficiente do que o cimento reciclado a partir de pastas mais correntes, de elevado a/l. Isso deverá ser atribuído à menor porosidade e menor superfície específica atingida nestes cimentos reciclados, o que reduz a sua reatividade a curto prazo.

Ao contrário de adições minerais correntes, nomeadamente CZ e vários tipos de *filler*, o CR apresentou elevada capacidade de reidratação, tendendo a reter uma quantidade semelhante de água de hidratação face ao CEM I, e como tal, contribuindo efetivamente para o melhoramento da resistência mecânica do betão e para a redução da sua retração.

O *filler* proveniente de pasta (NT) ou de betão (FB), que não foram termoativados, revelaram fraca capacidade de hidratação, contribuindo apenas por efeito físico de *filler* e nucleação no adensamento da microestrutura. O efeito destas adições foi similar ao verificado no *filler* calcário comercial (FC), correntemente utilizado na indústria do betão.

A CZ utilizada no presente trabalho apresentou baixo índice de atividade aos 28 dias. Como tal, a sua contribuição para a resistência mecânica e módulo de elasticidade foi pouco importante. Ainda assim, esta adição demonstrou ser mais ativa do que qualquer um dos tipos de *filler* analisados, de natureza quase inerte. Para qualquer uma das propriedades estudadas, os betões com igual teor de CRP evidenciaram melhor desempenho, permitindo não só aumentar a sua eficiência térmica, mas também reduzir de forma significativa o impacte ambiental associado ao CEM I. Reduções superiores a 20% no nível de emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos betões correntes com CEM I podem ser alcançadas com a consideração de 40% de CRP em substituição de clínquer.

Em geral, as misturas ternárias com adição simultânea de CRP e CZ ou FC, apresentaram comportamentos intermédios do obtido em misturas com igual teor de apenas CZ ou FC. Desse modo não foi possível concluir sobre a eventual maior participação e reação destas adições minerais na presença do cimento reciclado.

No presente trabalho foi possível produzir betões com 5 a 40% CR, de resistência mecânica e retração comparável com a dos betões correntes com CEM I, sendo enquadráveis nas classes de resistência

C35/45 a C70/85, a que corresponde a gama mais comum de betão estrutural. Em particular, foram produzidos betões de elevado  $a/l$  com 100% CRP capazes de atingir a classe C25/30, mostrando a elevada potencialidade do cimento reciclado em conduzir à produção viável de betões estruturais de elevada sustentabilidade.

Para a mesma relação  $a/l$ , o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da percentagem de incorporação de CRP, justificado pela menor dureza e rigidez deste ligante de natureza porosa, face ao CEM I. Esta redução foi pouco importante até 15% de CRP, atingindo valores 9% inferiores para 30% de substituição. A equação sugerida na norma EN 1992-1 (2004) foi capaz de prever adequadamente a tendência de evolução do módulo de elasticidade com a percentagem de incorporação de CRP, embora se tenham atingido estimativas até 8% inferiores ao obtido nos ensaios experimentais.

No âmbito da velocidade de ultrassons ( $V_{us}$ ), a curva de evolução desta propriedade em função da percentagem de incorporação de CRP seguiu a mesma tendência do observado para a resistência à compressão. De facto, a  $V_{us}$  aumentou até 15% de substituição, sendo que acima desta percentagem, diminuiu com a incorporação de CRP, justificado pelo aumento do volume de vazios, decréscimo de rigidez da matriz cimentícia e pela natureza porosa das partículas de CRP. Ainda assim, mesmo tendo em consideração misturas de igual trabalhabilidade, conclui-se que a incorporação de CR teve uma influência pouco significativa na variação de  $V_{us}$ , registando-se variações máximas de 2% entre betões. Constatou-se uma ótima correlação entre  $V_{us}$  e o termo dependente da resistência e massa volúmica sugerido por Bogas et al. (2013). Os resultados obtidos sustentam a utilização desta metodologia para a estimativa generalizada do comportamento mecânico dos betões em função de  $V_{us}$ , independentemente do tipo de ligante, tipo de agregado e composição do betão.

Para a mesma relação  $a/l$ , a retração das misturas produzidas com CRP seguiram a mesma tendência da resistência à compressão. Em betões com até 15% de incorporação, a menor rigidez das partículas de CRP e o volume ligeiramente maior de pasta foram compensados pelo desenvolvimento de microestruturas mais densas, sendo que para maiores quantidades de CRP a tendência foi invertida. Ainda assim, conclui-se que pelo menos até 30% de substituição, a retração não foi significativamente afetada pela incorporação de CRP.

Conforme esperado, a substituição de agregado natural (AN) por agregado reciclado conduziu a uma redução generalizada da resistência mecânica e velocidade de ultrassons, assim como ao aumento significativo da retração. A pasta aderida nos agregados reciclados contribuiu para o aumento da relação pasta/agregado, bem como para a presença de uma fase extra de pior qualidade no betão. No entanto, visto que neste estudo foram utilizados agregados reciclados provenientes de betão de igual compacidade ao dos novos betões, a redução de resistência mecânica foi inferior a 7%. O tratamento térmico de beneficiação dos ARB demonstrou ser efetivo, tendo sido possível reduzir a diminuição de resistência à compressão em 71% e o aumento de retração de 88% para 18%, face ao betão de referência com AN. A incorporação de cimento reciclado nos betões com ART afetou de forma semelhante a massa volúmica e

a resistência mecânica, face ao observado nos betões com agregados naturais. Para além disso, o tratamento imposto aos ART fez alterar para cerca de metade o índice de achatamento dos agregados, com benefício correspondente na redução da quantidade de água para uma dada trabalhabilidade.

## **5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

O presente estudo demonstrou a potencialidade do cimento reciclado em substituir o CEM I na produção de betões estruturais sem grande alteração da sua resistência mecânica e retração. No entanto, conforme foi evidente ao longo do trabalho, existem ainda grandes lacunas no conhecimento deste novo tipo de betões, cuja investigação ainda é muito recente. Deste modo, entre outras, sugerem-se algumas propostas de investigação para desenvolvimentos futuro com o objetivo de aprofundar os temas abordados no decorrer deste trabalho:

- Produção de betão 100% reciclado e 100% economia circular, com a substituição total de cimento Portland e agregados naturais por cimento e agregados reciclados;
- Otimização dos processos de produção de cimento e agregado reciclado, visando a obtenção de betões reciclados de eficiência comparável à dos betões correntes com CEM I e AN;
- Desenvolver metodologias que contrariem a elevada exigência de água e rápida perda de trabalhabilidade do cimento reciclado;
- Análise da retração autogénea e fluência de betões com cimento reciclado;
- Análise do ciclo de vida para a produção dos vários tipos de cimento reciclado, termoativado a partir de fontes distintas, bem como dos produtos de construção que podem ser desenvolvidos a partir destes;
- Transpor o novo procedimento de separação dos constituintes de betão para a indústria e avaliar a sua adequabilidade a diferentes tipos de betão e resíduos de construção em geral.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

### Documentos Normativos

- ACI 318 (2019): Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute
- 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 206 (2013): Betão – Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 450-1 (2012): Cinzas volantes para betão: Definição, especificações e critérios de conformidade. 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

ultra-sons. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

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

### Patentes

Bogas, J.A., Pereira, M.F.C., Guedes, A.M., Carriço, A., Hu, S., Sousa, R. (2020a). Patente A116130 - "Processo de separação dos componentes de resíduos de betão endurecido para obtenção de cimento reciclado". Application No. 116130, priority date 24/02/2020

Chang, C. M. (2007). Patent US7258737B2, Method for recycling concrete waste.

### Publicações Escritas

ACI209.1R. (2005). "Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete." ACI 209.1R-05. American Concrete Institute, 12p.

ACI Committee 555 (2001). Removal and Reuse of Hardened Concrete. pp. 1–26

ATIC, Associação Técnica da Indústria de Cimento (2019). Roteiro Nacional para a descarbonização da indústria cimenteira.

Ahn, J. W., Kim, H. S., & Han, G. C. (2001). Recovery of aggregates from waste concrete by heating and grinding. *Geosystem Engineering*, 4(4), 117–122. <https://doi.org/10.1080/12269328.2001.10541178>

Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>

Alonso, C., Fernandez, L., Science, C., Torroja, E., & No, S. G. (2004). *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*. 9(4), 3015–3024.

Angulo, S. C., Guilge, M. S., Quarcioni, V. A., Baldusco, R., & Cincotto, M. A. (2015). Rehydration of Cement Fines: a Tg /Calorimetry Study. *III Progress of Recycling in the Built Environment*, 2, 222–229.

Bandeira, J. (2020). Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado. Dissertação de mestrado, IST.

Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2013). *Cement and Carbon Emissions - final draft manuscript*. 2008, 1–15. [https://www.researchgate.net/profile/Ellis\\_Gartner/publication/257895979\\_Cement\\_and\\_carbon\\_em](https://www.researchgate.net/profile/Ellis_Gartner/publication/257895979_Cement_and_carbon_em)

issions/links/56cad3fb08aee3cee54075ff.pdf%0Ahttps://www.researchgate.net/profile/Ellis\_Gartner/publication/257895979\_Cement\_and\_carbon\_emissions/links/56cad3fb08

- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- 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/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>
- Bogas, J. Alexandre, & Gomes, A. (2014). Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica-characterization and normalization. *International Journal of Civil Engineering*, 12(2 A), 268–278.
- Bogas, J. Alexandre, 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/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- Bogas, J. Alexandre, & Nogueira, R. (2014). Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1780–1791. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0061-x>
- Bogas, J. Alexandre, Nogueira, R., & Almeida, N. G. (2014). Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete. *Materials and Design*, 56, 1039–1048. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.013>
- Bogas, J. Alexandre, Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138(July), 106226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas J. Alexandre. Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida. Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. 2011.
- Brito, J. De, Pereira, A. S., & Correia, J. R. (2005). *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*. 27, 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005>
- Bru, K., Touzé, S., Bourgeois, F., Lippiatt, N., & Ménard, Y. (2014). Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*, 126, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.009>
- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292–1297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023>

- Cantero, B., Bosque, I. F. S., Matías, A., & Medina, C. (2018). Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes. *Construction and Building Materials*, 185, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.060>
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. *Construction and Building Materials*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Carvalho, M. Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação
- CEMBUREAU, The European Cement Association (2013). The role of cement in the 2050 low carbon economy.
- Fan, C. C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S. J. (2015). The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of Mortar. *Materials*, 8(5), 2658–2672. <https://doi.org/10.3390/ma8052658>
- Farage, M. C. R., Sercombe, J., & Gallé, C. (2003). Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 °C. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1047–1056. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00005-X)
- Florea, M. V. A., Ning, Z., & Brouwers, H. J. H. (2012). Smart crushing of concrete and activation of liberated concrete fines. *University of Eindhoven, Department of the Built Environment, Unit Building Physics and Services: Eindhoven, The Netherlands*, 1–23.
- 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>
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114–140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Gastaldi, D., Canonico, F., Capelli, L., Buzzi, L., Boccaleri, E., & Irico, S. (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement and Concrete Composites*, 61, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.010>
- Gouveia, M. (2019). Incorporação de adições em argamassas produzidas com cimento reciclado. Dissertação de mestrado, IST.

- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220–6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>
- Heede, P. Van Den, & Belie, N. De. (2012). Cement & Concrete Composites Environmental impact and life cycle assessment ( LCA ) of traditional and ' green ' concretes : Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2020). Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives : A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 258, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120606>
- Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., & Zain, M. F. M. (2016). Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement : A review. *Construction and Building Materials*, 116, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147>
- Hu, S. (2019). Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados, Dissertação de mestrado, IST.
- Jic, Y., & Wang, Y. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, 30, 500–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- Kim, J. H., Noemi, N., & Shah, S. P. (2012). Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 746–753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.016>
- Kusuma, Gideon H., Budidarmawan, Johannes, Susilowati, Ani, “Impact of Concrete Quality on Sustainability”, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (2015), pp. 755
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., Park, D., 2015. A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Constr. Build. Mater.* 83, 174e180.
- Le, H., & Bui, Q. (2020). Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. *Construction and Building Materials*, 257, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522>
- Leal, D. (2021). Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado. Dissertação de mestrado, IST.
- 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/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Isabel, M., & Rojas, S. De. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical and mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>
- Mehta, P. K., “Concrete Technology at the Crossroads— Problems and Opportunities,” *Concrete Technology: Past, Present, and Future*, SP-144, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1993, pp. 1-31.
- Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cem Concr Compos* 2009; 31:601–5.
- Miller, S. A. (2018). Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete : can there be too much of a good thing ? *Journal of Cleaner Production*, 178, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.008>
- Mindess, Sidney, J.Francis Young, and David Darwin. *Concrete*. Second edition. Edited by Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2003.
- Neto, G. (2019). Argamassas com resíduos de materiais cimentícios de diferentes finuras. Dissertação de mestrado, IST.
- Panesar, D. K., & Zhang, R. (2020). Performance comparison of cement replacing materials in concrete : Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. *Construction and Building Materials*, 251, 118866. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>
- Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Bołtryk, M., Jiménez, J. R., & Fernández, J. M. (2019). The influence of heat and mechanical treatment of concrete rubble on the properties of recycled aggregate concrete. *Materials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/ma12030367>
- Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y. L. (2001). Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1307–1318. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00582-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00582-8)
- Qian, D., Yu, R., Shui, Z., Sun, Y., Jiang, C., Zhou, F., Ding, M., Tong, X., & He, Y. (2020). A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121231>
- Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/ma13183937>

- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., & Rydberg, T. (2004). *Life cycle assessment Part 1 : Framework , goal and scope definition , inventory analysis , and applications*. 30, 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Rocha, J. (2016). Desempenho de argamassas produzidas com cimento reciclado. Dissertação de mestrado, IST.
- Rodrigues, F. A., & Joekes, I. (2011). *Cement industry: sustainability, challenges and perspectives*. 151–166. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0302-2>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 64, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>
- Serpell, R., & Zunino, F. (2017). Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of  $\alpha$ 'H-C2S. *Cement and Concrete Research*, 100(January), 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.001>
- Shigeishi, M. (2017). Separation and collection of coarse aggregate from waste concrete by electric pulsed power. *AIP Conference Proceedings*, 1887(September). <https://doi.org/10.1063/1.5003560>
- 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/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>
- Silva, R. V., Brito, J. De, & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Splittgerber, F. & Mueller, A. Inversion of the cement hydration As a new method for identification and/or recycling?, 11th Int. Congr. Chem. Cem. (2003) 1282–1291, <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>.
- Talaei, A., Pier, D., Iyer, A. V, & Kumar, A. (2019). Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry. *Energy*, 170, 1051–1066. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.088>
- 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/10.1016/j.resconrec.2006.05.012>

Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., & Saito, T. (2005). Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.010>

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(October 2017), 30–49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>

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/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>

Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>

Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C. H., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949–955. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>

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/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>

Yu, R., & Shui, Z. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 78, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.003>

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/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>

## ANEXOS

---

## ANEXO 1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela A1.1 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias para as misturas de referência, e de incorporação de NT e CRP para diferentes relações a/l

Composição	Provete	3 dias		7 dias		28 dias		90 dias	
		fc (Mpa)	fc <sub>m</sub> (Mpa)						
R35	1	66,1		69,6		84,2		97,1	
	2	61,8	63,6	74,7	72,1	83,6	84,4	88,0	93,5
	3	62,9		72,0		85,3		95,5	
R55	1	33,2		41,8		52,9		59,4	
	2	34,1	33,7	43,4	42,0	52,1	52,2	59,1	59,2
	3	33,7		40,7		51,5		59,1	
R65	1	28,4		32,4		41,5			
	2	27,8	27,9	33,7	33,4	38,9	39,8		
	3	27,5		34,0		39,1			
15NT55	1	28,3		34,5		44,3			
	2	29,7	29,0	36,2	35,8	41,2	43,1		
	3	29,1		36,7		43,8			
15P35	1	73		86,9		92,8			
	2	78,5	76,3	86,9	86,1	85,3	90,0		
	3	77,3		84,5		92,0			
5P55	1	35,3		44,3		53,8			
	2	35,9	35,8	45,1	44,5	50,7	53,2		
	3	36,1		44,0		55,0			
15P55	1	35,1		41,5		53,2		56,5	
	2	34	34,7	42,9	42,9	52,6	52,4	58	57,9
	3	35,1		44,3		51,5		59,1	
30P55	1	34		40,1		48,8		53,7	
	2	32,9	33,7	39,9	40,1	47,7	47,8	50,5	50,7
	3	34,3		40,3		47		47,9	
40P55	1	37,8		44,8		53,4			
	2	37,4	37,4	44,8	44,4	51	52,5		
	3	37		43,7		53,2			
100P65	1	28,6		30,5		33,5			
	2	28,6	28,5	29,7	30,2	33,7	33,2		
	3	28,4		30,5		32,4			
15P62	1	31		36,4		43,4			
	2	31,8	31,1	35,4	35,8	45,1	44,6		
	3	30,6		35,6		45,3			

Tabela A1.2 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias para as misturas com CRS, CRC, e incorporação de CZ, FC e FB para relação a/l de 0,55

Composição	Provete	3 dias		7 dias		28 dias		90 dias	
		fc (Mpa)	fc <sub>m</sub> (Mpa)						
30S55	1	29,9		37,2		46,5		53,3	
	2	28,6	29,4	36,7	35,8	46,7	46,8	52,1	53,7
	3	29,7		33,5		47,2		55,6	
15C55	1	30,2		42,4		52,3			
	2	29,7	30,0	41,3	42,2	51	52,0		
	3	30		42,8		52,6			
30C55	1	24,3		36,2		45,1			
	2	23,9	24,2	36,4	36,5	45,1	45,0		
	3	24,3		37		44,8			
15CZ55	1	27,3		34,3		44,3		55,9	
	2	27,4	27,2	32,7	33,3	44,3	44,2	58,4	56,5
	3	27		32,9		44		55,3	
15FC55	1	27,3		34,5		43,2		46,9	
	2	27,1	27,5	35,3	35,2	42	42,9	47,2	47,3
	3	28		35,7		43,4		47,8	
15FB55	1	30,2		35,1		43,7			
	2	29,7	29,5	37,2	35,6	41,3	43,1		
	3	28,5		34,5		44,3			
30CZ55	1	21,3		24,7		39,1		50,2	
	2	20,5	20,8	25,1	24,9	38,1	38,4	49,4	50,1
	3	20,6		24,8		38		50,7	
30FC55	1	23,9		28,2		32,9		34,3	
	2	23,5	23,5	26,7	27,4	36,2	33,8	37,2	36,1
	3	23,2		27,3		32,4		36,7	
30FB55	1	22,1		26,2		32,7			
	2	22,7	22,3	26,4	26,8	32,7	32,8		
	3	22,1		27,8		32,9			
15P15CZ55	1	27,8		34,5		44		57,3	
	2	27,8	28,2	34,5	34,7	42,9	44,3	56,2	56,7
	3	29,1		35,2		45,9		56,7	
15P15FC55	1	28,1		34,7		39,7		46,7	
	2	27,9	27,7	33,2	34,3	41,3	40,9	46,4	46,1
	3	27,2		35		41,8		45,3	

Tabela A1.3 – Valores do ensaio de resistência à compressão aos 3 e 28 dias para as misturas de R55D e de ARB e ART para relação a/l de 0,55

Composição	Provete	3 dias		28 dias	
		fc (Mpa)	fc <sub>m</sub> (Mpa)	fc (Mpa)	fc <sub>m</sub> (Mpa)
R55D	1	36,6		49,4	
	2	37,2	37,4	51,8	50,3
	3	38,3		49,6	
ARBR55D	1	34,8		48	
	2	32,9	33,9	46,1	46,7
	3	34		45,9	
ARTR55D	1	35,3		48,3	
	2	36,3	36,0	49,8	49,3
	3	36,4		49,9	
ART15P55	1	36,2		48,8	
	2	32,9	35,0	48,8	48,3
	3	35,9		47,2	
ART30P55	1	33,7		41,8	
	2	31,8	33,0	46,4	44,2
	3	33,5		44,3	

## ANEXO 2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Tabela A2.1 – Valores do ensaio de resistência à tração aos 28 dias para as misturas consideradas

Composição	Provete	28 dias	
		fct (Mpa)	fctm (Mpa)
R35	1	4,89	5,5
	3	6,19	
R55	1	3,43	3,6
	2	3,46	
	3	3,86	
R65	1	2,66	2,7
	2	2,75	
15NT55	1	3,44	3,2
	2	3,53	
	3	2,73	
15P35	1	5,5	5,5
5P55	1	4,21	4,0
	2	3,61	
	3	4,14	
15P55	1	4,04	4,1
	2	4,26	
	3	4,14	
30P55	1	3,35	3,3
	2	3,18	
40P55	1	3,86	3,6
	2	3,24	
100P65	1	2,06	2,2
	2	2,32	
15P62	1	3,09	3,5
	2	3,86	

Composição	Provete	28 dias	
		fct (Mpa)	fctm (Mpa)
30S55	1	3,52	3,1
	2	2,99	
	3	2,84	
15C55	1	3,82	3,8
30C55	1	3,33	3,3
	1	3,61	
	2	3,95	
15CZ55	2	3,95	3,4
	3	2,66	
15FC55	1	2,92	2,8
	2	2,84	
	3	2,59	
15FB55	1	2,92	2,7
	2	2,41	
30CZ55	1	2,15	2,5
	2	2,84	
	3	2,62	
30FC55	1	2,87	2,6
	2	2,04	
	3	2,75	
30FB55	1	2,06	2,4
	2	2,75	
15P15CZ55	1	2,79	2,6
	2	2,41	
	3	2,59	
15P15FC55	1	2,89	2,7
	2	2,58	
	3	2,66	

### ANEXO 3 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tabela A3.1 – Valores do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias para as misturas ensaiadas

Composição	Provete	28 dias	
		fct (GPa)	fctm (GPa)
R55	1	40,24	40,0
	2	39,77	
15P55	1	40,2	38,8
	2	38,04	
	3	38,04	
30P55	1	36,39	36,4
	2	37,37	
	3	35,42	
30S55	1	34,58	35,6
	2	36,52	
15CZ55	1	36,11	36,96
	2	36,72	
	3	38,06	
15FC55	1	35,64	36,24
	2	36,83	
	3	36,26	
15P15CZ55	1	36,09	35,94
	2	34,86	
	3	36,87	

## ANEXO 4 – VELOCIDADE DE ULTRASSONS

Tabela A4.1 – Valores do ensaio de velocidade de ultrassons aos 28 dias para as misturas consideradas

Composição	Provete	28 dias		Composição	Provete	28 dias		Composição	Provete	28 dias	
		V <sub>us</sub> (m/s)	V <sub>us</sub> (m/s)			V <sub>us</sub> (m/s)	V <sub>us</sub> (m/s)			V <sub>us</sub> (m/s)	V <sub>us</sub> (m/s)
R35	1	5190		30S55	1	4705		R55D	1	4839	
	2	5190	5180		2	4640	4699		2	4823	4823
	3	5161			3	4752			3	4808	
R55	1	4687		15C55	1	4760		ARBR55D	1	4425	
	2	4717	4716		2	4725	4745		2	4469	4447
	3	4742			3	4750			3	4447	
R65	1	4625		30C55	1	4619		ARTR55D	1	4460	
	2	4606	4620		2	4660	4626		2	4469	4451
	3	4630			3	4600			3	4425	
15NT55	1	4550		15CZ55	1	4628		ART15P55	1	4425	
	2	4520	4520		2	4611	4640		2	4447	4444
	3	4480			3	4682			3	4460	
15P35	1	5263		15FC55	1	4581		ART30P55	1	4360	
	2	5257	5268		2	4610	4581		2	4390	4372
	3	5282			3	4553			3	4367	
5P55	1	4760		15FB55	1	4616					
	2	4764	4762		2	4620	4618				
	3	4762			3	4617					
15P55	1	4740		30CZ55	1	4640					
	2	4773	4771		2	4652	4644				
	3	4800			3	4639					
30P55	1	4640		30FC55	1	4452					
	2	4646	4646		2	4462	4457				
	3	4652			3	4456					
40P55	1	4663		30FB55	1	4520					
	2	4667	4663		2	4520	4524				
	3	4659			3	4531					
100P65	1	4416		15P15CZ55	1	4644					
	2	4390	4415		2	4657	4648				
	3	4438			3	4642					
15P62	1	4630		15P15FC55	1	4629					
	2	4620	4650		2	4637	4630				
	3	4700			3	4623					

## ANEXO 5 - RETRAÇÃO

Tabela A5.1 – Valores do ensaio de retração, ecst, para as misturas com incorporação de CRP, CRS e CRC com diferentes a/l (x10-6 m/m)

Dias	R55 ecst	15P55 ecst	30P55 ecst	40P55 ecst	15P62 ecst	R65 ecst	100P65 ecst	Dias	30S55 ecst	Dias	15C55 ecst	30C55 ecst
1	0	0	0	0	0			1	0	1	0	0
2	-30	-48	-68	-27	-35	0	0	2	-36	2	-35	-59
3	-83	-91	-100	-78	-75	-65	-7	3	-80	6	-171	-120
4	-111	-128	-167	-105	-100	-115	-17	7	-208	7	-184	-233
5	-146	-154	-177	-128	-101	-145	-15	9	-246	9	-217	-272
6	-183	-183	-202	-143		-190	-22	11	-276	10	-231	-287
7	-191	-198	-243	-163	-140	-230	-42	14	-323	13	-258	-328
9	-245	-231	-310	-200	-180	-265	-40	16	-345	15	-285	-352
11	-263	-260	-330	-225	-230	-325	-45	21	-418	20	-342	-403
13	-311	-292	-350	-247	-280	-388	-48	22	-425	21	-343	-422
15	-315	-340	-357	-280	-305	-410	-50	25	-448	24	-411	-463
18	-327	-366	-415	-310	-335	-440	-48	28	-505	27	-426	-492
21	-353	-390	-473	-344	-373	-497	-48	29	-523	28	-439	-506
24	-371	-418	-475	-355	-410	-535	-50	40	-564	39	-485	-573
27	-405	-442	-500	-375	-440	-575	-48	64	-636	63	-578	-643
30	-423	-458	-512	-383	-475	-600	-48	75	-663	74	-578	-664
60	-530	-495	-572	-518	-610	-762	-90	90	-676	90	-578	-668
90	-595	-567	-682	-580	-660	-870	-133	120	-678	120	-590	-693
120	-688	-589	-697	-644		-900	-155					

Tabela A5.2 – Valores do ensaio de retração, ecst, para as misturas com adições CZ, FC e CZ e agregados ARB e ART (x10-6 m/m)

Dias	15CZ55 ecst	15FC55 ecst	Dias	30CZ55 ecst	30FC55 ecst	15P15CZ55 ecst	15P15FC55 ecst	Dias	R55D ecst	ARBR55D ecst	ARTR55D ecst	ART30P55D ecst
2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0
3	-50	-48	2	-43	-28	-27	-51	3	-66	-48	-47	-28
4	-105	-57	3	-72	-80	-58	-124	4	-89	-105	-53	-83
5	-131	-87	4	-95	-112	-95	-155	5	-125	-149	-76	-132
6	-165	-96	5	-128	-133	-117	-187	6	-172	-192	-118	-178
7	-170	-114	6		-158	-145	-207	7	-222	-230	-148	-220
9	-221	-142	7	-203	-192	-193	-255	9	-246	-281	-188	-265
11	-242	-172	9	-238	-203	-234	-277	11	-288	-328	-248	-305
13	-263	-199	11	-260	-234	-283	-320	13	-313	-382	-291	-344
15	-286	-224	13	-315	-273	-298	-341	15	-335	-396	-344	-375
18	-317	-232	15	-353	-283	-319	-367	18	-391	-438	-388	-408
21	-331	-248	18	-379	-305	-333	-397	21	-415	-502	-432	-444
24	-340	-263	21	-407	-331	-356	-427	24	-446	-552	-454	-498
27	-353	-277	24	-409	-350	-372	-436	27	-481	-585	-483	-531
30	-371	-288	27	-448	-388	-386	-470	30	-483	-612	-515	-545
60	-481	-373	30	-453	-394	-402	-469	60	-635	-998	-732	-795
90	-500	-374	60	-578	-505	-554	-637	90	-715	-1348	-844	-878
120	-566	-467	90	-590	-557	-638	-679					
			120	-673	-630	-703	-772					