

# **Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado**

**José Bernardo Mota Pinho Bandeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores:

Professor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Professor Manuel Francisco Costa Pereira

### **Júri**

Presidente: Professora Maria Cristina De Oliveira Matos Silva

Orientador: Professor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Aires Fernando Fernandes Leite Camões De Azevedo

**Setembro de 2020**



# 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 e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado**

**José Bernardo Mota Pinho Bandeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Dissertação elaborada no âmbito do Projecto FCT EcoHydB**

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

Task 7 – Economic and life-cycle assessment of RLCC, EEC and  
OPC-based cement products

Projeto FCT PTDC/ECI-CON/28308/2017



**FCT** Fundação  
para a Ciência  
e a Tecnologia



# Agradecimentos

Estando o meu percurso académico na sua fase final, chega o momento de agradecer às pessoas que me ajudaram e acompanharam durante todo este percurso que, honestamente, não se revelou fácil. A todas estas pessoas, que fizeram deste difícil percurso uma divertida caminhada, um sincero obrigado.

Ao meu orientador, Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas, pela orientação, disponibilidade, motivação e boa disposição que sempre demonstrou, tornando esta dissertação um trabalho muito menos complicado do que parecia.

Ao meu coorientador, Professor Manuel Francisco Costa Pereira, pela revisão de texto e auxílio prestado na realização dos ensaios de DRX, e à Professora Mafalda Saldanha Guedes, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios de TG.

Ao Sr. Pedro Costa e Sr. Francisco Baptista, técnicos do Laboratório de Construção do IST, pela disponibilidade e ajuda no manuseamento de equipamentos.

Às investigadoras Ana Chambel Carriço, pela ajuda, motivação e acompanhamento ao longo de todo o trabalho, ensinando-me que tudo se aponta e que muitas vezes ao fim-de-semana também se trabalha, e Sofia Real, pelo apoio e tempo despendido, tendo sempre uma maneira de resolver os problemas debaixo da manga.

Aos colegas de projeto Miguel Carvalho e Susana Hu, pela ajuda prestada durante o trabalho, mostrando sempre um verdadeiro espírito de equipa desde o primeiro dia.

À minha família, por desde pequenino me motivarem a fazer o que gosto, e por terem sempre acreditado que este dia ia chegar.

Aos meus amigos, Francisco Brás de Oliveira, Frederico Gallego, Guilherme Nunes, Manuel Lopes, Martim Gallego, Rafael Cecílio e Sebastião Cerqueira, por toda a motivação que me foram dando ao longo dos anos, onde levaram com os meus desabafos vezes sem fim.

À Matilde Brak-Lamy, por me ter aturado durante todo o curso, pela motivação e exemplo de superação que sempre me deu, fazendo-me nunca duvidar das minhas capacidades, e por me ajudar a crescer e a tornar-me na pessoa que sou hoje.



## Resumo

Devido às crescentes preocupações ambientais os vários países e instituições internacionais têm investido na procura da sustentabilidade e gestão consciente dos recursos naturais. Tal como em outros sectores, a indústria da construção tem desenvolvido esforços no sentido de reduzir o consumo de matérias primas, a exploração de recursos naturais e o nível de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Nesse sentido, o betão ao ser o material mais utilizado na construção, é uma das principais fontes de impacto ambiental, com o cimento, em particular, a ser o constituinte de maior preocupação, visto ser responsável por mais de 80% do GEE deste material. Assim, urge encontrar soluções alternativas que visem a utilização de ligantes mais eco-eficientes.

O presente trabalho pretende contribuir para o aumento do conhecimento no âmbito do desenvolvimento, produção e caracterização de Cimentos Reciclados (CR) termoativados. Para tal, foi desenvolvido um trabalho com uma forte componente experimental que teve como principal objetivo analisar a retração de argamassas produzidas com substituição parcial ou total de Cimento Portland Normal (CPN) por CR, e ainda a análise do seu efeito sinérgico na presença de diferentes teores de Cinzas Volantes (Cz). O trabalho tem em conta resíduos provenientes de pastas de diferente compacidade, que permite uma análise mais direta do efeito introduzido pelo CR, e ainda resíduos provenientes de betão, simulando o caso real mais usual. São consideradas diferentes composições, tendo em consideração argamassas de igual trabalhabilidade e de igual composição, bem como CR de diferente finura. As argamassas são ainda alvo de caracterização mecânica e de análise da microestrutura através de ensaios de absorção capilar.

Com a realização deste trabalho foi possível confirmar a potencialidade do cimento reciclado termoativado como adição em argamassas, tendo-se verificado que para idêntica relação a/l, é possível obter argamassas com comportamento similar às do CPN, mas associados a uma redução significativa de emissões e, assim, a uma maior sustentabilidade. Confirma-se o efeito sinérgico entre o CR e as cinzas volantes, bem como a maior atividade e eficiência do CR face às cinzas volantes como material de adição do CPN.

### Palavras-chave:

Cimento reciclado; Argamassas de cimento reciclado; Termoativação; Cinzas volantes; Retração; Absorção capilar; Caracterização mecânica.

# Abstract

Due to growing environmental concerns, the various countries and international institutions have invested in the search for sustainability and conscious management of natural resources. As in other sectors, the construction industry has made efforts to reduce the consumption of raw materials, the exploitation of natural resources and the level of Greenhouse Gases (GHG) emissions. In this sense, concrete being the material most used in construction, is one of the main sources of environmental impact, with cement, in particular, being the constituent of greatest concern, since it is responsible for over 80% of the GHG of this material. Therefore, it is urgent to find alternative solutions that aim at the use of more eco-efficient binders.

The present work intends to contribute to the increase of knowledge in the development, production and characterization of thermally activated Recycled Cements (RC). For that purpose, a strong experimental component was developed with the main objective of analyzing the shrinkage of mortars produced with partial or total replacement of Ordinary Portland Cement (OPC) by RC, and also the analysis of their synergistic effect in the presence of different levels of Fly Ash (FA). The work considers residues from pastes of different compactness, which allows a more direct analysis of the effect introduced by RC, and also residues from concrete, simulating the most usual real case. Different compositions are considered, considering mortars of equal workability and composition, as well as RC of different fineness. The mortars are also subject to mechanical characterization and analysis of the microstructure through capillary absorption tests.

With this work it was possible to confirm the potentiality of thermoactivated recycled cement as an addition in mortars, and it was verified that for an identical relation to/l, it is possible to obtain mortars with similar behaviour to CPN, but associated with a significant reduction in emissions and thus greater sustainability. The synergetic effect between CR and FA is confirmed, as well as the higher activity and efficiency of CR in relation to fly ash as CPN addition material.

## Keywords:

Recycled cement; Recycled cement mortars; Thermal activation; Fly ashes; Shrinkage; Capillary absorption; Mechanical characterization.

# Índice

Índice de figuras .....	xv
Índice de tabelas .....	xix
Símbolos e abreviaturas.....	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Principais objetivos e metodologia.....	1
1.3. Organização do trabalho .....	2
2. Estado da arte .....	5
2.1. Problemas ambientais.....	5
2.2. Sustentabilidade na indústria do cimento .....	7
2.3. Ciclo de vida do cimento .....	8
2.4. Cimento reciclado.....	10
2.4.1. Origem.....	11
2.4.2. Produção .....	11
2.4.2.1. Recolha e Moagem .....	12
2.4.2.2. Separação .....	13
2.4.2.3. Termoativação.....	13
2.4.3. Características.....	14
2.4.3.1. Massa volúmica e superfície específica.....	14
2.4.3.2. Trabalhabilidade .....	15
2.4.3.3. Resistências Mecânicas.....	16
2.5. Durabilidade do cimento.....	19
2.5.1. Absorção capilar.....	20
2.5.2. Retração .....	20
2.6. Cinzas Volantes .....	21
3. Campanha Experimental.....	25
3.1. Descrição da campanha experimental.....	25
3.2. Produção de pastas e betão de origem .....	26
3.2.1. Materiais .....	26
3.2.2. Composições.....	27
3.2.3. Produção e cura de provetes .....	28
3.2.4. Caracterização no estado fresco e endurecido.....	29
3.3. Britagem, moagem e peneiração do material de origem .....	29
3.4. Termoativação.....	31
3.5. Análise termogravimétrica.....	32
3.6. Análise de difração de raios-x.....	33
3.7. Produção de argamassas .....	33
3.7.1. Materiais .....	33

3.7.2. Cimento reciclado.....	35
3.8. Composição das misturas .....	35
3.9. Produção, cura e pré-condicionamento de provetes .....	37
3.10. Caracterização no estado fresco .....	40
3.10.1. Espalhamento .....	40
3.10.2. Massa volúmica fresca.....	41
3.10.3. Teor de vazios.....	42
3.11. Caracterização no estado endurecido .....	43
3.11.1. Resistência mecânica .....	43
3.11.2. Absorção capilar.....	44
3.11.3. Retração .....	45
4. Análise e discussão de resultados .....	47
4.1. Análise TG.....	47
4.2. Análise DRX .....	49
4.3. Caracterização de argamassas no estado fresco.....	50
4.3.1. Espalhamento.....	51
4.3.2. Massa volúmica fresca e teor de vazios .....	52
4.4. Caracterização de argamassas no estado endurecido.....	53
4.4.1. Resistência mecânica .....	53
4.4.1.1. Eficiência do cimento reciclado .....	54
4.4.1.2. Influência da composição da pasta de origem.....	55
4.4.1.3. Influência da percentagem de cimento reciclado.....	56
4.4.1.4. Influência da granulometria do cimento reciclado.....	57
4.4.1.5. Influência da incorporação de cinzas volantes .....	58
4.4.2. Absorção Capilar .....	59
4.4.2.1. Eficiência do cimento reciclado .....	60
4.4.2.2. Influência da composição da pasta de origem.....	62
4.4.2.3. Influência da percentagem de cimento reciclado.....	63
4.4.2.4. Influência da finura do cimento reciclado.....	64
4.4.2.5. Influência da incorporação de cinzas volantes .....	64
4.4.3. Retração .....	66
4.4.3.1. Eficiência do cimento reciclado .....	66
4.4.3.2. Influência da composição da pasta de origem.....	67
4.4.3.3. Influência da percentagem de cimento reciclado.....	68
4.4.3.4. Influência da granulometria do cimento reciclado.....	69
4.4.3.5. Influência da incorporação de cinzas volantes .....	69
5. Conclusões.....	71
5.1. Conclusões finais .....	71
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	75
6. Referencias bibliográficas .....	77

Anexos.....	85
A1. Análise TG .....	87
A2. Composição das misturas.....	88
A3. Resistências mecânicas à compressão e flexão .....	89
A4. Absorção capilar .....	101
A5. Retração.....	102



## Índice de figuras

Figura 2.1 - Ciclo de vida do cimento Portland considerando uma economia circular. Adaptado de Kajaste e Hurme (2016) e Carriço et al. (2020). .....	9
Figura 2.2 – Ciclo de reativação térmica. Adaptado de Xuan e Shui (2011). .....	14
Figura 2.3 – Relação água/ligante necessária para a mesma consistência, em função da temperatura de termoativação. Adaptado de Xuan e Shui (2011). .....	16
Figura 2.4 – Resistências mecânicas à compressão de argamassas produzidas com cimento reciclado e incorporação de cinzas volantes. Adaptado de Serpell e Lopez (2015). .....	22
Figura 2.5 – Espalhamentos de argamassas produzidas com cimento reciclado e incorporação de cinzas volantes. Adaptado de Serpell e Lopez (2015). .....	23
Figura 3.1 – a) Provetes de PO; b) Misturadora durante a produção do BO; c) Provetes de BO. Adaptado de Real, 2019. ....	29
Figura 3.2 – a) Britadeira de maxilas presente no LC; b) Britadeira de maxilas presente no GEOLAB; c) Moinho de rolos presente no GEOLAB. Adaptados de Real, 2019. ....	30
Figura 3.3 – a) Moinho de bolas; b) Aglomeração do material às paredes do moinho; c) Misturador eletromagnético utilizado durante a peneiração. Adaptado de Real, 2019. ....	31
Figura 3.4 – a) Forno horizontal e tabuleiros utilizados para a termoativação. b) Utilização de termopares para melhor controlo da temperatura. Adaptado de Real, 2019. ....	32
Figura 3.5 – Temperaturas medidas pelos termopares durante a termoativação. ....	32
Figura 3.6 - PANalytical X’Pert Pro utilizado para a análise DRX. ....	33
Figura 3.7 – Misturadora utilizada na produção das argamassas. ....	37
Figura 3.8 – a) Moldes utilizados para a produção dos provetes de argamassa; b) Pormenor dos moldes usados para o ensaio de retração. ....	39
Figura 3.9 – a) Mesa de compactação; b) Molde preenchido com argamassa e rasado; c) Colocação de película plástica para evitar evaporação. ....	39
Figura 3.10 – a) Armazenamento em câmara húmida; b) Armazenamento em câmara seca; c) Secagem em estufa; d) Colocação de película plástica antes do ensaio de absorção capilar. ....	40
Figura 3.11 – a) Materiais utilizados no ensaio de espalhamento; b) Medição do diâmetro resultante do ensaio. ....	41
Figura 3.12 – Pesagem do conjunto argamassa+recipiente. ....	42
Figura 3.13 - Prensa Form+Test Seidner 505/200/10 DM1 utilizada nos ensaios de compressão e flexão. ....	43
Figura 3.14 – a) Ensaio de resistência à flexão; b) Ensaio de resistência a compressão. ....	44
Figura 3.15 – a) Disposição dos provetes durante o ensaio; b) Pormenor do nível da água no tabuleiro. ....	45
Figura 3.16 – a) Pormenor dos apoios metálicos nos provetes; b) Medidor de comprimento Matest E077. ....	46
Figura 3.17 – a) Medição da retração nos provetes; b) Pormenor do encaixe entre o provete e o equipamento. ....	46
Figura 4.1 – Análises TG e DTG realizadas ao CPN, cimento reciclado não termoativado, CRPNT, e cimento termoativado a 700 °C, CRP. De forma esquemática indicam-se os troços correspondentes a Ldh, Ldx e Ldc para o CRPNT. ....	48

Figura 4.2 – Análises DRX realizadas ao CPN, cimentos reciclados não termoativados, CRP35NT e CRPNT e cimentos reciclados termoativados a 700 °C, CRP35 e CRP. C <sub>3</sub> S - silicato tricálcico, C <sub>2</sub> S - silicato bicálcico, C - calcite, P - portlandite, CaO - cal livre, E- etringite. Eixo vertical I(ua) – intensidade das contagens em unidades arbitrárias.....	49
Figura 4.3 – Resultados dos ensaios de espalhamento das misturas produzidas.....	52
Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de massa volúmica fresca de cada mistura produzida. ...	53
Figura 4.5 – Resistências à compressão (à esquerda) e flexão (à direita) em argamassas de igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP. ....	55
Figura 4.6 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP.....	56
Figura 4.7 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	56
Figura 4.8 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) relativas à mistura de referência com 100%CPN em função da percentagem de substituição de CPN por CRP, para argamassas de igual trabalhabilidade. Diferentes idades entre 3 e 90 dias. ....	57
Figura 4.9 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com uma relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	57
Figura 4.10 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP. ....	58
Figura 4.11 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP e 30%CRP + 70%CRP. ....	59
Figura 4.12 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com uma relação a/l de 0,60: 100%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%CRP + 30%Cz + 40%CPN. ....	59
Figura 4.13 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP.....	61
Figura 4.14 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,72: 100%CPNAL e 100%CRP + 2%SP.....	61
Figura 4.15 – Desenvolvimento de porosidade em pastas com CRP (esquerda) e CPN (direita). Esquema indicativo. Adaptado de Real (2020).....	62
Figura 4.16 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP.....	62
Figura 4.17 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,90: 100%CRP35AL e 100%CRP.....	63
Figura 4.18 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	63
Figura 4.19 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	64
Figura 4.20 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP. ....	64

Figura 4.21 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP, 30%CRP + 70%CRP, 100%CPN, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN. ....	65
Figura 4.22 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN.....	65
Figura 4.23 – Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP. ....	67
Figura 4.24 - Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP.....	67
Figura 4.25 – Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	68
Figura 4.26 – Resultados da retração para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.....	68
Figura 4.27 - Resultados da retração para misturas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP.....	69
Figura 4.28 - Resultados da retração para misturas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP, 30%Cz + 70%CRP, 100%CPN, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN. ....	70
Figura A1.1 - Análises TG e DTG realizadas ao CPN, cimento reciclado não termoativado, CRP35NT, e cimento termoativado a 700°C, CRP35.....	87



## Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Massas volúmicas de CR obtidas por diversos autores em função do material de origem, relação a/l e temperatura de reativação.....	15
Tabela 2.2 – Fatores de deterioração dos materiais cimentícios. Adaptado de Bertolini et al. (2005). .....	19
Tabela 3.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do CEM I 42,5R utilizado. ....	26
Tabela 3.2 – Características físicas e geométricas dos agregados utilizados na produção das PO e BO. ....	27
Tabela 3.3 - Composição das PO e BO, por m <sup>3</sup> . ....	28
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados a PO e BO.....	29
Tabela 3.5 – Características físicas das areias utilizadas na produção de argamassas. ....	34
Tabela 3.6 – Análise granulométrica das areias utilizadas. ....	34
Tabela 3.7 – Características físicas e químicas das cinzas volantes (Cz) utilizadas na campanha experimental. ....	34
Tabela 3.8 – Propriedades físicas e químicas do cimento reciclado utilizado na campanha experimental proveniente de pasta com relação a/l de 0,55. ....	35
Tabela 3.9 – Composições das argamassas produzidas neste trabalho. ....	36
Tabela 3.10 – Número de provetes produzidos durante a campanha experimental. ....	38
Tabela 4.1 – Valores da água combinada e coeficiente de hidratação para amostras de CPN, CRPNT, CRP35NT, CRP e CRP35. ....	49
Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, massa volúmica fresca, massa volúmica teórica e teor de vazios. ....	50
Tabela 4.3 – Valores médios obtidos nos ensaios de resistência a compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, realizados as argamassas (MPa). ....	54
Tabela 4.4 – Resultados da absorção e coeficiente de absorção (CA) obtidos no ensaio de absorção capilar. ....	60
Tabela 4.5 - Resultados da retração medida nos ensaios realizados. ....	66
Tabela A2.1 – Composição das misturas produzidas na campanha experimental, por litro. ....	88
Tabela A3.1 – Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CPN, 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN, aos 3 e 7 dias.....	89
Tabela A3.1 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CPN, 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN, aos 28 e 90 dias.....	90
Tabela A2.3 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP35AL, 100% CRP35, 100% CRPNT e 100% CRF, aos 3 e 7 dias. ....	91
Tabela A3.3 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP35AL, 100% CRP35, 100% CRPNT e 100% CRF, aos 28 e 90 dias.....	92
Tabela A3.4 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRB, 100% CRP, 5%CRP + 95%CPN e 15%CRP + 85%CPN, aos 3 e 7 dias. ....	93

Tabela A3.5 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRB, 100% CRP, 5%CRP + 95%CPN e 15%CRP + 85%CPN, aos 28 e 90 dias. ....	94
Tabela A3.6 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN, 15%Cz + 85%CRP e 30%Cz + 70%CRP, aos 3 e 7 dias. ....	95
Tabela A3.7 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN, 15%Cz + 85%CRP e 30%Cz + 70%CRP, aos 28 e 90 dias. ....	96
Tabela A3.8 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP + 2%SP, 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN e 30%CRP + 70%CPN, aos 3 e 7 dias. ....	97
Tabela A3.9 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP + 2%SP, 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN e 30%CRP + 70%CPN, aos 28 e 90 dias. ....	98
Tabela A3.10 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 50%CRP + 50%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN, aos 3 e 7 dias. ....	99
Tabela A3.11 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, $f_{cm}$ e $f_{ctm}$ , respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 50%CRP + 50%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN, aos 28 e 90 dias. ....	100
Tabela A4.1 – Valores médios dos valores de absorção obtidos no ensaio de absorção capilar, em $kg/m^2$ . ....	101
Tabela A5.1 – Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPN, 15%Cz + 85%CPN, 30%Cz + 70%CPN, 100% CRPNT. ....	102
Tabela A5.2 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CRF, 100% CRB, 100% CRP. ....	102
Tabela A5.3 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN. ....	103
Tabela A5.4 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CRP, 30%Cz + 70%CRP, 100% CRP + 2%SP. ....	103
Tabela A5.5 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN. ....	104
Tabela A5.6 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em $x10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CRP35AL, 100% CRP35, 30%Cz + 70%CPN, 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN. ....	104

## Símbolos e abreviaturas

$\rho$  - Massa volúmica

$\varepsilon$  - Retração

a/l - Relação entre a quantidade de água e a quantidade de ligante (água/ligante) presente na mistura.

AL - Mistura produzida propositadamente com a mesma relação a/l

AF - Areia fina

AG - Areia grossa

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Alumina

ACV - Análise de ciclo de vida

BO - Betão de origem

C<sub>2</sub>S - Silicato bicálcico

C<sub>3</sub>A - Aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S - Silicato tricálcico

C<sub>4</sub>AF - Ferroaluminato tetracálcico

CA - Coeficiente de absorção

CaCO<sub>3</sub> - Carbonato de cálcio

CaO - Óxido de cálcio

CH - Ca(OH)<sub>2</sub> - Hidróxido de cálcio

CH<sub>4</sub> - Metano

CO - Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

CR - Cimento reciclado

CRB - Cimento reciclado proveniente de betão

CRF - Cimento reciclado de pasta com relação a/l de 0,55 e dimensões inferiores a 125  $\mu$ m

CRP - Cimento reciclado de pasta com relação a/l de 0,55 e dimensões inferiores a 250  $\mu$ m

CRP35 - Cimento reciclado de pasta com relação a/l de 0,35 e dimensões inferiores a 250  $\mu$ m

CŜ - CaSO<sub>4</sub> - Sulfato de cálcio, gesso

CSH - Silicato de cálcio hidratado

CPN - Cimento Portland

CV - Coeficiente de variação

Cz - Cinzas volantes

DRX - Difração de raios-X

DTG - Termografia diferencial

f<sub>cm</sub> - Valor médio da tensão de rotura à compressão

f<sub>ctm</sub> - Valor médio da tensão de rotura à flexão

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de ferro

G20 - 20 principais produtores de betão no mundo

GEE - Gases de efeito de estufa

GEOLAB - Laboratório de Geociências e Geotecnologias

H<sub>2</sub>O - Água

HR - Humidade relativa

LC - Laboratório de Construção

K<sub>2</sub>O - Óxido de potássio

MgO - Magnésia

NO<sub>x</sub> - Óxidos de azoto

NT - Material não sujeito a tratamento térmico

PO – Pasta de origem

RCD - Resíduos de construção e demolição

SEM - MEV - Microscopia eletrónica de varrimento

SiO<sub>2</sub> - Sílica

SP - Superplastificante

TG - Análise termogravimétrica



# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

Problemas ambientais, como o aquecimento global e as alterações climáticas, têm levado a uma crescente preocupação na procura de sustentabilidade e gestão consciente de recursos naturais. Na indústria da construção, o betão é o produto mais utilizado, sendo responsável pela extração significativa de recursos naturais, deposição de grande quantidade de resíduos em aterro e, sobretudo, elevadas emissões de gases de estufa para a atmosfera, para o qual a produção do Cimento Portland Normal (CPN) é o principal responsável. De facto, o CPN é responsável por aproximadamente 85% das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção do betão, sendo que 95% dessas emissões são atribuídas ao processo de fabrico do clínquer, o seu principal constituinte (Habert *et al.*, 2010).

Tendo em conta a crescente responsabilidade ambiental em relação às emissões geradas pelo sector da indústria cimenteira, recentemente têm sido desenvolvidos vários estudos relacionados com a possibilidade de reciclagem de materiais de base cimentícia, como pastas, argamassas e betões (Shui *et al.*, 2009; Serpell e Lopez, 2015; Wang *et al.*, 2018; Bogas *et al.*, 2019), obtendo-se um ligante mais eco-eficiente de reduzido impacte ambiental e de grande potencial - o Cimento Reciclado (CR).

Nesse sentido, o presente trabalho vem dar seguimento a uma linha de investigação que foi recentemente desenvolvida no IST e que tem por objetivo a produção e caracterização de cimentos reciclados, bem como o estudo da sua incorporação em materiais de base cimentícia, visando a obtenção de produtos 100% reciclados, até hoje nunca atingidos neste domínio.

Atualmente, os estudos realizados estão ainda focados no desenvolvimento do material e na caracterização mecânica de pastas incorporando estes novos ligantes. No entanto, devido à juventude do tema, carecem trabalhos de investigação relacionados com a caracterização ao nível de outras propriedades, como o comportamento diferido e a durabilidade.

## 1.2. Principais objetivos e metodologia

Este trabalho tem como objetivo principal a análise da retração de argamassas produzidas com substituição parcial ou total de CPN por CR, e ainda a análise do seu efeito sinérgico na presença de Cinzas Volantes (Cz), aproveitando o maior teor de cal livre existente nos CR e a pozolanicidade das Cz.

Este trabalho é realizado tendo em conta resíduos provenientes de pasta, cuja obtenção é mais simples e permite uma melhor avaliação do efeito introduzido pelo cimento reciclado, e ainda resíduos provenientes de betão, que apesar de apresentar-se contaminado por outros materiais para além dos cimentícios, traduz uma situação mais real e corrente. De modo a tornar o estudo mais abrangente, são consideradas diferentes composições, tendo em consideração argamassas de igual trabalhabilidade e de igual composição, bem como CR de diferente finura

(diâmetro máximo inferior a 125  $\mu\text{m}$  ou 250  $\mu\text{m}$ ) e cimento reciclado proveniente de pastas de origem de porosidade bastante distinta ( $a/l$  de 0,35 ou 0,55). Foram também produzidos provetes de referência, compostos apenas por CPN, com o objetivo de avaliar o comportamento relativo das argamassas com CR.

O trabalho envolve ainda a análise no estado fresco, a caracterização mecânica e a avaliação da microestrutura das argamassas produzidas através de ensaios de absorção capilar. Pretende-se assim explorar as potencialidades destes novos eco-cimentos, tirando partido dos produtos de desidratação formados após a termoativação do material.

Esta campanha experimental dividiu-se essencialmente em três fases distintas, pretendendo-se simular todos os passos do processo de reciclagem do cimento, desde a recolha e moagem dos materiais de origem até à produção e caracterização destes novos produtos cimentícios.

Para tal, recorreu-se numa primeira fase à moagem e termoativação de pastas e betões previamente produzidos, e de composição conhecida, com a finalidade de simular Resíduos de Construção e Demolição (RCD) possíveis de obter em obra.

Numa segunda fase da campanha experimental, foram produzidas argamassas com diferentes composições: (1) incorporações de cimento reciclado (5 %, 15 %, 30 %, 50 % e 100 %), (2) incorporações de cinzas volantes (15 % e 30 %), (3) CR de diferente grau de finura (<125  $\mu\text{m}$  e <250  $\mu\text{m}$ ), (4) CR obtido de diferentes pastas ou betões de origem (CRP e CRB). As argamassas foram caracterizadas no estado fresco, através da realização de ensaios de espalhamento e de massa volúmica. Finalmente, as várias argamassas foram caracterizadas no estado endurecido, tendo em conta ensaios de compressão, flexão, retração e absorção capilar.

Este trabalho, assente numa forte componente experimental, pretende contribuir para uma melhor compreensão e maior confiança na utilização dos cimentos reciclados e dos materiais de base cimentícia com eles produzidos.

### 1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho foi devidamente estruturado, tendo em conta a campanha experimental realizada, estando dividido em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução.

No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte, onde se focam os principais problemas ambientais no ciclo de vida dos cimentos num contexto atual, como a extração intensiva de recursos naturais e as grandes emissões de gases de efeito estufa associados à sua produção. São abordados os principais trabalhos publicados na área dos cimentos reciclados e referidas algumas das potencialidades futuras na indústria da construção. Neste capítulo apresenta-se a justificação para a realização deste trabalho, bem como a pesquisa bibliográfica que serviu de apoio à sua escrita.

A campanha experimental realizada no âmbito deste trabalho é descrita no capítulo 3, iniciando-se com uma breve exposição desta. Seguidamente, pormenorizam-se as diferentes fases de

produção que deram origem ao cimento reciclado, desde a produção da pasta de origem até à sua moagem e termoativação. Posteriormente, é apresentada a caracterização dos materiais utilizados na formulação das argamassas, bem como as normas e procedimentos seguidos na produção das mesmas. Este capítulo termina com a descrição dos ensaios realizados de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, detalhando-se as normas e procedimentos adotados na realização destes ensaios. Neste capítulo são também abordadas as análises Termogravimétrica (TG) e de Difração Raios-X (DRX) realizadas, que são relevantes para uma melhor interpretação das propriedades, fases e constituintes dos CR no estado anidro.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação e interpretação dos resultados obtidos durante a campanha experimental, constituindo-se como o principal capítulo da dissertação.

Finalmente no capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho, bem como algumas propostas para o desenvolvimento de futuras investigações neste domínio.



## 2. Estado da arte

No presente capítulo é feita uma revisão bibliográfica na área dos cimentos reciclados, fundamentando-se a razão para o desenvolvimento da campanha experimental realizada neste trabalho. Inicialmente, abordam-se algumas das principais problemáticas ambientais na produção do cimento e betão, bem como as estratégias para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Entre elas destaca-se o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD), o desenvolvimento de novas tecnologias de produção e a substituição dos combustíveis fósseis por outros mais eco-eficientes.

Seguidamente, focam-se alguns dos pontos mais relevantes na produção e propriedades do cimento reciclado e dos materiais de base cimentícia com eles produzidos. Destaca-se a maior necessidade de água, o reduzido tempo de presa e o elevado calor de hidratação associado a estes materiais.

No final, é feita uma análise aos estudos realizados sobre o efeito de cinzas volantes em misturas de cimento reciclado, focando-se as potencialidades da interação entre estes dois materiais, ambos provenientes de resíduos industriais.

### 2.1. Problemas ambientais

Atualmente, existe uma crescente preocupação do Homem na sua forma de interagir com o meio ambiente. Temas como o aquecimento global, a crise energética e a escassez de recursos têm sido fortemente apontados como consequências naturais das ações antropogénicas exercidas no meio ambiente (Molion, 2008). Entre estas ações destacam-se: a exploração intensiva de recursos naturais utilizados como matéria-prima; a poluição na forma de libertação de GEE, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); o depósito excessivo de resíduos em aterro; a dependência de combustíveis fósseis na produção de energia.

O custo da energia a nível mundial tem aumentado substancialmente, à medida que as fontes de matéria prima se tornam cada vez mais escassas (EC, 2010). Este facto tem um elevado impacto no custo dos materiais cimentícios devido ao grande consumo de energia associado à sua produção. Por outro lado, os impostos verdes, destinados a taxar os comportamentos nocivos para a saúde do planeta, são cada vez mais elevados, podendo levar a uma duplicação do preço do cimento até 2030 (OECD, 2009).

Com o intuito de combater estes aspetos, têm sido implementadas políticas que promovem a mitigação destas emissões. É exemplo disso a Diretiva 2009/29/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, que estabelece um regime de comércio de licenças de emissão de GEE, promovendo a redução destas com uma boa relação custo-eficácia e de forma economicamente eficiente. Esta Diretiva ambiciona ainda a redução de emissões, em relação aos dados de 1990, em 30 % e 60-80 %, para 2020 e 2050, respetivamente.

Tendo isso em consideração, várias estratégias têm sido consideradas pela indústria da construção, tais como a utilização de tecnologias mais eficientes de produção, a procura de métodos de reutilização e reaproveitamento de RCD e a substituição de combustíveis fósseis por outros alternativos (Ishak e Hashim, 2015; Shi *et al.*, 2016; Rahman *et al.*, 2015).

Procuram-se assim soluções mais sustentáveis, onde se diminuem não só os impactes resultantes da produção, como também a quantidade de matéria prima extraída e o depósito de resíduos em aterro.

Na indústria da construção, destaca-se o betão como o material mais utilizado, com uma produção estimada anual de 3,8 toneladas/pessoa (Gursel *et al.*, 2014). O betão é constituído, essencialmente, por cimento, água, areia e brita. A mineração e extração de agregados representa um problema ambiental menos relevante devido à sua grande abundância, baixo custo e reduzido impacte, significando cerca de 5 % do total do processo, incluindo o seu transporte. Devido a esse facto, muitos estudos descartam a sua análise (Kajaste e Hurme, 2016).

Por outro lado, a produção de cimento Portland normal (CPN), principal ligante do betão, está associado grandes impactes ambientais devido, essencialmente, ao processo de produção do clínquer. Entre os gases libertados para a atmosfera, o CO<sub>2</sub> é um dos mais relevantes, devido ao seu impacto na camada de ozono. Neste caso, o cimento é responsável por mais de 5 % das emissões de CO<sub>2</sub> globais (Kwon *et al.*, 2015). Gursel *et al.* (2014) referem que são também libertados neste processo gases como o monóxido de carbono (CO), o metano (CH<sub>4</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>).

Considerando os 20 principais produtores mundiais, ou G20, a indústria do cimento foi responsável pela produção de 4,1 Bt de cimento em 2017. Este mercado é dominado pela China (56,5 %), seguido pela Índia (6,8 %) e a Europa (6,3 %) (CEMBUREAU, 2017).

A produção de CPN tem também aumentado de ano para ano, revelando uma subida considerável tendo em conta os níveis verificados na década passada, não sendo esperada uma redução a curto prazo. Entre 2008 e 2017, verificou-se um aumento de 60 %, de 2,5 Bt para 4,1 Bt, na quantidade de cimento produzido pelo G20 (CEMBUREAU, 2017).

Segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2013), a indústria do cimento consumiu cerca de 50 % do peso das matérias primas extraídas mundialmente em 2010. Torna-se assim evidente e justificada a crescente preocupação em relação à produção deste material e à ambição na procura de novas técnicas que possibilitem a produção de cimentos mais eco-eficientes.

Gartner e Hirao (2015) apontam que a produção de cimento Portland, com a utilização de fornos a altas temperaturas e grandes libertações de CO<sub>2</sub>, tende a ser o processo mais crítico em termos de emissões de GEE. Mais de 750 kg de CO<sub>2</sub> são libertados para a atmosfera por tonelada de clínquer produzido (Kajaste e Hurme, 2016). Dessas emissões, quase 85 % são devidas ao

processo de produção, no qual cerca de 60 % é atribuído à descarbonatação do calcário para a produção do clínquer, composto maioritário do cimento (Gartner, 2004; Imbabi *et al.*, 2012)

## 2.2. Sustentabilidade na indústria do cimento

Gartner (2004) refere que as 4 principais medidas a ter em conta para a redução das emissões na indústria cimentícia passam por: 1) Equipamentos com maior eficiência energética e menores emissões, 2) utilização de tecnologias de captação e armazenamento de carbono, 3) utilização de combustíveis alternativos em lugar dos combustíveis fósseis tradicionais e 4) utilização de novos substitutos do clínquer.

Segundo Xu *et al.* (2014), a utilização de tecnologias de baixo carbono, como fornos mais eficientes, pode levar a uma redução de 15 % nas emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer. Esta estratégia tem-se demonstrado de difícil implementação devido ao elevado investimento necessário para a substituição dos fornos já existentes. As novas tecnologias de captura de carbono também se têm revelado promissoras, levando a uma redução entre 39 % e 78 % das emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida da produção de cimento (Volkart *et al.*, 2013). No entanto, estes sistemas ainda tardam a ser implementáveis na indústria.

O desenvolvimento de pesquisas na área dos combustíveis alternativos tem vindo também a aumentar, contribuindo não só para a indústria do cimento, mas para toda a indústria em geral. Sjølie (2012) verifica que a utilização de carvão vegetal proveniente de serrações pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento entre 83 % e 91 %, em comparação com o carvão corrente. A utilização de desperdícios, sólidos ou líquidos, também se tem revelado vantajosa, como a substituição de carvão e gás natural por pneus usados e fuelóleos, conduzindo a reduções de 15 % na emissão de GEE (Gursel *et al.*, 2014).

Os substitutos parciais do cimento com origem em resíduos industriais, como cinzas volantes, sílica de fumo e escórias de alto forno têm também ganho relevância nos últimos anos. O reaproveitamento destes materiais, sendo eles subprodutos de outras atividades industriais, possui uma dupla vantagem, evitando a sua deposição em aterro e ainda limitando o uso de clínquer. Por sua vez, a argila calcinada afigura-se como a adição mais promissora para o futuro próximo, devido à sua abundância e baixo custo de produção. Jacoby e Pelisser (2015) testaram também a incorporação parcial de resíduos de porcelana como substituto de cimento Portland em pastas e argamassas. Os autores concluíram que, para uma substituição de 20 %, as resistências mecânicas aumentavam 14 %. A interação com cinzas volantes, discutida em maior detalhe no subcapítulo 2.6.

Usón *et al.* (2013) utilizou ainda como substitutos parciais para o cimento Portland resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto, biomassa e pneus usados, verificando que a sua substituição apenas se torna viável em baixas quantidades.

A reutilização de RCD tem também sido alvo de extensas pesquisas, não apenas como substituto de agregados minerais na produção de betão, como também em camadas de sub-base de

pavimentos rodoviários (Poon e Chan, 2007). A substituição de agregados grossos naturais por agregados de betão reciclado foi investigada por Dhir *et al.* (2007), tendo estes autores concluído que a substituição parcial destes por outros reciclados, até 30 %, não influenciou significativamente as características mecânicas do novo betão. Khatib (2005) obteve resistências entre 15-30 % inferiores ao substituir agregados finos naturais, até 5 mm, por agregados reciclados em betões. O mesmo autor verificou ainda que a incorporação de agregados de tijolos, até 50 %, não afetou as suas propriedades a longo-prazo. Bogas *et al.* (2016), num estudo posterior, constataram também que a incorporação parcial de agregados reciclados finos não afetou significativamente a resistência do betão à fissuração interna e ao ciclo gelo-degelo, se substituído parcialmente até 50 %. No entanto, esta medida apesar de contribuir para a produção de betões mais sustentáveis, não resolve o maior problema relacionado com a produção e utilização do cimento.

### 2.3. Ciclo de vida do cimento

Devido ao seu elevado impacto, tanto ao nível da extração de recursos como também de emissões de GEE e depósitos em aterro, o ciclo de vida do cimento tem sido analisado tendo em vista a formulação de alternativas eco-eficientes que permitam a redução destes fatores. Tirando partido do facto da economia do cimento ser uma economia linear, ou seja, com início na extração e término no depósito em aterro, muitas propostas têm sido sugeridas para tornar esta uma economia circular, com base no reaproveitamento de resíduos e reutilização destes para a produção de novos produtos.

O ciclo de vida do cimento, tal como descrito por Coutinho (1988), inicia-se nas pedreiras de rochas calcárias e margosas, habitualmente próximas das fábricas de produção devido a facilidades logísticas. A matéria prima, constituída maioritariamente por calcário, marga e argila, é extraída em forma de grandes blocos com recurso a explosivos, depositados no interior de furos previamente realizados no maciço. Os blocos resultantes desses processos, com dimensões que podem atingir os 2 m, são posteriormente encaminhados para um britador, geralmente de maxilas, onde estes são britados, obtendo-se um material relativamente fino com partículas de dimensões até 10 cm.

O material é então depositado em silos verticais, onde se efetua uma pré-homogeneização, e é posteriormente moído com recurso a moinhos de mós ou de bolas, dando origem a um material fino designado habitualmente por *cru*, ou farinha. O processo de moagem pode ser realizado por duas vias, a via seca e a via húmida. Schorcht *et al.* (2013) refere que, em 2007, 90 % da produção europeia foi realizada por via seca, representando esta uma poupança energética entre 56 % e 66 % em relação à via húmida (Burange e Yamini, 2009). Devido à natureza bastante variável da matéria prima, é necessário por vezes a correção da composição do *cru* antes da sua entrada no forno, podendo ainda ser adicionados óxido de ferro, areia siliciosa e bauxite.

Após a moagem e correção dos seus constituintes, o *cru* é transportado para torres de ciclones onde se realiza a sua homogeneização e pré-aquecimento, sendo posteriormente introduzido em

fornos rotativos onde se procede à sua cozedura a elevadas temperaturas. Estes fornos possuem, habitualmente, entre 50 e 200 m de comprimento e entre 3 a 4 % de inclinação, sendo que a temperatura no seu interior aumenta gradualmente à medida que este é percorrido pelo material, atingindo-se temperaturas que podem chegar aos 1500 °C. Devido às elevadas temperaturas, originam-se reações químicas que levam à formação do clínquer, principal constituinte do cimento. Como visto em 2.1., estas reações, principalmente a descarbonatação do calcário, são responsáveis por uma grande parte do CO<sub>2</sub> libertado em toda a produção. É também nesta etapa que é consumida uma grande quantidade de combustíveis fósseis para a produção de energia de alimentação do forno.

À saída do forno, o material é arrefecido bruscamente pelo ar exterior dentro de arrefecedores, ou planetários, evitando-se a inversão das reações químicas ocorridas no forno. Obtém-se assim o clínquer, material granulado com forma esférica e diâmetros compreendidos entre os 10 e 30 mm. São posteriormente adicionados aditivos à sua constituição, sendo o mais comum o gesso, utilizado como retardador de presa. Finalmente, efetua-se a moagem de todos os constituintes, obtendo-se no final um material com finura média na ordem dos 50 µm, conhecido por cimento Portland. O cimento é então devidamente armazenado em silos, podendo ser fornecido a granel ou ensacado.

Após a utilização e demolição dos materiais de base cimentícia produzidos com cimento Portland originam-se enormes quantidades de resíduos cimentícios. Atualmente, a grande maioria desses resíduos é depositado em aterro, não tendo qualquer finalidade após o período de vida útil (Kajaste e Hurme, 2016). Neste sentido, a reciclagem do cimento vem oferecer uma alternativa ecológica na área dos materiais cimentícios, promovendo a reintegração dos RCD na cadeia inicial do cimento Portland, o que conduz a uma economia verdadeiramente circular (Figura 2.1).

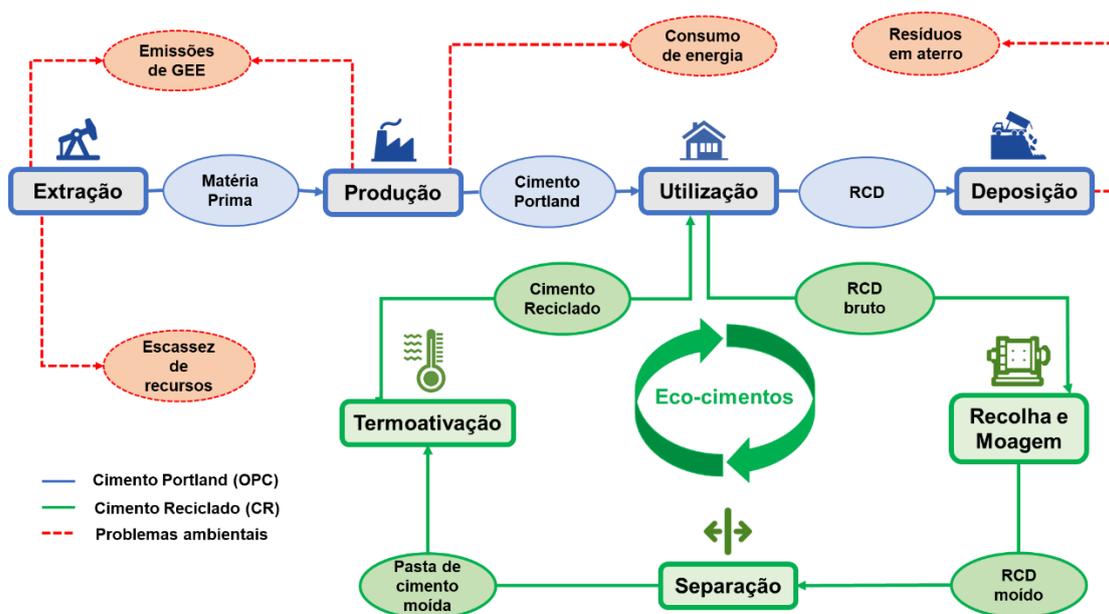


Figura 2.1 - Ciclo de vida do cimento Portland considerando uma economia circular. Adaptado de Kajaste e Hurme (2016) e Carriço et al. (2020).

Num estudo desenvolvido por um colega, no âmbito do projeto que se encontra em desenvolvimento no IST, Guedes (2019) procedeu à análise de ciclo de vida (ACV) do cimento reciclado, comparando-o ao do cimento Portland produzido na Europa. Nesse estudo, pretendeu-se identificar potenciais oportunidades de melhoria ao longo do ciclo de vida do cimento, que permitam à indústria do betão atingir novas metas na sustentabilidade dos seus produtos e processos.

Em termos energéticos, foram obtidos valores de consumo de energia elétrica mais baixos para o CPN em comparação com o cimento reciclado, sendo os consumos por tonelada de cimento de 4362 MJ e 4852 MJ, respetivamente. Destacam-se entre as principais diferenças no consumo de energia na produção dos dois cimentos um consumo 14,4 vezes superior na energia despendida na obtenção de matéria prima para produção dos CR, face aos obtidos para o CPN, sendo que a etapa de transporte também revelou consumos 24,5 vezes superiores para o cimento reciclado. Apenas os consumos energéticos correspondentes à fase de fabrico foram menores para o CR, sendo este 0,7 vezes inferior. No entanto, existe uma substancial redução da energia térmica consumida na produção dos cimentos reciclados em relação ao CPN, de 4105 MJ para 1892 MJ.

Em geral, observou-se uma redução nas emissões de GEE para a atmosfera devido, essencialmente, à redução das emissões nos processos de britagem, moagem e clinquerização. Mesmo tendo em conta o aumento do consumo global de energia em 11 %, verifica-se uma redução de 54 % na energia térmica com origem na queima de combustíveis fósseis, tornando o seu impacto menos significativo em termos de emissões de GEE. O principal impacto na produção do cimento reciclado está na redução superior a 80% no nível de emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer.

## 2.4. Cimento reciclado

Neste subcapítulo, abordam-se mais aprofundadamente os principais aspetos relacionados com o cimento reciclado. Inicialmente, é feita referência à origem e composição deste material, proveniente da desidratação de materiais cimentícios previamente hidratados, como pastas de cimento, argamassas e betões.

Posteriormente, enumeram-se as diferentes fases de produção. Problemas nos métodos de separação de pasta e agregados, para o caso do betão, baixa eficiência na moagem e incerteza na temperatura ótima de termoativação são os principais obstáculos a ultrapassar neste momento, sendo que por vezes são reportados resultados contraditórios na literatura.

No final, abordam-se temáticas relacionadas com as características físicas e mecânicas dos cimentos reciclados. A maioria dos autores revela que os CR possuem uma maior necessidade de água devido à sua maior porosidade e superfície específica. Na maioria dos estudos é também observado um maior calor de hidratação e um menor tempo de presa neste tipo de cimento em comparação com cimento Portland.

Todos estes fatores levam a uma elevada expectativa da comunidade científica em relação a este material. Os resultados obtidos até ao momento são encorajadores, sendo notória a evolução realizada na busca por um material cimentício mais eco-eficiente. Todavia, colocam-se ainda vários desafios na viabilidade prática e económica deste material.

### 2.4.1. Origem

A ignição para o desenvolvimento do cimento reciclado, ou termoativado, remonta ao final do séc. XX. Crook e Murray (1970) reportaram pela primeira vez a recuperação de resistência mecânica de betões hidratados, após a exposição destes a elevadas temperaturas. Estes autores observaram, durante o seu estudo sobre o comportamento de estruturas de betão ao fogo, que os resíduos provenientes da exposição de betão a altas temperaturas conseguiam recuperar algumas das suas capacidades hidráulicas ligantes iniciais se hidratados novamente, formando produtos semelhantes aos produtos iniciais de hidratação.

Spittgerber e Mueller (2003) apresentaram a primeira abordagem ao tema dos cimentos reciclados termoativados. Neste estudo, os autores concluíram que ao submeter materiais cimentícios previamente hidratados a altas temperaturas, estes recuperavam algumas das suas fases cristalinas não-hidratadas, podendo recuperar também as suas características físicas e mecânicas iniciais.

Com este e outros estudos (Alonso e Fernandez, 2004), concluiu-se que é possível produzir um material com características ligantes semelhantes aos produtos correntes, utilizando resíduos de materiais cimentícios. Este facto permite não só atingir uma economia circular para o cimento, sem recurso a extração de matéria prima nem a depósito de resíduos em aterro, como também reduzir drasticamente as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e a energia associada à sua produção.

### 2.4.2. Produção

O processo de produção do CR tira proveito do facto de não serem necessárias temperaturas elevadas no forno para a obtenção de um novo material ligante, consumindo-se assim menos energia e, conseqüentemente, menos combustível na sua produção. As reações químicas que ocorrem no forno durante a reativação térmica são também controladas para evitar a emissão excessiva de GEE. Ao serem evitadas elevadas temperaturas no forno, acima de cerca de 800-900 °C, as reações de descarbonatação de eventual calcite, CaCO<sub>3</sub>, presente no material, ocorrem em menor quantidade, havendo assim uma menor libertação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

A produção de cimento reciclado pode ser dividida em 3 etapas principais: (1) recolha e moagem, (2) separação e (3) termoativação. Cada uma destas fases apresenta diversas dificuldades e desafios a ultrapassar, mas os estudos que têm sido realizados têm permitido tornar cada vez mais viável a produção sustentável do cimento reciclado.

#### 2.4.2.1. Recolha e Moagem

A reciclagem de materiais cimentícios tem início na recolha e tratamento dos RCD. A recolha destes resíduos coloca bastantes desafios ao nível da informação sobre a sua composição. De acordo com Xuan e Shui (2011), as características do material original, nomeadamente a sua relação água/ligante ( $a/l$ ), têm influência nas características físicas e mecânicas dos novos produtos. As características dos agregados, que contaminam o produto final, também assumem influência.

Um dos grandes obstáculos, passa exatamente pela separação dos constituintes do betão, não existindo até ao momento um método de implementação individual que seja comprovadamente viável. Isso é abordado em 2.4.2.2.

Partindo do material separado ou de pastas cimentícias de origem, como sucede na maioria dos estudos laboratoriais, procede-se à trituração e moagem do material. Este procedimento tem como objetivo a redução dos resíduos cimentícios a pó. Assim, reduzindo o grau de finura do material, obtém-se uma maior superfície específica das partículas, promovendo-se condições a um maior grau de hidratação do cimento, e um conseqüente aumento das suas propriedades mecânicas (Marchon e Flatt, 2016). Tal como no CPN, a etapa de moagem é realizada em moinhos de bolas.

Com o objetivo de avaliar a influência do grau de finura do cimento reciclado, a grande maioria dos autores realizou ainda uma peneiração do material retirado dos moinhos de bolas (Bogas *et al.*, 2019; Serpell e Lopez, 2015; Xuan e Shui, 2011). Este procedimento tem sido reportado na literatura como um grande obstáculo na produção de cimento reciclado devido ao seu baixo rendimento, para granulometrias próximas das encontradas no CPN. No entanto, pensa-se que este problema possa ser ultrapassado a nível industrial.

A maioria dos estudos realizados sobre cimentos reciclados reativados utiliza um grau de finura inferior a 125  $\mu\text{m}$ , sendo ligeiramente superior aos 50  $\mu\text{m}$  do CPN. Tendo isso em conta, Neto (2019) confirmou que para granulometrias mais finas, obtiveram-se resistências mecânicas ligeiramente superiores.

Zhang *et al.* (2018) e Yu e Shui (2013) reportam uma maior aglomeração de partículas de cimento reciclado em comparação com o cimento Portland. Verificou-se também uma excessiva aderência nas paredes interiores do moinho de bolas durante a moagem. Estes dois fenómenos são atribuídos à humidade presente entre as partículas de cimento reciclado que, ao terem uma maior superfície específica e um menor grau de finura, aglomeram-se com maior facilidade devido ao efeito de capilaridade entre elas.

Com vista a reduzir a água presente nas partículas durante a moagem, alguns autores optaram por pré-aquecer o material em estufa, a baixas temperaturas, antes da colocação deste no moinho de bolas (Shui *et al.*, 2014; Xuan e Shui, 2011).

#### 2.4.2.2. Separação

Como referido, a separação dos constituintes do betão é uma etapa fulcral do processo de reciclagem do cimento. Este procedimento, que visa a separação entre os agregados naturais e a pasta de cimento, é um dos mais desafiantes na produção do CR. Essa dificuldade na separação entre agregados e ligante leva muitos dos autores a analisar apenas a pasta original desidratada (Shui *et al.*, 2009; Bogas *et al.*, 2019; Serpell e Lopez, 2015).

O material resultante da moagem é constituído por partículas de pasta de cimento juntamente com os agregados naturais utilizados na produção do betão de origem. A presença de agregados no cimento reciclado não é desejável, pois reduz a eficiência do processo. O método de separação a utilizar é fortemente influenciado pelas características dos agregados naturais presentes no betão de origem. Entre outros, foram propostos vários métodos de separação mecânica (Florea *et al.*, 2014) e térmica (Ahn *et al.*, 2001), mas nenhum deles com grande sucesso. Métodos alternativos de descarga elétrica de alta voltagem e micro-ondas foram também avaliados, sendo que os resultados estão também longe dos pretendidos (Akbarnezhad *et al.*, 2011; Shigeishi, 2017), para além de serem métodos de difícil aplicação prática. Recentemente, no departamento de engenharia civil do IST foi desenvolvido um procedimento de separação que se mostrou efetivo e muito promissor para aplicação industrial. Esse procedimento, para o qual foi desenvolvida uma patente (A116130, 2020), foi considerado no presente documento.

#### 2.4.2.3. Termoativação

A termoativação, tratamento térmico ou reativação térmica, é o processo mais importante na recuperação das propriedades ligantes dos cimentos hidratados (Shui *et al.*, 2009). Com este processo, pretende-se que os resíduos de pasta de cimento endurecido sejam submetidos a elevada temperatura para que ocorra a desidratação dos seus compostos hidratados.

Para uma adequada termoativação de pastas de cimento previamente hidratadas existem três fatores principais a ter em consideração: (1) Rampa de aquecimento; (2) temperatura ótima e tempo de residência no forno; (3) taxa de arrefecimento.

Não existem ainda estudos aprofundados sobre a influência da rampa de aquecimento na termoativação de cimentos, sendo que os valores normalmente utilizados por outros autores oscilam entre os 5 e 15 °C/min (Shui *et al.*, 2009; Angulo *et al.*, 2015; Bogas *et al.*, 2019).

A temperatura ótima e o tempo de permanência no forno têm sido temas recorrentemente abordados na literatura. A otimização destes dois fatores permite não só uma redução do consumo de energia e combustíveis fósseis utilizados para a produção do CR, como também uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, evitando a reação de descarbonatação da calcite, responsável pelo CO<sub>2</sub> libertado durante a produção do clínquer (ver 2.1). Procura-se assim uma redução nos tempos e temperaturas utilizadas, comprometendo o mínimo possível as características dos produtos finais.

As pesquisas até agora realizadas, com períodos de cura da pasta de origem entre 28 e 90 dias, avaliaram temperaturas de termoativação compreendidas entre 100-900 °C, constatando-se, em geral, temperaturas ótimas entre 600-800 °C (Bogas *et al.*, 2019; Shui *et al.*, 2009; Xuan e Shui, 2011). No entanto, Wang *et al.* (2018) obteve melhores desempenhos mecânicos para tratamentos a 450 °C, sendo que o período de hidratação dos materiais originais nesse estudo foi de 2 anos. A maior eficiência obtida a esta temperatura foi atribuída à desidratação atingida ao nível da tobermorite modificada dos cimentos termoativados.

O tempo de permanência no forno é quantificado pelo período necessário ao desenvolvimento das reações de desidratação e decomposição do cimento hidratado. Diferentes tempos de permanência no forno foram avaliados por diversos autores, variando estes entre 1 e 8 horas (Wang *et al.*, 2018; Serpell e Lopez, 2013). No entanto, a maioria dos autores tem adotado como tempo de permanência no forno entre 2 a 3 horas (Vyšvařil *et al.*, 2014).

Finalmente, após o tratamento térmico, o material termoativado é arrefecido até à temperatura ambiente. Este arrefecimento pode realizar-se de um modo lento, deixando o cimento dentro do forno até à estabilização da temperatura, ou de um modo rápido, com recurso a ventiladores (Angulo *et al.*, 2015). Serpell e Lopez (2015) verificaram que a taxas de arrefecimento mais baixas correspondem resistências mecânicas mais elevadas, apesar de ter pouca influência. O ciclo adotado por Xuan e Shui (2011) no tratamento térmico apresenta-se na Figura 2.2.

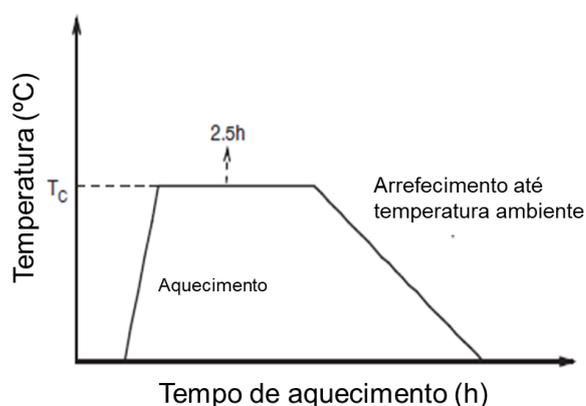


Figura 2.2 – Ciclo de reativação térmica. Adaptado de Xuan e Shui (2011).

### 2.4.3. Características

Apresentam-se agora algumas características do CR verificadas em estudos prévios sobre este tema, focando-se principalmente as diferenças em relação à sua massa volúmica, necessidade de água e resistências mecânicas obtidas em relação ao cimento Portland.

#### 2.4.3.1. Massa volúmica e superfície específica

Como verifica Neville (2012), a massa volúmica do cimento Portland anidro toma valores próximos de 3100 kg/m<sup>3</sup>. As massas volúmicas dos CR são características fortemente dependentes do tipo de material original, da sua relação a/l e também do tratamento térmico adotado. Os resultados obtidos nos estudos consultados são indicados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Massas volúmicas de CR obtidas por diversos autores em função do material de origem, relação a/l e temperatura de reativação.

Autor	Material original	a/l	Temperatura de reativação (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Serpell e Lopez (2015)</b>	Pasta de cimento	0,50	20	2400
			660	2810
			940	3120
<b>Spittgerber e Muller (2003)</b>	Pasta de cimento	0,40	600	2750
			1400	3220
<b>Bogas et al. (2019)</b>	Pasta de cimento	0,45	20	1975
			350	2233
			650	2307
	Betão		20	2404
			350	2505
	650	2595		
<b>Ma et al. (2010)</b>	Betão	0,50	750	2670
<b>Florea et al. (2014)</b>	Betão	0,50	20	2520
			500	2650
			800	2920
			900	2890

Assim, constata-se uma redução significativa das massas volúmica dos cimentos reciclados, apresentando cerca de 2700 kg/m<sup>3</sup> para tratamentos térmicos acima dos 500 °C. Essa diminuição é justificada pela maior porosidade destes cimentos em comparação com o CPN.

Bogas *et al.* (2019) e Serpell e Lopez (2015) verificaram também um claro aumento da massa volúmica do CR com o aumento da temperatura de termoativação. Este facto é justificado pela desidratação e decomposição do CR. O aumento da temperatura de reativação origina ainda uma maior fissuração e separação entre as partículas do CR, conferindo lhes uma menor dimensão e, subsequentemente, maior massa volúmica e superfície específica.

Tal como a massa volúmica, também a superfície específica dos cimentos reciclados varia bastante em relação ao CPN. Baldusco *et al.* (2017), utilizando o método de adsorção de azoto, observaram uma superfície específica do CR de aproximadamente 25 m<sup>2</sup>/g, ou seja, 24 vezes superior à do CPN.

#### 2.4.3.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade de uma pasta, argamassa ou betão no estado fresco que determina a facilidade com que estes podem ser misturados, aplicados, compactados e acabados (ACI116R-90, 2000). Esta característica dos materiais cimentícios é fortemente dependente da relação água/ligante da mistura. A quantidade de água presente na mistura influencia a distância entre as partículas de cimento. Assim, com um aumento desta, a distância entre partículas de cimento sofre também um aumento, conduzindo a uma maior trabalhabilidade no estado fresco e uma menor resistência mecânica no estado endurecido (Aïtcin e Flatt, 2015).

A maioria dos autores verificou uma maior necessidade de água nas misturas que continham pasta de cimento reativada do que com CPN. Serpell e Lopez (2015) e Xuan e Shui (2011) justificam este facto pela maior superfície específica, maior porosidade e ainda a presença de CaO nos CR. Yu e Shui (2013) verificaram também este fenómeno, relatando que a aglomeração das partículas de cimento reciclado ocorre devido a uma maior retenção de água nos poros interiores das partículas. Esta água, mesmo estando presente na mistura, não contribui para a sua trabalhabilidade, conduzindo a um aumento da quantidade de água na pasta com CR do que com CPN, para igual trabalhabilidade.

Shui *et al.* (2009) analisaram no seu estudo as características de pastas de cimento termoativadas entre 300-900 °C. Estes autores confirmaram a elevada necessidade de água, concluindo também que esta é proporcional ao aumento da temperatura de termoativação. Este fenómeno foi também observado por Bogas *et al.* (2019), verificando que este foi mais acentuado em cimentos produzidos com resíduos de pasta, em comparação com os cimentos produzidos com resíduos de betão. Esse facto é justificado pelos autores, como já era expectável, com a maior quantidade de material cimentício na composição das misturas provenientes de pastas.

A relação água/ligante do material de origem também afeta a necessidade acrescida de água da pasta desidratada. Conforme Xuan e Shui (2011), pastas com uma relação a/l do material original mais elevada revelaram maior necessidade de água quando reidratadas. Estes autores, ao produzirem provetes de pasta de cimento reciclado, proveniente de pastas de CPN com relações água/ligante de 0,30 e 0,50, verificaram uma maior necessidade de água nas segundas. As relações água/ligante obtidas para a mesma trabalhabilidade, do cimento Portland de referência, cimento hidratado não reativado e cimento reativado a 300-900 °C foram de 0,27, 0,32, 0,48 e 0,69, respetivamente. A água necessária para a mesma consistência obtida por estes autores é indicada na Figura 2.3.

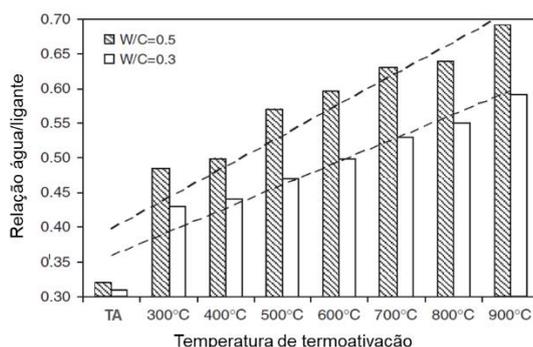


Figura 2.3 – Relação água/ligante necessária para a mesma consistência, em função da temperatura de termoativação. Adaptado de Xuan e Shui (2011).

#### 2.4.3.3. Resistências Mecânicas

Como referido em 2.4.3.1, os cimentos reciclados apresentam uma elevada superfície específica, alta porosidade e forte tendência aglutinante. Estes fatores conduzem a uma necessidade excessiva de água para a mesma consistência normal. O aumento da quantidade de água permite melhorar a sua trabalhabilidade, sendo que em contrapartida, reduz as suas

propriedades físicas e mecânicas, conferindo-lhe menores resistências e maior porosidade (Arandigoyen *et al.*, 2005).

A resistência inicial ganha pela pasta com CPN deve-se, fundamentalmente, à presença de silicatos tricálcicos,  $C_3S$ , na sua composição. Este composto, por ter uma maior velocidade de hidratação do que o silicato bicálcico,  $C_2S$ , reage em maior quantidade, formando uma camada de gel amorfo de silicato de cálcio hidratado, gel-CSH, e também de hidróxido de cálcio, CH (Mindess *et al.*, 2003). Nos cimentos reciclados, apesar de existir apenas  $C_2S$ , este tende a ser mais reativo do que o  $\beta$ - $C_2S$ , justificando o facto de se verificarem casos em que a resistência pode ser semelhante à dos CPN, para idêntico a/l (Carriço *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2018).

O grau de finura utilizado constitui também um fator de influência nas capacidades resistentes do CR. Bogas *et al.* (2019), relatam um ganho de resistência inicial mais elevado para misturas com menor grau de finura. Neto (2019) obteve resultados semelhantes para idades jovens, verificando que a redução da finura do cimento reciclado de 45-125  $\mu m$  para <45  $\mu m$  não influenciou significativamente as resistências mecânicas a longo prazo.

Num estudo anterior, Shui *et al.* (2009) analisaram as características de pastas de cimento produzidas com cimento reciclado. Este material, proveniente da desidratação de pastas de cimento previamente hidratadas e com relação água/ligante de 0,50, foi curada durante 30 dias em ambiente húmido, sendo posteriormente moído até um grau de finura <75  $\mu m$ . A reativação térmica abrangeu temperaturas compreendidas entre 300-900  $^{\circ}C$ . A rampa de aquecimento utilizada foi de 10  $^{\circ}C/min$ , sendo que o período de tratamento de todas os materiais foi de 2,5 h, com arrefecimento lento. Os provetes foram então ensaiados aos 3, 7 e 28 dias, verificando-se um crescente aumento de resistência à compressão com o aumento da temperatura de reativação, no intervalo 300-800  $^{\circ}C$ . Estes autores relataram também um elevado ganho de resistência inicial, ao contrário do observado para o cimento de referência, invertendo-se essa tendência para idades mais avançadas. A resistência máxima obtida aos 28 dias, de aproximadamente 20 MPa, verificou-se no material tratado a 800  $^{\circ}C$ , correspondendo esta a 60 % da resistência verificada para o CPN de referência.

Bogas *et al.* (2019) produziram argamassas com diferentes incorporações de cimento reciclado provenientes de provetes de pastas (PO) e betões (BO) de origem conhecida. Foi utilizado para a formulação destas misturas um cimento Portland CEM I 42,5R, sendo que ambos foram produzidos com uma relação a/l de 0,45. Os provetes originais foram então moídos após 90 dias de cura em ambiente húmido. Os graus de finura utilizados neste estudo compreendiam as frações 125-1000  $\mu m$  e 63-125  $\mu m$ . Os diferentes tipos de material foram termoativados às temperaturas de 350  $^{\circ}C$  e 650  $^{\circ}C$ . Foram então produzidos provetes de argamassa com diferentes incorporações de cada um dos materiais, 20 %, 50 %, 75 % e 100 %, sendo que as argamassas foram mantidas em ambiente húmido até aos 7, 28 e 90 dias de idade.

Como era expectável, as misturas com origem em pastas revelaram sempre melhores resultados em comparação com as produzidas a partir de betão, facto justificado com a menor quantidade

de cimento presente nestas últimas. Estes autores verificaram ainda que o grau de finura influencia com alguma relevância as resistências mecânicas iniciais. Entre as misturas com 100 % de incorporação de PO e BO, os autores obtiveram melhores resultados para a fração mais fina de PO, submetida a um tratamento térmico a 650 °C, atingindo-se valores de 8,3 MPa aos 28 dias. Em comparação com o CPN de referência, verificou-se uma redução de 61 % e 80 % dos valores de resistência à compressão da PO e BO, respetivamente.

Xuan e Shui (2011) realizaram um estudo no mesmo âmbito, termoativando pastas de cimento, previamente hidratadas e curadas em ambiente húmido por 30 dias. Estas pastas foram então moídas e termicamente reativadas durante 2,5h a temperaturas compreendidas entre 300-900 °C. Foi adotada pelos autores uma rampa de aquecimento de 10 °C/min e arrefecimento lento para o tratamento. Este estudo envolveu a utilização de pastas com duas relações água diferentes, 0,30 e 0,50 e grau de finura inferior a 75 µm. As resistências mecânicas obtidas pelos autores foram superiores para a relação água/ligante de 0,3, sendo que os melhores resultados para esta mistura, aproximadamente 27 MPa, corresponderam a tratamentos a 800 °C. Por outro lado, a pasta com relação água/ligante de 0,50 atingiu valores máximos para tratamentos a 700 °C, apenas registando valores máximos de 19 MPa. Em comparação com misturas produzidas com cimento Portland de referência para as mesmas relações a/l de 0,30 e 0,50, foram obtidas resistências de 70 MPa e 33 MPa, ou seja, uma redução de aproximadamente 40 % e 60 %, respetivamente.

Os autores justificam este fenómeno com a maior presença de cimento não-hidratado na pasta original com menor relação a/l, aumentando a quantidade de cimento Portland anidro na composição das novas misturas, conferindo-lhe maiores resistências mecânicas.

Wang *et al.* (2018) realizaram uma abordagem diferente de outros autores, utilizando para a produção de cimento reciclado uma pasta de cimento previamente hidratada com 2 anos de cura. Estas condições de pré-tratamento visam uma aproximação mais realista aos RCD depositados em aterro. Após a moagem, o material com um grau de finura <150 µm foi reativado a diferentes temperaturas, 120 °C, 450 °C, 750 °C, 1100 °C. A rampa de aquecimento utilizada foi de 7 °C/min e um tempo de permanência no forno de 8 h, com arrefecimento lento dentro do mesmo. Os resultados obtidos por este autor revelam uma diferença significativa para os outros autores, sendo a temperatura de 450 °C a que apresentou melhores resultados mecânicos. Para a temperatura ótima verificada, os resultados de resistência à compressão atingiram aproximadamente 30 MPa, sendo que a adição de escórias de alto-forno permitiu um aumento, pouco significativo, dessas mesmas resistências.

Alguns autores verificam também uma perda de eficiência dos cimentos reciclados ao longo do seu armazenamento. Neto (2019) justifica este facto devido à natureza mais reativa destes cimentos e também pela presença em maiores quantidades de cal livre, CaO, extremamente reativa com a humidade. Este fenómeno leva a uma reidratação parcial da superfície das partículas, aumentando assim a sua aglomeração. Essa aglomeração pode provocar menores taxas de hidratação da pasta e, conseqüentemente, perda de capacidade mecânica.

## 2.5. Durabilidade do cimento

A definição de durabilidade está intrinsecamente ligada ao desempenho que um elemento cimentício tem quando sujeito às ações de deterioração do meio onde este se insere. Na prática, considera-se que um material é durável quando este consegue desempenhar as suas funções durante o tempo definido inicialmente (Bogas, 2011).

O cimento, sendo um material com uma vasta gama de aplicações, é usualmente exposto aos mais variados tipos de ambiente, podendo estes causar uma aceleração na sua degradação. A degradação do cimento pode ser originada por fatores mecânicos, físicos, estruturais, químicos ou biológicos, como referem Bertolini *et al.* (2005), sendo que exemplos desses fatores podem ser consultados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fatores de deterioração dos materiais cimentícios. Adaptado de Bertolini *et al.* (2005).

<b>Causas</b>	<b>Fenómeno</b>
<b>Mecânicas</b>	Abrasão
	Impacto
	Erosão
	Cavitação
<b>Físicas</b>	Gelo-degelo
	Fogo
	Variações Térmicas
	Retração Plástica
<b>Estruturais</b>	Carga Excessiva
	Assentamentos
	Carga cíclica
	Vibrações
<b>Químicas</b>	Ácidos
	Álcalis-sílica
	Sulfatos
	Carbonatos
<b>Biológicas</b>	Musgos
	Incrustações

Ao contrário das causas mecânicas e estruturais, as causas de deterioração físicas, químicas e biológicas são fortemente afetadas pelas propriedades de transporte dos materiais cimentícios. Estas propriedades permitem a movimentação de fluidos, na forma de líquido ou gás, no seu interior através dos seus poros, originando uma aceleração na degradação das suas propriedades. Assim, propriedades como a absorção capilar ou a permeabilidade revelam bastante influência no aparecimento e propagação de outros fenómenos.

Até ao momento foram apenas publicados alguns estudos de caracterização microestrutural com cimentos reciclados, e essencialmente qualitativos, baseados em análises MEV (Shui *et al.*, 2009; Bogas *et al.*, 2019). Nesse sentido, para estes materiais ainda muito recentes, importa a realização de estudos adicionais.

No presente trabalho, e no que a durabilidade diz respeito, apenas são focados os mecanismos de retração e absorção capilar associados ao cimento reciclado, sendo que por essa razão esses serão os únicos processos descritos em maior detalhe neste subcapítulo. Refere-se ainda que não foram encontrados na literatura estudos que abrangessem estes dois temas, o que motiva e justifica ainda mais a realização dessa avaliação no presente trabalho.

### 2.5.1. Absorção capilar

O fenómeno conhecido por absorção capilar, ou capilaridade, pode ser definido como a capacidade que um sólido poroso tem em absorver um determinado líquido pelos poros nele existentes (Singh, 2018). Esta característica dos materiais cimentícios está intrinsecamente ligada à sua durabilidade, sendo que variáveis como a sua localização, condições de humidade e temperatura, exposição ao vento, exposição ao sol ou chuva ou ainda a gradientes de pressão, em elementos submersos, podem afetar o seu bom desempenho (Bogas, 2011).

Como verificam Arandigoyen *et al.* (2005), o mecanismo de capilaridade é controlado por uma diferença de pressão formada quando um líquido entra em contacto com os poros. Assim, quanto menor for o volume dos poros existentes no material, maior será a diferença de pressão e, conseqüentemente, maior será a sua capacidade e velocidade de absorção.

A porosidade de uma argamassa origina-se na secagem do excesso de água de amassadura presente no seu interior. Esta secagem leva a que o volume anteriormente ocupado por água passe a ser ocupado por poros de ar.

Segundo Páscoa (2012), existem duas fases de absorção, a primeira, onde esta ocorre de forma rápida, e uma segunda, onde a absorção se desenvolve de maneira lenta até à sua estabilização. Pereira (2008) observou que argamassas cimentícias com igual massa de ligante, mas maiores quantidades de água, ou seja, maior relação a/l, possuem maior capacidade de absorção de água por capilaridade. O mesmo autor concluiu que para argamassas de cimento, existe uma tendência para o aumento do coeficiente de capilaridade com o aumento da sua porosidade.

Não foram encontrados na literatura estudos que incidam na caracterização da absorção capilar em argamassas com cimentos reciclados. Este facto motiva e justifica a realização destes ensaios no presente trabalho, tentando-se compreender mais aprofundadamente o desempenho das propriedades de transporte deste tipo de material.

### 2.5.2. Retração

A retração, tal como a expansão, em materiais cimentícios pode ser definida como a variação volumétrica que ocorre após a sua secagem (Veiga e Souza, 2004). Entre estes dois fenómenos, destaca-se a retração como o mais condicionante devido à fissuração que lhe é associada, e conseqüente perda de durabilidade e diminuição das suas características mecânicas (Coutinho e Gonçalves, 1994).

O termo retração é frequentemente associado ao fenómeno de retração por secagem, que se baseia na evaporação de água presente no interior do material cimentício no estado endurecido, diminuindo o seu teor em água e provocando uma diminuição do seu volume. Podem também ocorrer em simultâneo diversos tipos de retração, durante o processo de secagem, tais como a retração plástica, retração autogénea, retração por carbonatação e retração térmica (Neville, 2012).

A retração plástica define-se como a retração que ocorre antes da fase endurecida do cimento, sendo associada a evaporação de água na sua superfície ainda no estado fresco. Este tipo de retração é mais notório em misturas que apresentam menor propensão para exsudar, ou seja, menores relações a/l ou ainda incorporação de adições.

A retração autogénea resulta da variação de volume devida às reações químicas de hidratação do cimento, onde se originam produtos de menor volume (Aitcin *et al.*, 1997). A retração por carbonatação decorre das reações do CO<sub>2</sub> presentes no ar com os produtos de hidratação do cimento, desenvolvendo-se do exterior para o interior dos elementos. A retração térmica verifica-se durante a fase de arrefecimento, sendo originada pelo calor de hidratação libertado (Hammer, 2003).

Tal como para a absorção capilar, não foram encontrados estudos prévios na literatura que visassem a caracterização da retração em argamassas produzidas com cimentos reciclados. Motivo ainda maior para se estudar mais aprofundadamente este tema no âmbito deste trabalho.

## 2.6. Cinzas Volantes

As cinzas volantes (Cz) são um material recorrentemente utilizado na preparação de misturas cimentícias, como previsto pela norma americana, ASTM C618 (2008), e pela norma europeia, NP EN 450 (2012). Estes subprodutos industriais, provenientes da queima de carvão para a produção de energia em centrais termoelétricas, possuem uma geometria predominantemente esférica e são de natureza maioritariamente vítrea e constituídos por sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A massa volúmica média varia entre 2200 e 2400 kg/m<sup>3</sup> (Neville, 2012) e o seu grau de finura, semelhante às partículas de cimento, entre 1 e 100 µm. Este material possui também propriedades reativas pozolânicas, originando produtos de hidratação semelhantes aos do cimento Portland, nomeadamente os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (Neville, 2012).

Inicialmente, as partículas de cinza são praticamente inertes, revelando uma reatividade substancial para idades mais avançadas com redução progressiva de CH e conseqüente abaixamento do pH no betão (Malek *et al.*, 2005). Como revelam Neville (2012) e Mehta e Monteiro (1994), a incorporação de Cz como substituto parcial do cimento Portland permite a melhoria da sua trabalhabilidade, devido ao seu efeito lubrificante, menor evolução do calor de hidratação, aumento das propriedades mecânicas em idades avançadas, maior resistência à penetração de cloretos, melhoria da durabilidade ao ataque de sulfatos e ainda uma menor expansão devido às reações alcalis-sílica.

Para além das razões mencionadas previamente, outra grande vantagem da utilização de cinzas volantes prende-se com o facto de estas serem um subproduto industrial de reduzido interesse económico e com baixo valor no mercado. Assim, permite-se não só uma redução de cimento na mistura, que leva a uma menor produção, e consequente redução de emissão de gases de efeito estufa, como também o reaproveitamento de resíduos provenientes de outro sector, que seriam depositados em aterro, e ainda uma potencial economia na formulação de misturas.

A interação entre cinzas volantes e o cimento reciclado foi estudada anteriormente por Serpell e Lopez (2015). Nesse estudo, foram produzidos provetes de argamassa com diferentes incrementos deste material, substituindo parcialmente o cimento reciclado. As pastas de origem, com relação água/ligante de 0,50, foram curadas em água durante 28 dias, sendo posteriormente trituradas, moídas e peneiradas até se ter obtido um grau de finura  $<75 \mu\text{m}$ . O material foi então termoativado entre 660-990 °C durante 2,5 h, adotando-se um arrefecimento lento no final. Estes autores testaram diferentes incorporações de cinzas volantes, entre 0-60 %, com o intuito de avaliar as suas características físicas e mecânicas. Como era esperado, as resistências à compressão verificadas tenderam a reduzir com o aumento do incremento de cinzas (Figura 2.4). Para misturas com uma relação  $a/l=1$ , apenas com cimento reciclado termicamente tratado a 800 °C, os resultados obtidos para as resistências à compressão aos 28 dias atingiram os 11,7 MPa, sendo que a incorporação de cinzas volantes em 30 % levou a uma redução de aproximadamente 45 % nestas resistências, ou seja, 5,15 MPa para a mesma idade de ensaio.

Por outro lado, verificou-se um aumento da trabalhabilidade destas misturas, até 120 %, com o aumento do nível de incorporação, como ilustra a Figura 2.4. Os resultados obtidos para a trabalhabilidade destas misturas mostram elevadas semelhanças entre o efeito da substituição de cinzas volantes em argamassas de CR e de cimento Portland. Conclui-se assim que, a fluidez de uma mistura depende em grande parte do tamanho médio das suas partículas, densidade, forma e superfície específica, justificando-se desta maneira o interesse na análise mais aprofundada da interação deste material com cimentos reciclados.

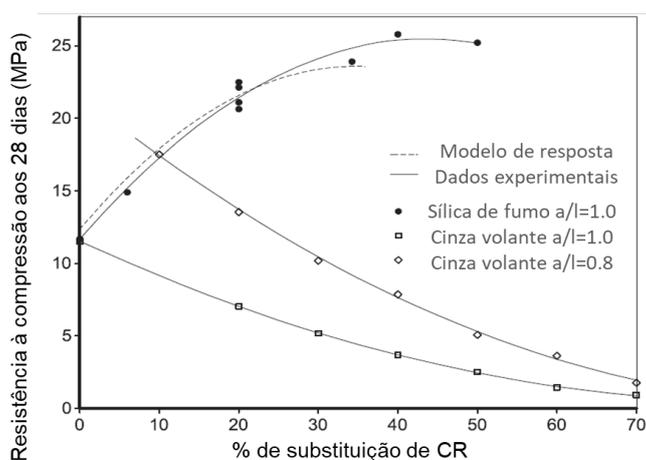


Figura 2.4 – Resistências mecânicas à compressão de argamassas produzidas com cimento reciclado e incorporação de cinzas volantes. Adaptado de Serpell e Lopez (2015).

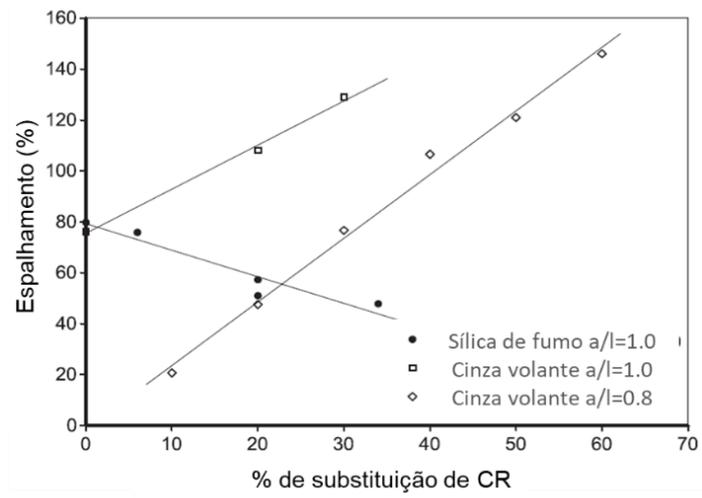


Figura 2.5 – Espalhamentos de argamassas produzidas com cimento reciclado e incorporação de cinzas volantes. Adaptado de Serpell e Lopez (2015).



## 3. Campanha Experimental

No presente capítulo descreve-se campanha experimental realizada no âmbito do presente trabalho, pretendendo-se ir ao encontro dos objetivos delineados em 1.3.

Após uma breve descrição da campanha experimental, apresenta-se o processo de produção do cimento reciclado (CR), com referência às fases de produção das pastas (PO) e betões de origem (BO), dos processos mecânicos de britagem, moagem e peneiração, e da etapa final de termoativação.

Finalmente, definem-se os materiais, composições e processos adotados na produção e cura das argamassas de cimento reciclado, bem como as normas e procedimentos seguidos para a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido.

A campanha experimental foi desenvolvida na sua grande maioria no Laboratório de Construção (LC) e no Laboratório de Geociências e Geotecnologias (GEOLAB), do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, durante o período compreendido entre junho de 2019 e março de 2020, estando inserido no projeto de investigação FCT, PTDC/ECI-CON/28308/2017, denominado por *Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials*, ou, Ligantes hidráulicos eco-eficientes produzidos a partir de resíduos de materiais cimentícios.

### 3.1. Descrição da campanha experimental

A campanha experimental adotada na realização deste trabalho visou a caracterização de argamassas com incorporação de cimento reciclado, avaliando-se algumas das suas principais propriedades físicas e mecânicas. No presente trabalho foi ainda considerada a utilização de uma adição pozolânica, cinza volante (Cz), de modo a aproveitar a disponibilidade de álcalis nos cimentos reciclados desde os primeiros instantes após a mistura. Apesar da cinza volante tender a desaparecer, esta é representativa do efeito que pode ser proporcionado por uma adição pozolânica. Pretende-se assim explorar as potencialidades destes novos eco-cimentos, tirando partido dos produtos de desidratação formados após a termoativação do material.

Numa primeira fase, foram produzidos provetes de BO e PO com a finalidade de simular resíduos de construção e demolição (RCD) de betão provenientes de obras correntes. Estes resíduos de betão foram produzidos com dois tipos de relação água/ligante ( $a/l$ ), de modo a serem representativos de distintos tipos de betões. O material foi posteriormente submetido a processos físicos e mecânicos de britagem, moagem e peneiração, onde se procurou obter um grau de finura próximo dos produtos cimentícios correntes. No caso do BO, os detritos de betão foram adicionalmente sujeitos a uma etapa de separação, de acordo com o preconizado na patente A116130 (2020), idealizada no âmbito do projeto FCT, anteriormente referido, de modo a individualizar a fração cimentícia. Seguidamente, o resíduo obtido após esses processos foi termoativado a 700 °C, obtendo-se o cimento reciclado.

Numa segunda fase foram produzidas argamassas com diferentes composições, tendo em vista os ensaios a realizar no estado fresco e endurecido. Como referido, para além do cimento reciclado, foi também analisada a interação com adições pozolânicas (cinzas volantes), perspetivando-se uma melhoria das propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas, como referido em 2.6.

Após a produção, foi efetuada a caracterização das argamassas no estado fresco, com a realização de ensaios de espalhamento, massa volúmica fresca e volume de vazios. A caracterização no estado endurecido envolveu ensaios mecânicos de resistência à compressão e flexão a diferentes idades, bem como ensaios de absorção capilar e retração.

## 3.2. Produção de pastas e betão de origem

Neste subcapítulo, apresentam-se as etapas relativas à produção de pastas e betão de origem, bem como a sua caracterização no estado fresco e endurecido.

### 3.2.1. Materiais

Foi utilizado como ligante um cimento do tipo CEM I 42,5R fornecido pela empresa SECIL. Este tipo de cimento é frequentemente utilizado em obras correntes de edifícios, disponibilizando elevada resistência inicial. Resumem-se, na Tabela 3.1, as principais características do cimento Portland (CPN) utilizado, analisado no Laboratório de Qualidade e Processo do Outão da empresa SECIL.

*Tabela 3.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do CEM I 42,5R 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
<b>Resistência à compressão da argamassa de referência (MPa)</b>		1 dia	16,8
	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

Para a produção do BO foram utilizados dois tipos de agregados finos siliciosos, areia fina da Herdade de Mesquita, Sesimbra, e areia grossa de Pinhal do Conde, Seixal. Utilizaram-se também os agregados grossos brita 2, brita 1 e bago de arroz, todos de origem calcária e provenientes da Pedreira do Galo, em Sesimbra. As características físicas e geométricas dos agregados utilizados, obtidas a partir de ensaios realizados por outros colegas do projeto, estão presentes na Tabela 3.2.

*Tabela 3.2 – Características físicas e geométricas dos agregados utilizados na produção das PO e BO.*

Propriedade	Norma	Agregados naturais siliciosos		Agregados naturais calcários		
		Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2
<b>Absorção de água às 24h (%)</b>	NP EN 1097-6 (2016)	0,15	0,26	0,39	0,31	0,46
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	NP EN 1097-6 (2016)	2598	2599	2669	2683	2650
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	NP EN 1097-6 (2016)	2602	2606	2680	2691	2662
<b>Baridade seca em amostra não compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	NP EN 1097-3 (2002)	1588	1606	1424	1420	1462
	NP EN 933-4 (2008)	-	-	26	53	23
<b>Índice de forma</b>	NP EN 12620 (2003)	-	-	SI40	SI55	SI40

### 3.2.2. Composições

Foram consideradas duas relações água/ligante diferentes na produção da PO, 0,35 e 0,55, com o objetivo de comparar as características físicas e mecânicas de cimentos reciclados provenientes de pastas com porosidades muito distintas. O BO foi produzido com uma relação água/ligante de 0,55, recorrendo-se ao método de Faury para a formulação da sua composição, simulando um betão corrente. As composições foram definidas de modo a abranger resíduos de características variadas e representativas de betões usuais. As composições consideradas para as PO e BO encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição das PO e BO, por m<sup>3</sup>.

Material	a/l	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 (BO)</b>	0,55	586	302	195	411	293	360	198
<b>Pasta de origem (PO35)</b>	0,35	-	-	-	-	-	1331	466
<b>Pasta de origem (PO55)</b>	0,55	-	-	-	-	-	1032	569

### 3.2.3. Produção e cura de provetes

As PO foram produzidas em recipientes cilíndricos de plástico, com um volume aproximado de 30 litros, recorrendo-se a uma misturadora elétrica para uma melhor homogeneização. Para a produção da pasta de origem, colocou-se metade da água necessária no recipiente e adicionou-se a totalidade do cimento, misturando-se durante aproximadamente 4 minutos, após os quais se deixou a mistura em repouso durante 30 segundos. Finalmente, foi introduzida progressivamente a restante água e remisturou-se por mais 4 minutos.

Foram produzidos provetes cúbicos com 15 cm de aresta para a realização de ensaios mecânicos, sendo que, devido a sua fluidez, não foi necessário recorrer a métodos de vibração. Moldaram-se ainda provetes cilíndricos, 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, destinados à produção do cimento reciclado (Figura 3.1a)). Posteriormente, estes foram cobertos por uma película plástica, evitando-se assim perdas de água por evaporação.

Na produção do BO foi utilizada uma misturadora de eixo vertical com descarga de fundo e uma capacidade de aproximadamente 80 litros, ilustrada na Figura 3.1b). Inicialmente, foram colocados os agregados por ordem decrescente de dimensão média das partículas, ou seja, brita 2, brita 1, bago de arroz, areia fina e finalmente areia grossa, tendo-se adicionado metade da água e misturado por 2 minutos. A mistura foi então deixada em repouso durante 2 minutos após os quais se colocou a totalidade do cimento e, gradualmente, a restante água, misturando-se por mais 4 minutos. Nas misturas com a/l de 0,35, foi ainda adicionado à amassadura 0,5 % de superplastificante (SP) da marca *MasterEase 3530*, que conferiu uma melhor trabalhabilidade ao betão.

Foram moldados provetes de BO com dimensões 300x150x150 mm, recorrendo-se a vibração mecânica, tendo em vista uma melhor compactação (Figura 3.1c)).



Figura 3.1 – a) Provetes de PO; b) Misturadora durante a produção do BO; c) Provetes de BO. Adaptado de Real, 2019.

Os vários provetes foram desmoldados 24 horas após a sua produção, sendo que os provetes destinados a ensaios mecânicos foram armazenados em condições húmidas de cura, para humidade relativa (HR) superior a 95 %. Os restantes provetes, destinados à produção de cimentos reciclados, foram armazenados em ambiente exterior durante 120 dias, humedecendo-se a sua superfície periodicamente durante as primeiras duas semanas. O objetivo era obter betões ou pastas suficientemente hidratadas de modo a serem representativas de detritos de betão antigos.

### 3.2.4. Caracterização no estado fresco e endurecido

Para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas das pastas de origem foram realizados os ensaios de massa volúmica fresca e resistência mecânica à compressão aos 28 dias, tendo sido seguidas as normas NP EN 196-6 (2010) e NP EN 196-1 (2017), respetivamente.

Tal como para a PO, foram também realizados ensaios de caracterização física e mecânica do BO, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Realizaram-se ensaios de abaixamento (cone de *Abrams*), massa volúmica fresca e resistência à compressão aos 28 dias de idade, de acordo com as normas NP EN 12350-2 (2009), NP EN 12350-6 (2009) e NP EN 12390-3 (2011), respetivamente. Os resultados obtidos resumem-se na Tabela 3.4. O betão BO enquadra-se na classe de resistência C30/37.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados a PO e BO.

Material	Abaixamento (mm)	Massa volúmica fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)
<b>PO35</b>	-	2070	79,5
<b>PO55</b>	-	1840	41,1
<b>BO</b>	15	2350	46,2

### 3.3. Britagem, moagem e peneiração do material de origem

Após o período de cura de 120 dias, os provetes foram submetidos a processos mecânicos de trituração, moagem e peneiração, com vista a atingir dois graus de finura: cimento reciclado fino, CRF, <125 µm; cimento reciclado de pasta, CRP, <250 µm.

Para se obter os graus de finura acima referidos foram necessárias 4 fases de moagem e uma fase de peneiração. Para a moagem, numa primeira fase, foi utilizada uma britadeira de maxilas, presente no LC, ilustrada na Figura 3.2a). Esta britagem reduziu os provetes originais de PO e BO a partículas com dimensão máxima de 70 mm.

As últimas fases de moagem foram realizadas no GEOLAB, onde, na segunda e terceira fases, recorrendo a outra britadeira de maxilas e a um moinho de rolos, ilustrados na Figura 3.2b) e c), respetivamente, se procurou reduzir o material a partículas com dimensões máximas de 10 mm. Na quarta, e última, fase de moagem, recorreu-se a um moinho de bolas (Figura 3.3a)) com o objetivo de reduzir o material a pó. No interior do moinho foram colocadas 625 esferas de aço de diâmetro compreendido entre 10-50 mm (Figura 3.3b)). O material foi moído durante 2h 30m, a uma velocidade aproximada de 40 rpm, tendo sido guardado e selado em sacos imediatamente após a sua recolha, evitando-se assim a sua hidratação superficial e, conseqüentemente, a sua aglomeração, bem como o progredir de eventuais fenómenos de carbonatação.

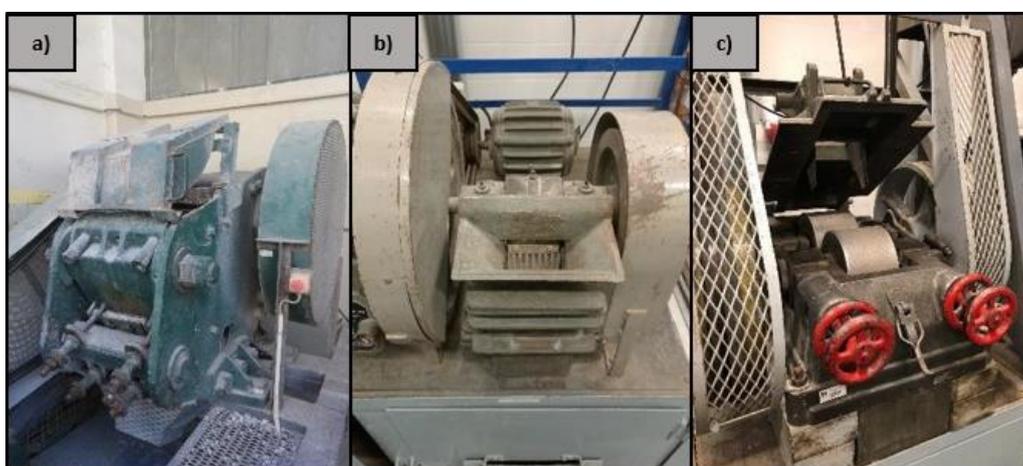


Figura 3.2 – a) Britadeira de maxilas presente no LC; b) Britadeira de maxilas presente no GEOLAB; c) Moinho de rolos presente no GEOLAB. Adaptados de Real, 2019.

Tal como relatado por Zhang *et al.* (2018) e Yu e Shui (2013), e referido em 2.4.2.1, verificou-se a aglomeração das partículas durante esta fase, bem como a sua aglomeração nas paredes do moinho. Este fenómeno, causado pela presença de humidade entre as partículas, levou a uma moagem menos eficiente, como ilustrado na Figura 3.3b). Para contrariar esse efeito, o material foi seco em estufa a 100 °C durante as 12 horas antecedentes à sua colocação no moinho de bolas. Este procedimento resulta numa menor aderência às paredes do moinho de bolas, bem como numa menor aglomeração das suas partículas.

Após a moagem, efetuou-se a peneiração do material. A peneiração foi realizada com recurso ao misturador eletromagnético *Controls Automatic seive shaker D406* indicado na Figura 3.3c). Foram obtidas, após este processo, as duas frações granulométricas acima referidas, CRF e CRP. Este processo revelou-se bastante demorado e apresentou baixos rendimentos devido à acumulação de material nos peneiros.

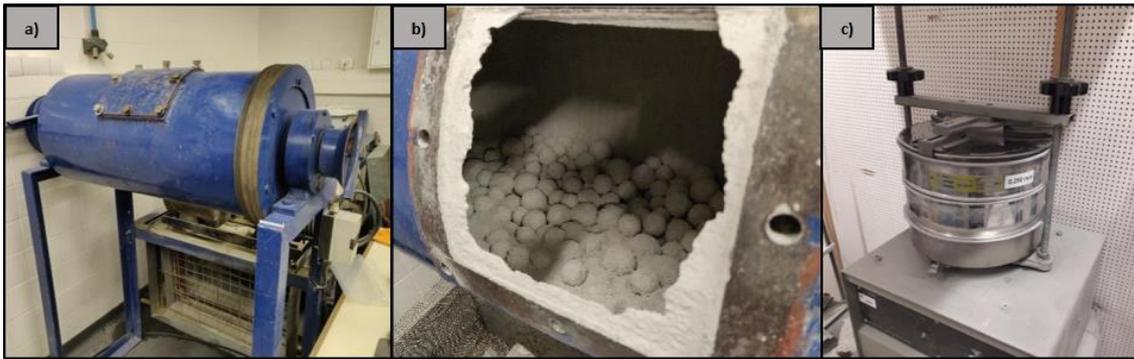


Figura 3.3– a) Moinho de bolas; b) Aglomeração do material às paredes do moinho; c) Misturador eletromagnético utilizado durante a peneiração. Adaptado de Real, 2019.

### 3.4. Termoativação

A termoativação do cimento, tal como referido em 2.4.2.3., é um processo térmico que recorre às elevadas temperaturas do forno para a desidratação dos compostos do cimento hidratados e o restabelecimento da sua capacidade de reidratação. A presença desses novos compostos desidratados depende das temperaturas máximas atingidas no forno e também do tempo de tratamento adotado.

Tendo por base a literatura consultada em 2.4.3. e a experiência adquirida pela equipa do projeto em trabalhos anteriores no departamento (Bogas *et al.*, 2019; Carriço *et al.*, 2020), foi adotada a temperatura de tratamento de 700°C durante um período de 3 horas. Esta temperatura de tratamento permite um bom compromisso entre a capacidade de reidratação e a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e de energia térmica. Desta maneira é possível obter-se um cimento mais ecoeficiente, de reduzido impacto ambiental e baixo consumo de recursos naturais.

Após os processos mecânicos de trituração, moagem e peneiração, de onde resultaram as duas frações de diferente grau de finura, CRF e CRP, o material foi colocado no forno rotativo *Termolab Eurotherm2408*, ilustrado na Figura 3.4a). O material foi aquecido a uma taxa de 15°C/min, até ser atingida a temperatura de patamar referida anteriormente. Tendo em vista um melhor controlo da temperatura dentro do forno, foram utilizados termopares inseridos em diferentes locais da massa de cimento. Recorreu-se a um *Delta-T Data-Logger* para o registo das temperatura durante o tratamento (Figura3.4b)). Na Figura 3.5 apresentam-se os valores de temperatura registados nos termopares durante a termoativação, bem como a curva teórica pré-estabelecida.



Figura 3.4 – a) Forno horizontal e tabuleiros utilizados para a termoativação. b) Utilização de termopares para melhor controlo da temperatura. Adaptado de Real, 2019.

Após as 3 horas de tratamento, o material foi arrefecido lentamente durante 12 horas no interior do forno, sendo posteriormente selado em sacos de plástico com fita adesiva, evitando-se desta forma a hidratação superficial das partículas.

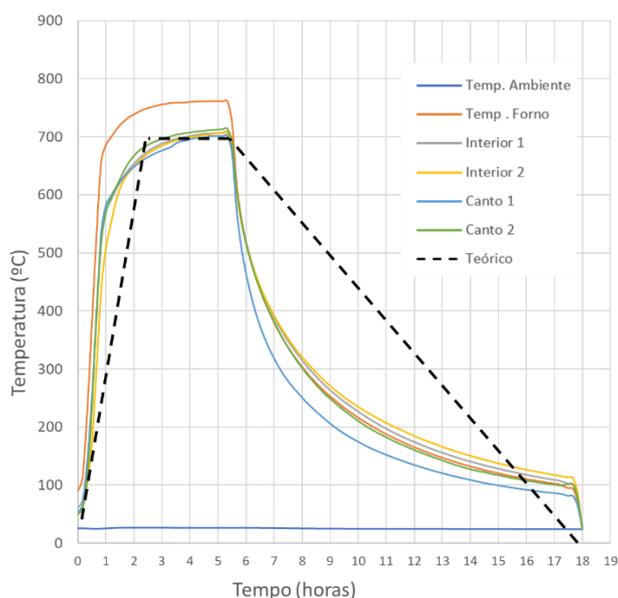


Figura 3.5 – Temperaturas medidas pelos termopares durante a termoativação.

### 3.5. Análise termogravimétrica

Para a determinação das variações de massa ocorridas no forno durante a termoativação do material, recorreu-se à análise termogravimétrica (TG) dos diferentes tipos de cimento produzidos, CRP, CRP35, CRPNT e CRP35NT, bem como do cimento Portland de referência (CPN). Esta análise permite avaliar as variações de massa que ocorrem no material de origem quando submetido a altas temperaturas, decorrentes dos processos de desidratação e decomposição.

As análises TG e TG diferencial (DTG) foram realizadas com recurso a um equipamento *SETARAM*, modelo *TGA92*, presente no GEOLAB. A rampa de aquecimento adotada foi de 25 °C/min, medindo-se a variação da massa até aos 1000 °C em atmosfera de azoto.

### 3.6. Análise de difração de raios-x

Para uma análise mais detalhada das fases cristalinas presentes no cimento reciclado, foi efetuada uma difração de raios-X (DRX). Este tipo de análise permite identificar as fases cristalinas formadas a diferentes temperaturas, resultantes dos processos de desidratação e decomposição. Estas análises foram realizadas com recurso ao difratómetro *PANalytical X'Pert Pro*, ilustrado na Figura 3.6, presente no GEOLAB. O material analisado foi sujeito a um varrimento de  $2\theta$  compreendido entre 5 e 70°, com um passo de 0.033° e um tempo equivalente por passo de 75 s. Utilizou-se uma ampola de Cu, com 40 kV e 35 mA. A identificação das fases foi efetuada com recurso ao programa *Highscore Plus* e à base de dados *PDF2@*.



Figura 3.6 - *PANalytical X'Pert Pro* utilizado para a análise DRX.

## 3.7. Produção de argamassas

Neste subcapítulo, apresentam-se os materiais, a composição e o produto utilizado na produção das argamassas, bem como os ensaios considerados para a sua caracterização no estado fresco e endurecido.

### 3.7.1. Materiais

Na produção das argamassas foram utilizados agregados finos, nomeadamente areia fina e grossa, ambas de origem siliciosa, provenientes da Herdade de Mesquita, Sesimbra, e de Pinhal do Conde, Seixal, respetivamente. Os diferentes tipos de areia utilizados na campanha experimental foram fornecidos pela empresa Soarvamil. As características físicas das areias utilizadas apresentam-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características físicas das areias utilizadas na produção de argamassas.

Propriedade	Norma	Areia grossa	Areia fina
Absorção de água às 24 h (%)	NP EN 1097-6 (2016)	0,26	0,19
Massa volúmica* (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6 (2016)	2610	2620
Teor de vazios (%)	NP EN 1097-3 (2002)	34,7	39,8
Baridade não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-3 (2002)	1599	1571

\*Indicado pelo fabricante

Na Tabela 3.6 apresenta-se a granulometria das areias, determinada segundo a NP EN 933-1 (2014). Previamente à sua utilização, a fração de areia grossa foi ainda peneirada com o objetivo de se obter uma dimensão de partículas inferior a 4mm, evitando-se partículas grosseiras. Para um melhor controlo da água efetiva das misturas, as areias foram secas em estufa, a 100 °C.

Tabela 3.6 – Análise granulométrica das areias utilizadas.

Peneiro (mm)	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125	Fundo
Areia grossa retida (%)	0,7	1,7	12,6	37,8	34	10,1	2,6	0,5
Areia fina retida (%)	-	-	-	0,7	19,6	58	21,4	0,3

O cimento Portland utilizado nesta campanha experimental foi do tipo CEM I 42,5R, comercializado pela empresa SECIL. As principais características apresentam-se na Tabela 3.1, em 3.2.1.

Foram também utilizadas durante a realização deste trabalho cinzas volantes provenientes da queima de combustíveis fósseis da Central Termoelétrica de Sines. Na Tabela 3.7, apresentam-se as características físicas e químicas das cinzas volantes utilizadas na produção das argamassas deste trabalho.

Tabela 3.7 – Características físicas e químicas das cinzas volantes (Cz) utilizadas na campanha experimental.

Propriedade	Norma	Cz
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	LNEC E 64 (1979)	2170
Superfície específica mássica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NP EN 196-6 (2010)	3909
Resíduo de peneiração 45 µm (%)	NP EN 196-6 (2010)	13,8
Índice de atividade aos 28 dias (%)	NP EN 450-1 (2012)	84,40 <sup>a)</sup>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	EN 196-2 (2014)	50,16+25,62+7,14
CaO+MgO (%)	EN 196-2 (2014)	4,29+0,91

<sup>a)</sup>Argamassa CEM I 42,5R+ 25%Cz

### 3.7.2. Cimento reciclado

Foram utilizados neste trabalho dois tipos diferentes de cimentos reciclados, os provenientes de pasta de cimento, CRP, e os provenientes de betão de origem, CRB. Os resíduos de pasta são ainda diferenciados pela relação a/l da pasta de origem, CRP55 e CRP35, para relações de 0,55 e 0,35, respetivamente. Devido a um uso maioritário de CRP55 durante a realização deste trabalho, este é designado apenas por CRP. O CRB utilizado, submetido a processos de separação, apresentou percentagens de matriz cimentícia e agregados de 76 % e 24 %, respetivamente (Hu, 2019).

As características físicas e químicas do CRP utilizado pode ser consultado na Tabela 3.8, sendo que os ensaios de caracterização deste foram realizados no Laboratório de Qualidade e Processo do Outão, da empresa SECIL. Para o CRP35, utilizou-se, simplificadaamente, o mesmo valor de massa volúmica obtido para o CRP.

*Tabela 3.8 – Propriedades físicas e químicas do cimento reciclado utilizado na campanha experimental proveniente de pasta com relação a/l de 0,55.*

Propriedade	CRP	
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	3080	
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	17,40+4,75+2,92	
CaO+MgO (%)	58,70+1,50	
Tempo de presa (min)	início	315
	fim	417

### 3.8. Composição das misturas

O estudo abrangido por este trabalho incidiu maioritariamente em argamassas produzidas com cimento reciclado, proveniente de pastas de cimento previamente desidratadas, com uma relação de água/ligante de 0,55 e granulometria inferior a 250 µm (CRP). Em menor quantidade, foram ainda avaliadas argamassas com cimento reciclado proveniente de pasta de origem com relação a/l de 0,35 (CRP35), de granulometria mais fina (CRF) e ainda proveniente de resíduos de betão (CRB). Avaliou-se ainda o efeito de cinzas volantes (Cz) como substituto parcial do cimento reciclado.

Optou-se no presente trabalho pela produção de argamassas com um traço em peso de 1:3 (ligante:areia). Para a formulação das argamassas considerou-se a expressão (3.1), assumindo um volume de vazios de 5%.

$$V_{\text{ligante}} + V_{\text{agregados}} + V_{\text{água}} + V_{\text{vazios}} = 1 \quad (3.1)$$

A proporção de areia fina e grossa foi de 35 % e 65 %, respetivamente. Estas percentagens correspondem a valores máximos de compactidade dos agregados finos.

No total, foram consideradas 23 misturas diferentes, incluindo argamassas de referência apenas com CPN e CPN+Cz para efeitos de comparação. A designação AL na composição das misturas refere-se a misturas produzidas propositadamente com uma relação a/l semelhante a outras misturas, também para posterior comparação.

Numa primeira fase, foram definidas argamassas de idêntica trabalhabilidade, para espalhamento compreendido entre 140-150 mm, segundo a norma EN 1015-3 (1999).

Numa segunda fase, fixou-se a relação a/l em 0,60, incorporando diferentes teores de CR e Cz. As composições das misturas produzidas apresentam-se na Tabela 3.9 e podem ser consultadas em maior pormenor na Tabela A4.1 no Anexo A4.

*Tabela 3.9 – Composições das argamassas produzidas neste trabalho.*

<b>Composição</b>	<b>a/l</b>	<b>CPN (%)</b>	<b>CR (%)</b>	<b>Cz (%)</b>
<b>100% CPN</b>	0,47	100	-	-
<b>100% CPNAL</b>	0,72	100	-	-
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	85	-	15
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	70	-	30
<b>100% CRP35AL</b>	0,90	-	100	-
<b>100% CRP35</b>	0,80	-	100	-
<b>100% CRPNT</b>	0,63	-	100	-
<b>100% CRF</b>	0,92	-	100	-
<b>100% CRB</b>	0,73	-	100	-
<b>100% CRP</b>	0,90	-	100	-
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	95	5	-
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	85	15	-
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	70	30	-
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	50	50	-
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	-	85	15
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	-	70	30
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	-	100	-
<b>100% CPN</b>	0,60	100	-	-
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	85	15	-
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	70	30	-
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	50	50	-
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	70	-	30
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	40	30	30

O primeiro grupo é constituído por argamassas de referência, produzidas com cimento Portland (CPN) e incorporações de 15% e 30% de cinzas volantes. Este conjunto serviu como termo principal de comparação entre as misturas produzidas durante o restante trabalho.

O segundo grupo diz respeito às argamassas produzidas com a pasta de origem mais compacta, ou seja, com uma relação a/l de 0,35 (CRP35).

O terceiro grupo engloba três tipos distintos de argamassas, as produzidas com betão de origem (CRB), as produzidas com cimento reciclado de grau de finura inferior a 125  $\mu\text{m}$  (CRF) e também as que contêm cimento reciclado não termoativado (CRPNT). Com isto pretendeu-se avaliar a influência do tipo de material de origem, da finura do cimento reciclado e da efetivação do tratamento térmico para a capacidade de reidratação do cimento reciclado.

O quarto grupo é composto por misturas com diferentes incorporações de CRP em substituição do CPN. Estas incorporações foram de 5 %, 15 %, 30 %, 50 % e 100 %, pretendendo-se assim avaliar a influência do cimento reciclado como substituto parcial do cimento Portland.

A interação do CRP com Cz é investigada no quinto grupo, para substituições parciais de 15 e 30 %. Estas percentagens de incorporação têm em consideração os cimentos compostos CEM II/A-V e CEM II/B-V, de acordo com o referido na norma EN 197-1.

Numa segunda fase de produção, onde se insere o sexto grupo, foram produzidas argamassas com a mesma relação água/ligante (0,60), permitindo uma melhor análise da influência do tipo de ligante para condições de idêntica compacidade.

### 3.9. Produção, cura e pré-condicionamento de provetes

As argamassas foram produzidas de acordo com a EN 1015-2 (1998). As amassaduras foram realizadas com o auxílio de uma misturadora de eixo vertical (Figura 3.7) com um dispositivo automático de mistura, possuindo dois programas de velocidade, o modo lento,  $140\pm 5$  rpm, e o modo rápido,  $285\pm 5$  rpm.



*Figura 3.7 – Misturadora utilizada na produção das argamassas.*

Para dar início à produção, humedeceu-se a cuba da misturadora e colocou-se simultaneamente a água e o cimento. No caso de misturas com incorporação de cinzas, estas foram colocados após o cimento. Iniciou-se a mistura em modo lento durante 30 segundos, após os quais se adicionaram os agregados, primeiramente a areia grossa seguindo-se a areia fina. Em seguida procedeu-se à mistura em modo rápido durante 30 segundos, após os quais se deixou repousar

durante 1 min. Durante o tempo de repouso aproveitou-se para raspar as paredes da cuba com auxílio de uma colher de pedreiro.

Finalmente, após o período de repouso, misturou-se novamente em modo rápido durante 1 minuto. Na Tabela 3.10 indica-se o número de provetes de argamassa de 160x40x40 mm produzidos para cada mistura.

Durante a produção das argamassas com cimento reciclado, mesmo não fazendo parte do âmbito de estudo, foram observadas algumas características já atribuídas a este material por outros autores na literatura (Shui *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018), como por exemplo o elevado calor de hidratação libertado imediatamente após a hidratação do CR e a maior exigência de água, quando comparado com o CPN.

*Tabela 3.10 – Número de provetes produzidos durante a campanha experimental.*

Composição	a/l	Resistências Mecânicas				Absorção Capilar	Retração
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias		
<b>100% CPN</b>	0,47	3	3	3	3	3	3
<b>100% CPNAL</b>	0,72	3	3	3	3	3	3
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	3	3	3	3	3	3
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRP35AL</b>	0,90	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRP35</b>	0,80	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRPNT</b>	0,63	3	0	3	0	3	3
<b>100% CRF</b>	0,92	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRB</b>	0,73	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRP</b>	0,90	3	3	3	3	3	3
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	3	3	3	3	3	3
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	3	3	3	3	3	3
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	3	3	3	3	3	3
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	3	3	3	3	3	3
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	3	3	3	3	3	3
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	3	3	3	3	3	3
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	3	3	3	3	3	3
<b>100% CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	3	3	3	3	3	3

Para a realização dos ensaios de flexão, compressão e absorção capilar foram produzidos provetes com geometria prismática de dimensões 40x40x160 mm, de acordo com a norma EN 1015-2 (1998) (Figura 3.8a)). Para os ensaios de retração foram utilizados moldes próprios, de dimensões semelhantes, mas com furos nas extremidades para fixação dos apoios de medição, como previsto na norma NP EN 12617-4 (2002) e ilustrado na Figura 3.8b).

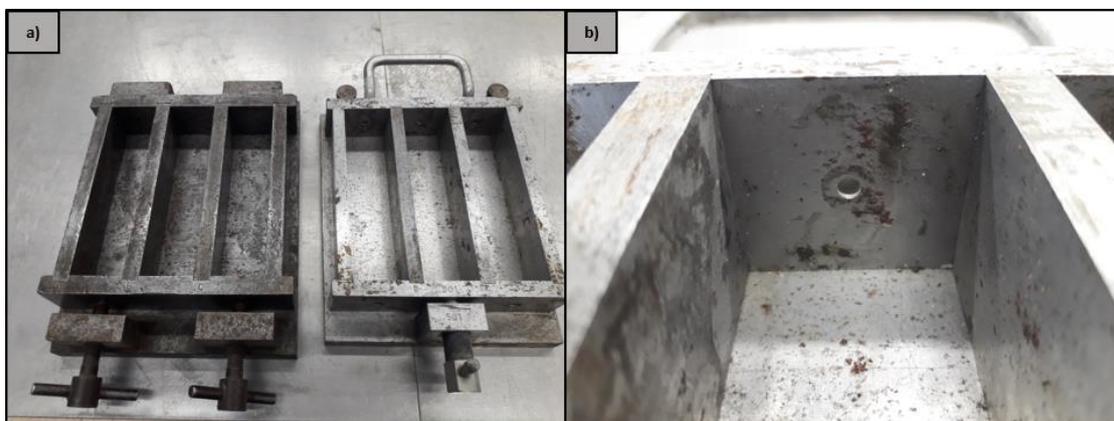


Figura 3.8 – a) Moldes utilizados para a produção dos provetes de argamassa; b) Pormenor dos moldes usados para o ensaio de retração.

Os provetes foram compactados com recurso a uma mesa de compactação (Figura 3.9a)), com preenchimento dos moldes em duas camadas idênticas, às quais se aplicou 60 pancadas. Os moldes foram então rasados com recurso a uma colher de pedreiro (Figura 3.9b)).

Os provetes foram mantidos nos moldes em ambiente de laboratório durante 24 horas, tapados por película plástica, evitando-se assim perdas de água por evaporação (Figura 3.9c)). Após esse período, os provetes foram desmoldados e submetidos ao processo de cura e pré-condicionamento referentes a cada um dos respetivos ensaios.



Figura 3.9 – a) Mesa de compactação; b) Molde preenchido com argamassa e rasado; c) Colocação de película plástica para evitar evaporação.

Os provetes destinados aos ensaios mecânicos de compressão e flexão foram mantidos em ambiente húmido de 20 °C e >95 % HR até a data de ensaio, como se ilustra na Figura 3.10a).

Para os ensaios de retração, após desmoldagem às 24 horas, os provetes foram colocados em câmara condicionada com cerca de 20°C e 65±5 % HR, durante o período do ensaio (Figura 3.10b)).

Para o ensaio de absorção, os provetes foram colocados 24 dias em ambiente húmido seguidos de 3 dias em estufa a 50 °C (Figura 3.10c). Nas 24 horas antecedentes ao ensaio, os provetes foram colocados em ambiente de laboratório, mantendo-se envoltos em película plástica (Figura 3.10d)).

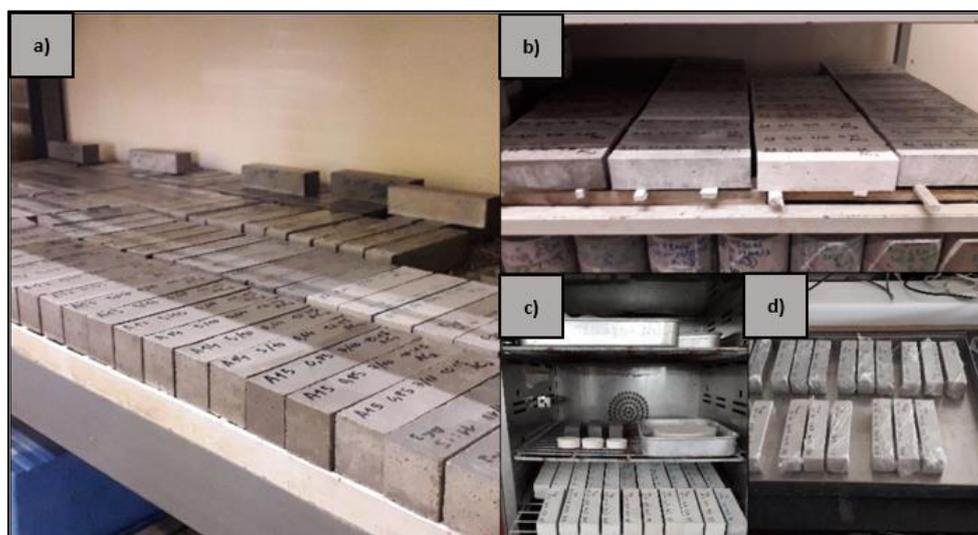


Figura 3.10 – a) Armazenamento em câmara húmida; b) Armazenamento em câmara seca; c) Secagem em estufa; d) Colocação de película plástica antes do ensaio de absorção capilar.

## 3.10. Caracterização no estado fresco

Neste subcapítulo, são apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco. Após a produção, e imediatamente antes da sua moldagem, as misturas foram analisadas em termos de espalhamento e massa volúmica.

### 3.10.1. Espalhamento

Para a determinação da trabalhabilidade das argamassas produzidas, foi realizado o ensaio de espalhamento de acordo com a norma NP EN 1015-3 (2006).

Recorreu-se para a realização do ensaio a uma mesa de espalhamento, um molde troncocónico e um varão compactador, como ilustrado na Figura 3.11a). Os materiais e procedimentos adotados, de acordo com a NP EN 1015-3 (2006), descrevem-se em seguida.

1. Humedecer a mesa de espalhamento, o molde e o varão compactador;
2. Colocar o molde na mesa, centrado, e encher até metade da sua altura com argamassa;
3. Compactar a camada aplicando 10 pancadas com auxílio do varão;
4. Repetir o procedimento para a segunda camada;
5. Rasar o molde com a espátula;

6. Retirar cuidadosamente o molde num único movimento e aplicar 15 pancadas com a mesa de espalhamento a uma velocidade de aproximadamente 1 pancada/segundo;
7. Medir e registar o diâmetro em três direções diferentes ( $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ ) (Figura 3.11b)).

O valor do espalhamento é então dado pela expressão (3.2).

$$\text{Espalhamento (mm)} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \quad (3.2)$$



Figura 3.11 – a) Materiais utilizados no ensaio de espalhamento; b) Medição do diâmetro resultante do ensaio.

### 3.10.2. Massa volúmica fresca

O ensaio para a determinação da massa volúmica fresca foi efetuado após a mistura, de acordo com a norma NP EN 1015-6 (2006). Para a realização do ensaio recorreu-se a um recipiente de volume conhecido (1 litro), uma balança e uma espátula, tendo-se adotado o seguinte procedimento:

1. Humedecer e pesar o recipiente de volume conhecido ( $m_1$ );
2. Preencher o recipiente até metade da sua altura com argamassa;
3. Incliná-lo a base do recipiente, até se obter uma altura de 30 mm entre esta e a mesa, e deixar cair, criando impacto na sua base;
4. Repetir o procedimento 10 vezes, alternando a direção da inclinação;
5. Preencher o restante volume do recipiente e executar novamente os passos 3. e 4.;
6. Rasar o recipiente pelo topo com uma espátula;
7. Pesar o conjunto recipiente+argamassa ( $m_2$ ) e registar o seu valor (Figura 3.12).

A massa volúmica pode ser então calculada a partir da expressão (3.3).

$$\rho_{fresca} = \left( \frac{m_2 - m_1}{V} \right) \quad (3.3)$$

Em que,

$\rho_{fresca}$  - Massa volúmica fresca da argamassa ( $\text{kg/m}^3$ );

$m_1$  – Massa do recipiente (kg);

$m_2$  – Massa do conjunto argamassa+recipiente (kg);

V – Volume do recipiente (1 litro).



Figura 3.12 – Pesagem do conjunto argamassa+recipiente.

### 3.10.3. Teor de vazios

O teor de vazios representa a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos. O cálculo deste parâmetro pode ser efetuada a partir do ensaio de massa volúmica e recorrendo à expressão dada em 3.4.

$$u_v = 1 - \left( \left( \frac{\%CR}{\rho_{CR}} + \frac{\%CPN}{\rho_{CPN}} + \frac{\%Cz}{\rho_{Cz}} + \frac{Traço}{\rho_{areia}} + \frac{a/l}{\rho_{água}} \right) \times \frac{\rho_{fresca}}{1 + Traço + a/l} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Em que,

$u_v$  – Teor de vazios (%);

$\rho_{fresca}$  – Massa volúmica fresca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$Traço$  – Traço da mistura (1:3);

$a/l$  – Relação água/ligante;

$\%CR$  – Percentagem de cimento reciclado (%);

$\rho_{CR}$  – Massa volúmica do cimento reciclado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\%CPN$  – Percentagem de cimento Portland (%);

$\rho_{areia}$  – Massa volúmica da areia ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\%Cz$  – Percentagem de cinzas volantes (%);

$\rho_{Cz}$  – Massa volúmica das cinzas volantes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{água}$  – Massa volúmica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

## 3.11. Caracterização no estado endurecido

Neste subcapítulo descrevem-se os ensaios de caracterização no estado endurecido, após as condições de cura e pré-condicionamento referidas em 3.8. Realizaram-se ensaios mecânicos de compressão e flexão, bem como ensaios de retração e absorção capilar. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

### 3.11.1. Resistência mecânica

A avaliação da resistência mecânica das argamassas produzidas foi realizada segundo a norma NP EN 1015-11 (2006). Foram efetuados ensaios aos 3, 7, 28 e 90 dias, sendo que para cada mistura foram ensaiados 3 provetes. Para tal, utilizou-se a prensa *Form+Test Seidner 505/200/10 DM1*, ilustrada na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Prensa Form+Test Seidner 505/200/10 DM1 utilizada nos ensaios de compressão e flexão.

Inicialmente, os provetes foram ensaiados à flexão. Para tal, colocou-se o provete centrado e apoiado em dois apoios cilíndricos espaçados de 10 cm. A carga vertical foi então transmitida por um terceiro apoio cilíndrico a meio vão até a rotura, registando-se o valor máximo atingido (Figura 3.14a)). Foi utilizada uma velocidade máxima de 0,05 KN/s. Deste ensaio são obtidas duas metades semelhantes, que são posteriormente ensaiadas à compressão. A resistência à flexão pode ser calculada a partir da expressão (3.5).

$$f_{ctm} = \frac{1,5 \times F_t \times L}{b \times d^2} \quad (3.5)$$

Em que,

$f_{ctm}$  – Valor médio da tensão de rotura à flexão (MPa);

$F_t$  – Carga máxima aplicada (N);

L – Distância entre os apoios inferiores (100 mm);

b – Largura do provete (40 mm);

d – Altura do provete (40 mm);

Para o ensaio de resistência à compressão, e como referido anteriormente, foram utilizadas as metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à flexão. Estas foram então colocadas entre chapas de 40x40 mm<sup>2</sup> e submetidas a uma velocidade de cerca de 0,40 KN/m (Figura 3.14b)). A resistência pode ser determinada a partir da expressão (3.6).

$$f_{cm} = \frac{F_c}{A} \quad (3.6)$$

Em que,

$f_{cm}$  – Valor médio da tensão de rotura à compressão (MPa);

$F_c$  – Carga máxima aplicada (N);

A – Área da secção comprimida (1600 mm<sup>2</sup>).



Figura 3.14 – a) Ensaio de resistência à flexão; b) Ensaio de resistência a compressão.

### 3.11.2. Absorção capilar

O ensaio de absorção capilar foi realizado de acordo com a EN 1015-18 (2002), após o período de cura e pré-condicionamento indicado em 3.8. Utilizou-se para realização deste ensaio um tabuleiro de aço inox, varões  $\Phi 5$ , papel de alumínio, balança e toalhas absorventes. Foram ensaiados três provetes de cada composição, tendo-se registado a sua variação de massa aos 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h. Assim, foi seguido o seguinte procedimento.

1. Colocar as bases de apoio dos provetes, constituídas por varões de metal, no fundo do tabuleiro;
2. Encher o tabuleiro com água até perfazer uma altura de, aproximadamente, 3 mm acima do topo dos varões;
3. Envolver as faces longitudinais dos provetes em película de alumínio, deixando descoberta apenas uma altura de 10 mm junto à face inferior;
4. Pesquisar os provetes ( $m_0$ );
5. Colocar gradualmente os provetes nos apoios, com a face sem película voltada para baixo, dispondo-os de maneira semelhante, a fim de se obter a mesma área de contacto (Figura 3.15a));

6. Adicionar água ao tabuleiro de maneira a que os provetes se mantenham submersos entre 5-10 mm (Figura 3.15b));
7. Cobrir o tabuleiro com um recipiente de grandes dimensões, evitando trocas de ar entre os provetes e o exterior;
8. Nos tempos de medição, retirar os provetes e secar o excesso de água com uma toalha absorvente, pesar ( $m_i$ ) e colocar novamente no tabuleiro.

A absorção a um dado instante é determinada pela expressão (3.7).

$$\text{Absorção (kg/m}^2\text{)} = \frac{(m_i - m_o)}{A} \quad (3.7)$$

Em que,

$m_i$  – Massa do provete no instante de medição  $i$  (kg);

$m_o$  – Massa inicial do provete (kg);

$A$  – Área da face inferior do provete ( $m^2$ ).

O coeficiente de absorção (CA) é determinado pelo declive da reta de regressão linear entre a absorção e a raiz do tempo, tendo por base a medição entre os 20 minutos e as 6 horas, expresso em  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$ .

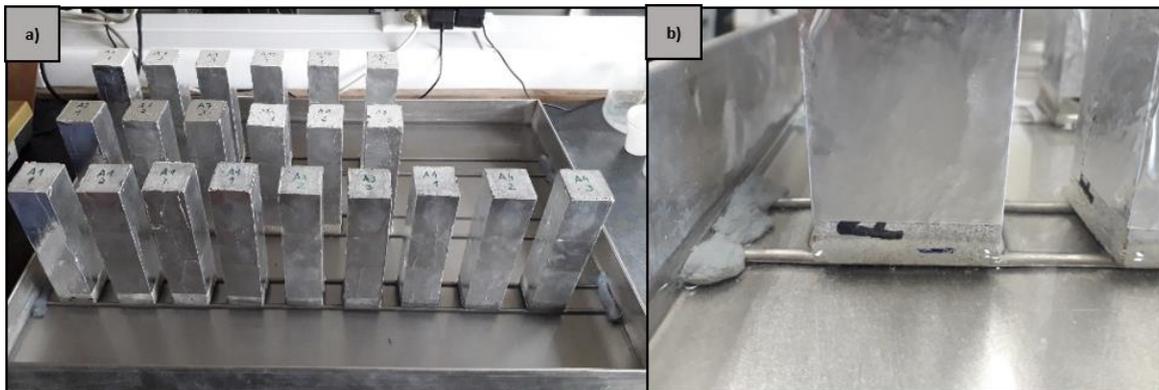


Figura 3.15 – a) Disposição dos provetes durante o ensaio; b) Pormenor do nível da água no tabuleiro.

### 3.11.3. Retração

O ensaio de retração foi realizado segundo a norma NP EN 12617-4 (2002). Foram utilizados os provetes referidos em 3.2., com apoios metálicos nas extremidades, usados para medir a variação de comprimento entre as duas faces (Figura 3.16a)). Foram ensaiados três provetes por cada composição. Para a realização dos ensaios utilizou-se o comparador *Matest E077*, ilustrada na Figura 3.16b), com precisão de  $1 \mu\text{m}$  e curso máximo de 5 mm. Inicialmente, os provetes foram pesados e após colocação destes no aparelho de medição, registou-se a distância entre as duas faces.

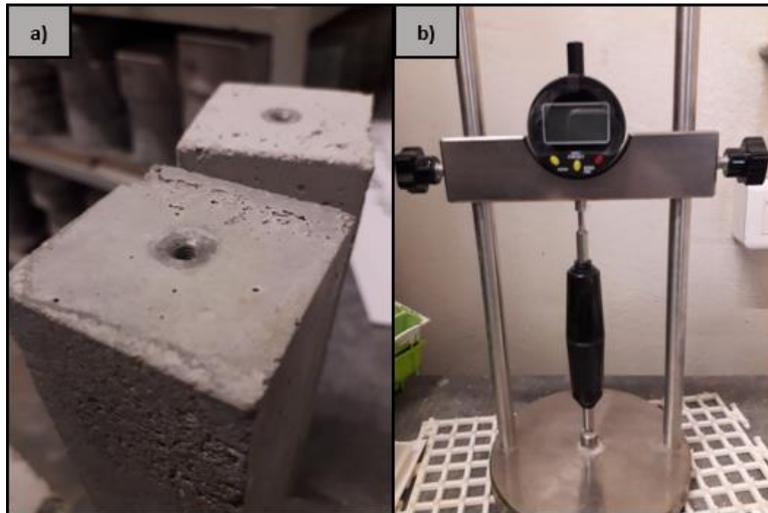


Figura 3.16 – a) Pormenor dos apoios metálicos nos provetes; b) Medidor de comprimento Matest E077.

A retração observada nos provetes pode então ser obtida através das expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L \times 1000}{L_0} \quad (3.8)$$

Em que,

$\varepsilon$  – Retração ( $\times 10^{-6} \text{m/m}$ );

$\Delta L$  – Variação de comprimento relativo a  $L_0$  (mm);

$L_0$  – Comprimento inicial do provete (160mm).



Figura 3.17 – a) Medição da retração nos provetes; b) Pormenor do encaixe entre o provete e o equipamento.

## 4. Análise e discussão de resultados

Neste capítulo é feita a apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados durante campanha experimental, descritos no capítulo 3.

Numa primeira fase, caracterizaram-se os cimentos reciclados em termos de fases presentes nos compostos anidros e produtos de hidratação, tendo por base as análises de TG e DRX. Posteriormente, analisam-se as características no estado fresco (espalhamento, massa volúmica fresca, volume de vazios) e endurecido (resistência mecânica, absorção capilar, retração), para diferentes composições, conforme apresentado no capítulo 3.

### 4.1. Análise TG

As análises termogravimétricas (TG) e termogravimétricas diferenciais (DTG) foram realizadas, para amostras de CRPNT e CRP35NT, ou seja, cimentos hidratados moídos não tratados, provenientes de pastas de diferente compacidade. Foram também analisadas amostras destes dois materiais após a sua termoativação a 700 °C, CRP e CRP35. Como termo de comparação, analisou-se ainda uma amostra do cimento Portland (CPN) utilizado nesta campanha experimental, CEM I 42,5R. Os resultados obtidos para o CRP, CRPNT e CPN apresentam-se na Figura 4.1, enquanto que os resultados obtidos para o CRP35 e CRP35NT podem ser consultados na Figura A1.1, presente no Anexo A1.

Em relação ao CRPNT, são facilmente identificáveis três picos na sua DTG, correspondendo estes a fases com maior taxa de perda de massa. O primeiro pico, presente entre os 150 °C e 200 °C, corresponde a perda de água livre por evaporação, bem como à decomposição de produtos de hidratação, nomeadamente o CSH, a etringite, o gesso e eventuais fases Afm. Estas reações, correspondentes à fase de desidratação (Ldh), estendem-se até cerca de 450 °C.

Entre cerca de 450-550 °C ocorre a fase de desidroxilação (Ldx), apresentando um pico máximo próximo dos 530 °C. Nesta fase ocorre fundamentalmente a desidroxilação do hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ . A partir dos 550 °C ocorre a fase de descarbonatação (Ldc), onde o carbonato de cálcio é progressivamente descarbonatado, obtendo-se um pico máximo entre os 750-800 °C. Resultados semelhantes foram obtidos por Bogas *et al.* (2019).

A análise realizada ao cimento proveniente de uma pasta de maior compacidade, CRP35, não revelou diferenças significativas em relação ao CRP no que diz respeito às três fases principais, tendo-se verificado apenas uma menor percentagem de perda de massa, fruto do seu menor nível de hidratação (ver Figura A1.1 em anexo).

Considerando a curva de TG do material não tratado (CRPNT), conclui-se que a maior temperatura que permite a formação de teores significativos de produtos desidratados, sem emissão significativa de  $\text{CO}_2$ , situa-se entre 650 °C e 700 °C.

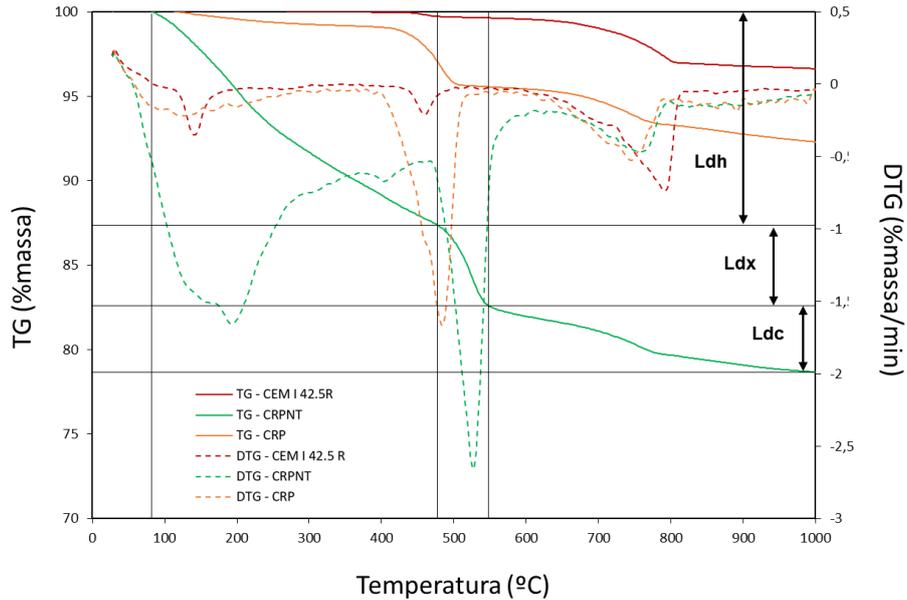


Figura 4.1 – Análises TG e DTG realizadas ao CPN, cimento reciclado não termoativado, CRPNT, e cimento termoativado a 700 °C, CRP. De forma esquemática indicam-se os troços correspondentes a Ldh, Ldx e Ldc para o CRPNT.

Como seria de esperar, a análise realizada ao cimento de referência, CPN, apenas revelou variações significativas de massa entre os 600 °C e os 800 °C, correspondendo essa fase à descarbonatação do filer calcário presente no cimento Portland.

Para os valores de Ldx, Ldh e Ldc indicados na Tabela 4.1, pode-se estimar o grau de hidratação,  $\alpha$ , do CRPNT, a partir da expressão (4.2) (Monteagudo *et al.*, 2014). Em que  $W_b$ , calculado a partir da expressão 4.1, é o teor de água combinada,  $W_n$  é a quantidade de água requerida para a hidratação completa do cimento anidro (assume-se simplificada o valor de 0,23, de acordo com Neville (2012)) e  $Ldc_{CPN}$  é a perda de massa por descarbonatação do CPN. Verifica-se que o teor de água combinada no CRPNT é superior a 75 %, o que confirma o elevado nível de hidratação atingido nos materiais de origem, conforme inicialmente pretendido. Consta-se ainda o aumento de Ldc no CRNT face ao CPN, que traduz um ganho de carbonatação.

$$W_b = Ldh + Ldx + 0,41 \times (Ldc - Ldc_{CPN}) \quad (4.1)$$

$$\alpha = \frac{W_b}{W_n} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

Em relação ao cimento tratado CRP, ao contrário do que poderia ser esperado, verifica-se um valor não desprezável de Ldx, a que corresponde 3,40 % de  $Ca(OH)_2$  (Tabela 4.1). Isso significa que durante o tratamento térmico e armazenamento, parte do CaO livre no CRP terá reidratado para formar  $Ca(OH)_2$ . Não se verifica um aumento significativo do nível de carbonatação entre o CRPNT e o CRP, resultante do tratamento térmico e armazenamento.

Tabela 4.1 – Valores da água combinada e coeficiente de hidratação para amostras de CPN, CRPNT, CRP35NT, CRP e CRP35.

Material	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc (%)	Wb (%)	$\alpha$ (%)
CPN	0,10	0,20	3,07	0,30	1,30
CRPNT	12,96	3,90	3,93	17,37	75,53
CRP35NT	10,60	3,20	3,73	14,20	61,76
CRP	1,00	3,40	3,29	4,40	19,13
CRP35	0,50	2,20	2,57	2,70	11,74

## 4.2. Análise DRX

A análise de difração de raios X (DRX) foi utilizada para identificar as fases cristalinas formadas no cimento reciclado. Foram assim analisadas amostras de cimentos hidratados (CRPNT e CRP35NT), cimentos termoativados a 700 °C (CRP e CRP35) e também do cimento Portland de referência, CPN, como ilustrado na Figura 4.2.

No CPN confirma-se a presença dos principais constituintes do clínquer, nomeadamente os silicatos tricálcicos e bicálcicos, na forma de alite e belite, respetivamente. Os difratogramas indicam maior cristalinidade dos seus compostos, traduzida por picos mais finos e bem definidos.

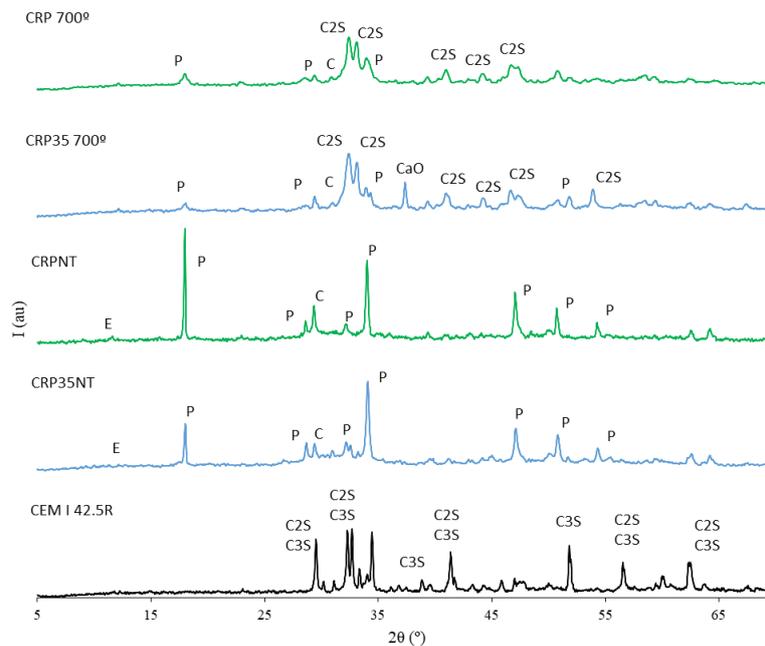


Figura 4.2 – Análises DRX realizadas ao CPN, cimentos reciclados não termoativados, CRP35NT e CRPNT e cimentos reciclados termoativados a 700 °C, CRP35 e CRP. C<sub>3</sub>S - silicato tricálcico, C<sub>2</sub>S - silicato bicálcico, C - calcite, P - portlandite, CaO - cal livre, E - etringite. Eixo vertical I(ua) – intensidade das contagens em unidades arbitrárias

Em relação aos cimentos não termoativados, CRPNT e CRP35NT, é possível observar a presença de portlandite, etringite e calcite. Devido à sua natureza amorfa, os CSH formados na hidratação não são identificáveis pelo DRX. Ao comparar as duas pastas de origem, confirmam-se picos de portlandite mais elevados no CRPNT do que no CRP35NT, associados a um maior nível de hidratação. Tendências similares foram observadas por Shui *et al.* (2009) e por Bogas

*et al.* (2019), em 2.4.3.

Nos cimentos reciclados termoativados a 700 °C, CRP e CRP35, ocorre uma redução da portlandite, que é transformada em CaO livre e calcite, e aparece C<sub>2</sub>S, resultante da desidratação dos CSH. Estas fases cristalinas são confirmadas por Wang *et al.* (2019), Neto (2019) e Bogas *et al.* (2019). Confirma-se a redução de calcite do CRPNT para o CRP, sugerindo a ocorrência de ligeira descarbonatação do cimento tratado a 700 °C.

### 4.3. Caracterização de argamassas no estado fresco

Neste subcapítulo são analisados os resultados obtidos nos ensaios das argamassas no estado fresco. Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados de espalhamento, massa volúmica e teor de vazios.

*Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, massa volúmica fresca, massa volúmica teórica e teor de vazios.*

Composição	a/l	Espalhamento (mm)	M.V. Fresca (kg/m <sup>3</sup> )	M.V. Teórica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Vazios (%)
100%CPN	0,47	141	2198	2182	4,3
100%CPNAL	0,72	-	2152	2041	-
15%Cz + 85%CPN	0,44	141	2226	2182	3,9
30%Cz + 70%CPN	0,42	142	2225	2176	4,5
100%CRP35AL	0,90	164	2015	1920	1,6
100%CRP35	0,80	142	1974	1962	5,7
100%CRPNT	0,63	146	2064	2042	5,4
100%CRF	0,92	144	2009	1912	1,5
100%CRB	0,73	140	2070	1993	2,7
100%CRP	0,90	143	2000	1920	2,3
5%CRP + 95%CPN	0,47	144	2175	2179	5,2
15%CRP + 85%CPN	0,55	140	1997	2126	10,9
30%CRP + 70%CPN	0,58	140	2004	2101	9,8
50%CRP + 50%CPN	0,64	141	2145	2060	1,8
15%Cz + 85%CRP	0,85	141	2049	1933	1,1
30%Cz + 70%CRP	0,75	144	2009	1967	5,3
100% CRP + 2%SP	0,72	141	2024	1998	5,1
100%CPN	0,60	237	2175	2105	1,8
15%CRP + 85%CPN	0,60	217	2171	2097	1,9
30%CRP + 70%CPN	0,60	150	2156	2090	2,5
50%CRP + 50%CPN	0,60	131	2150	2081	2,5
30%Cz + 70%CPN	0,60	250	2207	2071	0,4
30%Cz + 30%CRP + 40%CPN	0,60	158	2136	2039	3,3

### 4.3.1. Espalhamento

Os valores obtidos nos ensaios de espalhamento são apresentados na Tabela 4.2 e também na Figura 4.3. Neste trabalho foram produzidas maioritariamente misturas com valores semelhantes de trabalhabilidade, procurando-se a mínima relação  $a/l$  que permitisse obter argamassas plásticas, com valores de espalhamento compreendidos entre 140 e 150 mm.

Como já referido em 2.4.3.2., confirma-se uma maior exigência de água por parte dos cimentos reciclados, em comparação com o CPN. De facto, a substituição de CPN por 100%CRP conduziu a um aumento de 83 % na quantidade de água necessária para o mesmo espalhamento. A maior exigência de água está relacionada com a maior área superficial e maior porosidade do CR, bem como a existência de CaO livre (Carriço *et al.*, 2020). Ainda assim, para percentagens de substituição até 30 %, o aumento de exigência de água foi inferior a 25 %. Para 5 % de substituição a trabalhabilidade não é alterada.

Nas misturas com 100%CRPNT, o aumento de exigência de água foi 34 % (cerca de 30 % inferior face a 100%CRP), o que se justifica pela menor porosidade e menor área superficial destas partículas, bem como a ausência de CaO livre nos cimentos não tratados.

Naturalmente, a adição de 2 % de superplastificante (SP) aumentou a trabalhabilidade da mistura com 100%CRP, permitindo uma redução de 20 % na dosagem de água para a mesma trabalhabilidade. Confirma-se assim que apesar do SP funcionar de forma adequada no CR, a sua eficiência é maior no CPN. Isso resulta provavelmente de parte do SP ser adsorvido e consumido na porosidade interna e área superficial do CR.

Nas misturas com CR de maior grau de finura (CRF) verificou-se um ligeiro aumento da água necessária para o mesmo espalhamento. Esse facto justifica-se pela maior área superficial das partículas de CRF.

A utilização de resíduos de betão para a produção de argamassas levou a uma redução da exigência de água para o mesmo espalhamento, requerendo menos 19 % de água do que as produzidas a partir de resíduos de pasta. Conclui-se assim que a presença de aproximadamente 24 % de agregado fino no CRB contribui para uma maior trabalhabilidade da mistura. Menos água é absorvida pelo CR, ficando disponível para a trabalhabilidade.

Para idêntica trabalhabilidade, as argamassas com CR proveniente de pastas de maior compacidade (CRP35) exigiram menos 11 % de água do que as misturas com CRP. Isso deverá resultar do maior teor de partículas não hidratadas e da menor porosidade do CRP35.

Em relação às misturas de igual  $a/l$  (0,60), confirma-se a redução de trabalhabilidade com o aumento da percentagem de incorporação de CRP. Para 50 % de incorporação de CRP, verificou-se uma redução de 45 % na trabalhabilidade face ao 100%CPN.

A utilização de cinza volante promoveu um aumento de trabalhabilidade em todas as misturas, conforme reportado por outros autores (Bogas, 2011; Linnu *et al.*, 2009). Isso traduziu-se numa

redução de a/l para uma dada trabalhabilidade ou num aumento do espalhamento para o mesmo a/l. A incorporação de 30%Cz permitiu uma redução de 11 % na quantidade de água das misturas com CPN e 17 % nas misturas com CR. Assim, a Cz promove um maior efeito no aumento de trabalhabilidade das misturas com CR do que com CPN. O maior efeito da Cz na trabalhabilidade é confirmado nas misturas trenarias, em que para 30%CRP e igual a/l as argamassas também com 30%Cz conduziram a argamassas 5 % mais fluídas do que as misturas com apenas 70 % CPN e 30% CRP. Por um lado, a introdução de Cz reduz o teor de CaO livre no sistema, bem como a quantidade de partículas absorventes de água. Por outro lado, as partículas finas de Cz podem lubrificar os grãos de CR de maior dimensão, impedindo a sua aglomeração e o aprisionamento da água de mistura (Linnu *et al.*, 2009; Gouveia, 2019).

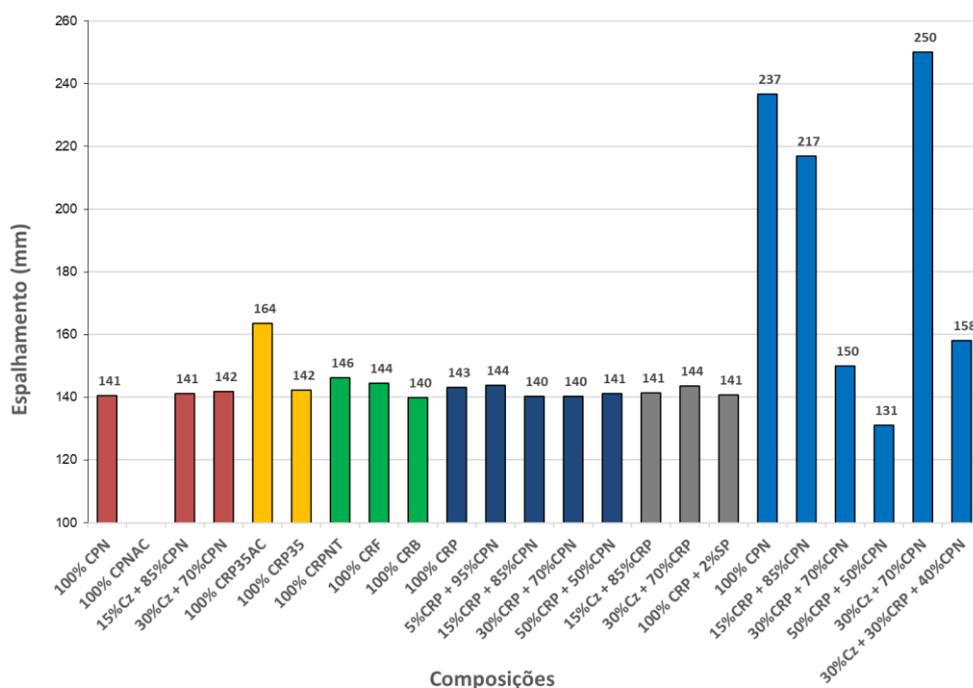


Figura 4.3 – Resultados dos ensaios de espalhamento das misturas produzidas.

#### 4.3.2. Massa volúmica fresca e teor de vazios

Os valores obtidos nos ensaios de massa volúmica fresca são apresentados na Tabela 4.2 e também na Figura 4.4. Esta propriedade das argamassas pode ser afetada por vários fatores, como a proporção de cada constituinte na mistura e o volume de vazios. Na Tabela 4.2 apresenta-se também a massa volúmica teórica e o volume de vazios, calculados em 3.10.2 e 3.10.3, segundo as expressões 3.3. e 3.4., respetivamente.

Como já era expectável, verifica-se uma maior massa volúmica nas misturas produzidas com CPN em relação às produzidas com CR. Isso justifica-se pela maior massa volúmica do CPN e maior relação a/l das argamassas com CR.

As argamassas com CR proveniente do betão apresentaram maior massa volúmica do que as argamassas com CR proveniente de pasta, em resultado da sua menor relação a/l. Nas misturas

de igual a/l ocorre uma ligeira redução de massa volúmica com a incorporação de CR, que em parte está associado ao facto de CR apresentar menor massa volúmica do que o CPN. Outro fator deverá estar relacionado com a maior compacidade atingida nas misturas com CPN (menor teor de vazios), associadas a maior fluidez.

As misturas produzidas com cinzas volantes revelaram, tanto para o CPN como para o CR, um ligeiro aumento da massa volúmica. Estes resultados são explicados pela maior fluidez conferida pelas Cz, aumentando a compacidade e diminuindo o volume de vazios.

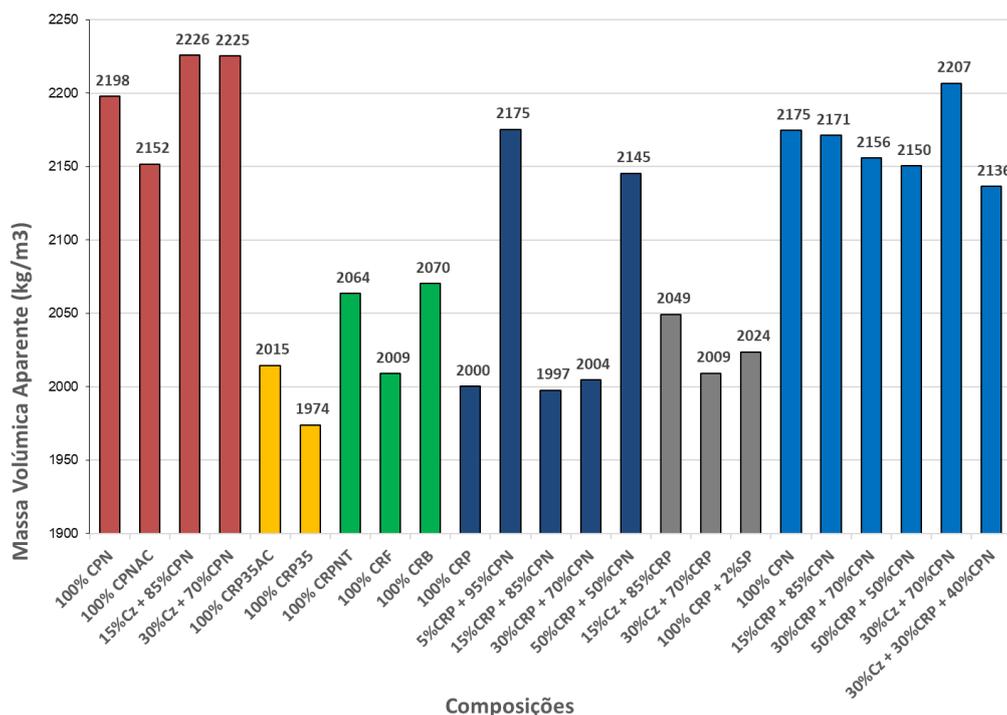


Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de massa volúmica fresca de cada mistura produzida.

## 4.4. Caracterização de argamassas no estado endurecido

Neste subcapítulo é realizada a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, absorção capilar e retração.

### 4.4.1. Resistência mecânica

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão e à flexão para as diferentes idades de ensaio. No Anexo A3 apresentam-se os valores obtidos para todos os provetes de ensaio e ainda os respetivos coeficientes de variação.

Na Tabela 4.3 verifica-se que tanto para a resistência à tração por flexão como para a resistência à compressão, o coeficiente de variação não varia de forma significativa com a composição das misturas. Em seguida discutem-se essencialmente os resultados obtidos para a resistência à compressão, visto que para a resistência à tração por flexão verificam-se tendências semelhantes.

Tabela 4.3 – Valores médios obtidos nos ensaios de resistência a compressão e flexão, *fcm* e *fctm*, respectivamente, realizados as argamassas (MPa).

Composição	a/l	3 dias		7 dias		28 dias		90 dias	
		fcm	fctm	fcm	fctm	fcm	fctm	fcm	fctm
<b>100%CPN</b>	0,47	42,4	5,80	50,2	5,56	58,3	6,95	60,6	7,77
<b>100%CPNAL</b>	0,72	22,9	5,28	31,0	5,81	36,9	7,21	38,3	7,55
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	40,0	5,81	43,0	6,19	57,5	7,11	67,3	8,83
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	31,2	4,98	36,3	5,60	50,5	6,60	57,2	7,99
<b>100%CRP35AL</b>	0,90	8,8	2,34	10,8	2,69	13,7	3,22	14,6	3,52
<b>100%CRP35</b>	0,80	14,0	3,21	15,1	3,15	18,1	3,60	18,7	3,67
<b>100%CRPNT</b>	0,63	0,6	0,28	-	-	0,9	0,50	-	-
<b>100%CRF</b>	0,92	14,8	2,70	12,6	2,85	17,8	3,81	16,0	3,04
<b>100%CRB</b>	0,73	7,4	1,78	10,9	2,40	12,0	2,55	10,1	2,98
<b>100%CRP</b>	0,90	12,9	2,79	13,2	2,92	15,4	3,06	15,4	3,03
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	41,4	5,65	44,9	6,42	52,6	7,08	53,8	6,50
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	31,5	5,27	36,6	5,64	38,9	5,50	42,6	5,42
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	30,4	4,24	36,5	4,81	38,7	5,60	43,3	5,18
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	28,0	4,00	31,5	4,61	36,0	5,23	36,9	5,45
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	11,0	2,37	12,6	2,64	13,4	3,05	15,3	3,24
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	8,2	1,84	9,2	1,86	14,2	2,76	18,3	4,07
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	24,9	4,37	24,0	4,52	28,3	4,81	27,6	4,57
<b>100%CPN</b>	0,60	28,3	5,84	39,2	5,63	50,7	7,01	54,6	7,42
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	27,8	5,32	37,4	6,19	47,1	6,67	49,9	6,72
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	28,4	4,61	34,5	5,57	44,3	6,00	42,5	6,20
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	27,7	4,97	34,3	5,37	39,7	5,26	40,8	6,21
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	15,2	4,17	21,5	4,87	30,4	5,71	39,8	6,29
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	13,8	2,77	18,3	3,64	25,8	4,66	31,9	5,28

#### 4.4.1.1. Eficiência do cimento reciclado

Na Figura 4.5 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão e flexão das misturas produzidas apenas com 100%CPN, 100 % cimentos provenientes de pasta e betão de origem tratados a 700 °C (CRP e CRB), cimento proveniente de pasta não termoativado (CRPNT) e ainda uma mistura com CRP e adição de SP. Todas estas misturas foram produzidas para o mesmo espalhamento.

Como seria de esperar, o cimento não tratado, ou seja, sem termoativação, revelou valores pouco significativos de resistência à compressão, inferior a 1,0 MPa aos 28 dias. Confirma-se o elevado nível de hidratação da pasta de origem, existindo uma fraca contribuição das partículas de cimento eventualmente não hidratadas. Esta argamassa revelou fraca coesão a todas as idades.

As argamassas produzidas com CRP (CR proveniente de pasta) atingiram resistências à compressão de 12,9 MPa e 15,4 MPa aos 3 e 28 dias, respectivamente. Estes valores foram 70 e 74 % inferiores aos obtidos nas argamassas de referência de menor a/l ensaiadas às mesmas idades, respectivamente. Por sua vez, as misturas produzidas com CR provenientes resíduos de betão (CRB) apresentaram resistências 79 % inferiores aos 28 dias (12,0 MPa). Apesar das argamassas com CRB terem sido produzidas com menor a/l, o maior teor de agregado fino neste ligante ( $\approx 24\%$ ) fez com que a resistência à compressão nestas argamassas fosse 22 % inferior à das argamassas com CRP. Considerando apenas o teor de CR no CRB ( $\approx 76\%$ ), a relação a/l equivalente seria de 0,96, superior ao 0,90 da mistura com 100%CRP.

A adição de 2%SP conferiu uma melhor trabalhabilidade à mistura, permitindo a diminuição de 20 % na relação a/l, conduzindo a resistências de 28 MPa, ou seja, 48 % da resistência obtida para o CPN com a/l 35 % inferior.

Na Tabela 4.3 é possível ainda comparar as resistências de misturas com 100%CPN e 100%CRP de igual relação a/l de 0,72. Neste caso, a redução de resistência nas misturas com CRP foi de apenas 23 % face às argamassas de referência com apenas CPN.

Tendo em consideração a evolução de resistência observada entre a/l de 0,90 e 0,72 e admitindo uma relação linear da mesma com a relação a/l (na verdade, a variação tende a ser ainda mais pronunciada), estima-se uma resistência potencial de 43 MPa para a/l de 0,50. Como tal, tendo em consideração a EN 197-1, o cimento reciclado pode ser equiparado a um CPN de classe 32,5.

Assim, é demonstrada a elevada potencialidade do cimento reciclado, que manifesta elevada capacidade de reidratação após termoativação. No entanto, um fator relevante que dificulta a sua utilização é a sua elevada exigência de água e baixa trabalhabilidade.

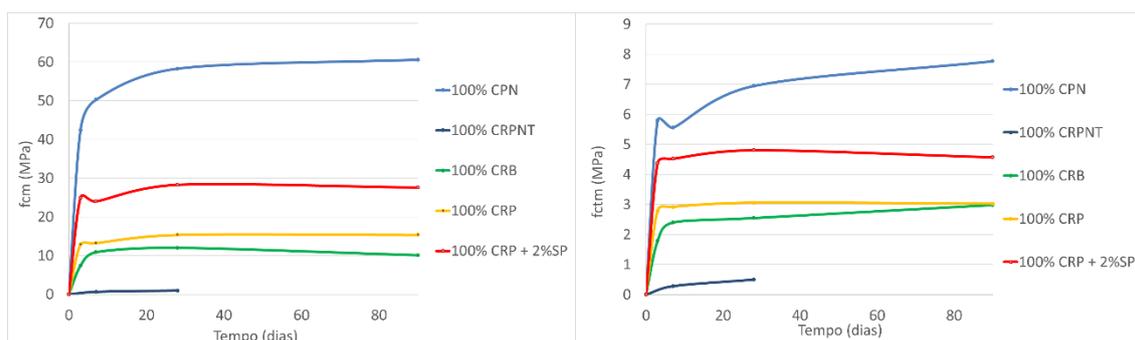


Figura 4.5 – Resistências à compressão (à esquerda) e flexão (à direita) em argamassas de igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP.

#### 4.4.1.2. Influência da composição da pasta de origem

Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão e flexão das misturas de igual trabalhabilidade produzidas a partir de pasta de origem de diferentes compacidades, ou seja, relações a/l de 0,35 (CRP35) e 0,55 (CRP), respectivamente.

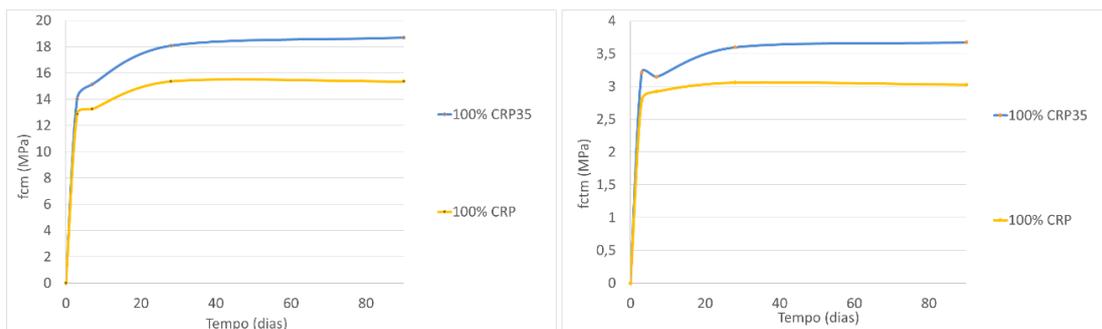


Figura 4.6 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP.

Verifica-se que as misturas com CRP35, associadas a menor  $a/l$ , apresentam resistência à compressão cerca de 17 % superior à das argamassas com CRP. Para tal, também poderá contribuir a maior presença de partículas não hidratadas no CRP35. No entanto, tendo em consideração a Tabela 4.3, constata-se que para igual relação  $a/l$ , a argamassa com CRP35 apresenta uma resistência à compressão 11 % inferior e idêntica resistência à flexão.

#### 4.4.1.3. Influência da percentagem de cimento reciclado

Na Figura 4.7 apresentam-se as resistências obtidas nos ensaios de compressão e flexão realizados a misturas com diferentes percentagens de incorporação de CRP, para idêntica trabalhabilidade. Conforme esperado, verifica-se um decréscimo da resistência com o aumento de incorporação de cimento reciclado. Neste caso, face à argamassa de referência com 100%CPN, aos 28 dias constata-se uma redução de 9,7 %, 33 %, 34 % e 38 % para percentagens de incorporação de CRP de 5 %, 15 %, 30 % e 50 %, respetivamente.

Destaca-se a reduzida variação de resistência para percentagens de substituição entre 30 e 50 %. Conclui-se que para 50 % de substituição, apesar do elevado  $a/l$  (0,64), são atingidas classes de resistência superiores a 32,5. Aos 3 dias as reduções de resistência foram de 2,3 %, 26 % e 34% para as mesmas percentagens de substituição, respetivamente. Conclui-se assim que as diferenças de resistência face ao CPN tendem a ser inferiores a idades mais jovens. Isso é mais claramente observado na Figura 4.8. A mesma tendência é reportada por outros autores (Shui *et al.*, 2009, Carriço *et al.*, 2020), atribuindo-se esse facto à maior rapidez de hidratação e endurecimento do CR, associado a maior área superficial do que o CPN.

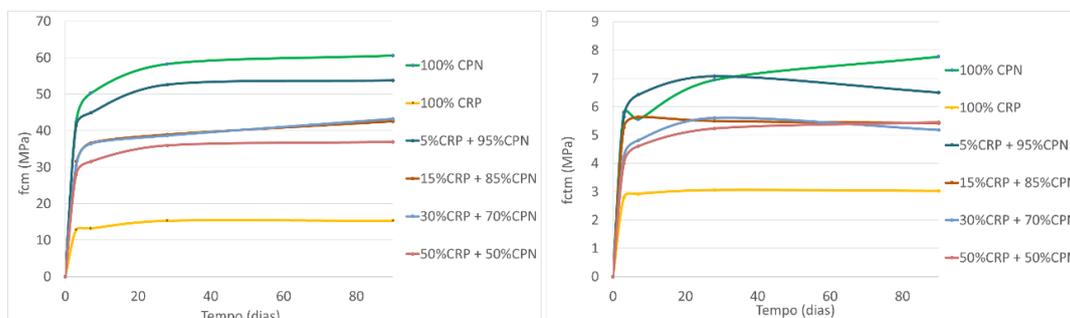


Figura 4.7 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

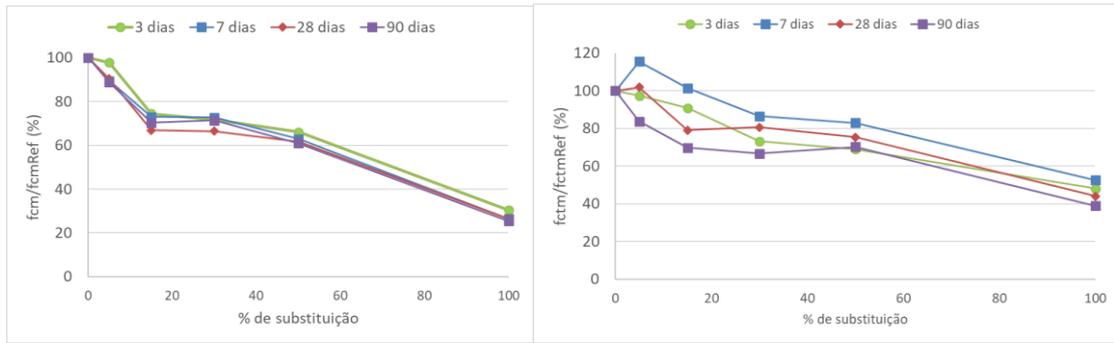


Figura 4.8 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) relativas à mistura de referência com 100%CPN em função da percentagem de substituição de CPN por CRP, para argamassas de igual trabalhabilidade. Diferentes idades entre 3 e 90 dias.

Tendo em consideração argamassas de igual a/l (0,60) confirma-se uma maior aproximação entre a resistência na argamassa de referência e a resistência das argamassas com diferentes teores de CR. Neste caso, a resistência à compressão aos 28 dias para 15 %, 30 % e 50 % de CRP diminuiu apenas 7 %, 12,6 % e 22 % face a 100%CPN, respetivamente (Figura 4.9). Por sua vez, aos 3 dias a variação de resistência foi inferior a 2,1 % para até 50 % de incorporação de CRP. Pode-se concluir que para percentagens de substituição até 15 %, a utilização de CRP não conduz a perdas de eficiência significativas.

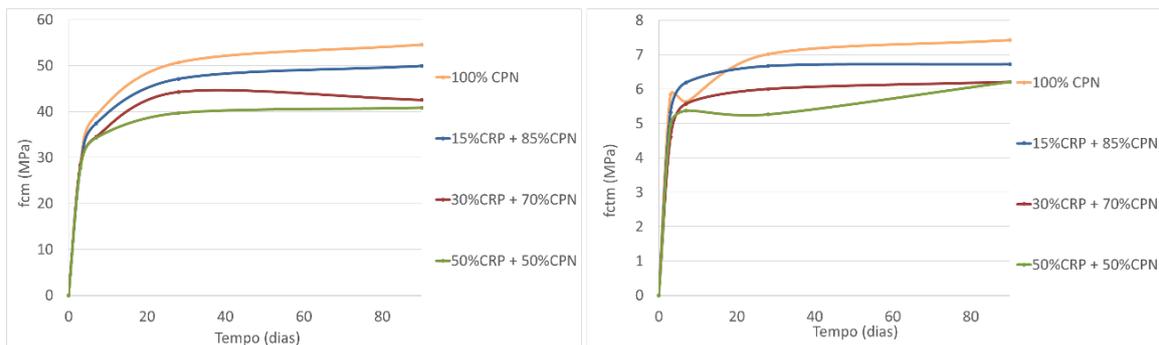


Figura 4.9 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com uma relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

#### 4.4.1.4. Influência da granulometria do cimento reciclado

Na Figura 4.10 apresentam-se as resistências à compressão e flexão obtidas para misturas com cimentos reciclados de diferentes finuras. A maior finura do CRF, proporcionando maior área superficial e como tal maior reatividade, permite justificar as maiores resistências mecânicas observadas aos 28 dias de idade, mesmo tendo em consideração o ligeiro aumento de a/l face às argamassas com CRP. Porém, verifica-se uma grande variabilidade na resistência entre provetes ensaiados a diferentes idades, tendo sido muito sensível às condições de produção.

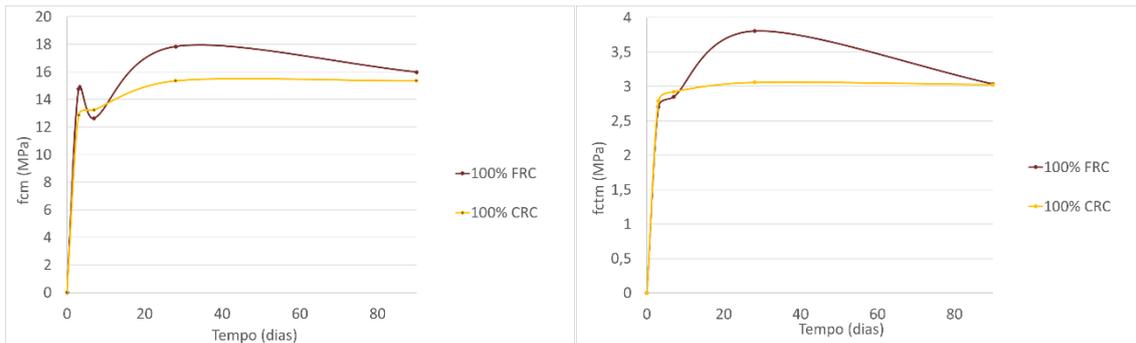


Figura 4.10 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP.

#### 4.4.1.5. Influência da incorporação de cinzas volantes

Na Figura 4.11 resumem-se os resultados obtidos para argamassas com diferentes incorporações de cinzas volantes e igual trabalhabilidade. Como seria expectável, as misturas desenvolveram maiores resistências apenas a longo prazo, a partir dos 28 dias, devido à reatividade mais lenta das Cz para idades jovens. De facto, a partir dos 7 dias de idade é que as reações pozolânicas para formação de CSH assumem maior relevância (Bogas, 2011; ACI232R-03, 2003). Este comportamento difere do CRP, cujo desenvolvimento da resistência inicial tende a ser mais acelerado. Tal como discutido em 4.3.1, a incorporação de cinzas originou também um aumento de trabalhabilidade das misturas, permitindo uma redução da relação a/l em 5 e 15 % para incorporações de 15 e 30 % de Cz, respetivamente.

Nas misturas com CPN, apesar de se verificar uma recuperação progressiva da resistência ao longo do tempo nas argamassas com cinzas, apenas para incorporações até 15%Cz foram atingidas resistências à compressão aos 90 dias superiores às de 100%CPN. Nas misturas de igual a/l (0,60), a adição de 30%Cz foi relativamente ineficiente até 90 dias de idade, resultando uma redução de 27 % de resistência face às argamassas com CPN (Figura 4.12).

Em relação às misturas com CRP, a adição de cinzas volantes permitiu apenas aumentar cerca de 19 % a resistência à compressão aos 90 dias de idade, para 30%Cz. Para tal, terá contribuído a redução de 17 % atingida na relação a/l. No entanto, tendo em consideração misturas de igual a/l (0,60), a incorporação de 30 % de Cz foi menos efetiva do que a de igual teor de CRP, mesmo a 90 dias de idade. Sobretudo, destaca-se o facto de até aos 28 dias, a incorporação de 30%CRP em substituição de 30%Cz permitir um aumento de até 46 % na resistência mecânica. Conclui-se assim que o CR é uma adição mais ativa do que as Cz, tornando-se mais eficiente em idades jovens até pelo menos 28 dias de idade.

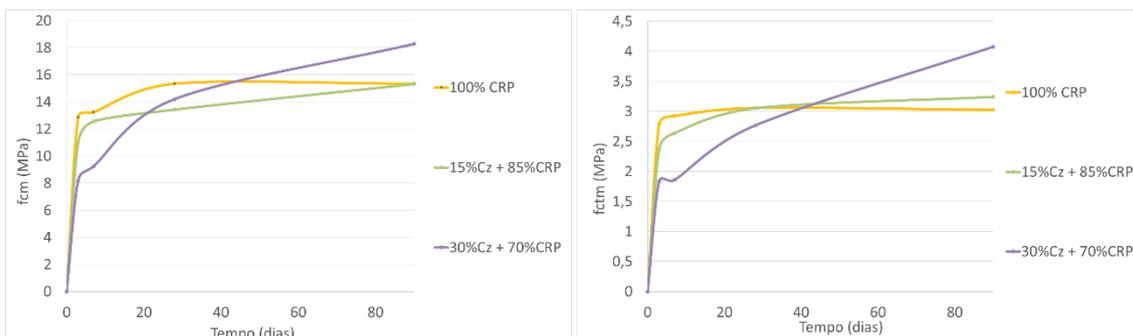


Figura 4.11 – Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com igual trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP e 30%CRP + 70%CRP.

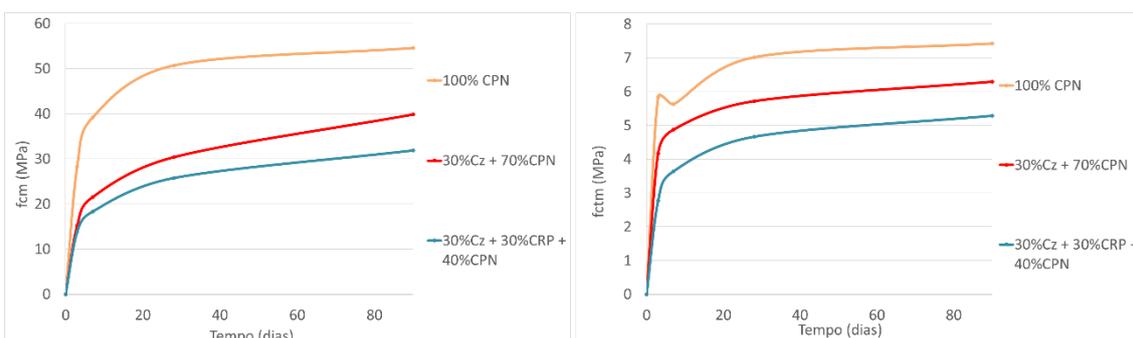


Figura 4.12 - Resistências à compressão (à esquerda) e à flexão (à direita) obtidas para misturas com uma relação a/l de 0,60: 100%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%CRP + 30%Cz + 40%CPN.

A adição conjunta de CRP e Cz confirmando-se o efeito sinérgico entre estas duas adições. Porém, não se verificam vantagens na produção de misturas ternárias envolvendo em simultâneo os dois tipos de adições face às misturas de CPN com apenas Cz ou CRP. Por sua vez, a incorporação de 30%Cz implicou uma maior redução de resistência nas argamassas com CRP do que com CPN. Desse modo, não se confirma o efeito observado por Gouveia (2019), em que se sugere que a maior disponibilidade inicial de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nos CRP poderia contribuir para uma mais rápida ativação das Cz nestas misturas. Estes resultados também não confirmam o melhor efeito das adições pozolânicas na presença do CR, tal como sugerido na literatura (Linnu *et al.*, 2009; Serpell *et al.*, 2015).

#### 4.4.2. Absorção Capilar

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção capilar realizados no âmbito deste trabalho. São indicados os valores de absorção em diferentes instantes bem como o valor do coeficiente de absorção, determinado entre os 20 minutos e as 6 horas, de acordo com o referido em 3.11.2.

Tabela 4.4 – Resultados da absorção e coeficiente de absorção (CA) obtidos no ensaio de absorção capilar.

Composição	a/l	Absorção (kg/m <sup>2</sup> )					CA ( $\times 10^{-3} \text{kg} / \text{m}^2 \text{min}^{0,5}$ )
		10 min	30 min	60 min	24 h	72 h	
<b>100%CPN</b>	0,47	0,03	0,06	0,08	0,21	0,30	<b>0,6</b>
<b>100%CPNAL</b>	0,72	0,08	0,13	0,18	0,67	1,01	<b>1,8</b>
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	0,04	0,06	0,08	0,21	0,30	<b>0,6</b>
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	0,05	0,08	0,10	0,34	0,51	<b>0,9</b>
<b>100%CRP35AL</b>	0,90	0,34	0,53	0,71	2,65	3,82	<b>6,9</b>
<b>100%CRP35</b>	0,80	0,25	0,37	0,48	1,67	2,66	<b>4,3</b>
<b>100%CRPNT</b>	0,63	0,59	1,01	1,42	4,10	4,12	<b>18,1</b>
<b>100%CRF</b>	0,92	0,24	0,36	0,46	1,56	2,47	<b>4,0</b>
<b>100%CRB</b>	0,73	0,21	0,33	0,43	1,65	2,65	<b>4,3</b>
<b>100%CRP</b>	0,90	0,24	0,35	0,45	1,61	2,58	<b>4,1</b>
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	0,03	0,05	0,07	0,23	0,33	<b>0,6</b>
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	0,05	0,10	0,13	0,50	0,71	<b>1,4</b>
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	0,05	0,08	0,09	0,28	0,40	<b>0,7</b>
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	0,06	0,09	0,10	0,37	0,56	<b>1,0</b>
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	0,18	0,30	0,42	1,71	2,82	<b>4,6</b>
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	0,17	0,28	0,37	1,51	2,42	<b>4,0</b>
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	0,06	0,10	0,13	0,45	0,71	<b>1,2</b>
<b>100%CPN</b>	0,60	0,08	0,13	0,18	0,50	0,73	<b>1,4</b>
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	0,08	0,14	0,19	0,56	0,80	<b>1,6</b>
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	0,07	0,12	0,15	0,41	0,60	<b>1,1</b>
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	0,09	0,14	0,17	0,43	0,62	<b>1,1</b>
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	0,14	0,23	0,31	1,12	1,74	<b>3,0</b>
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	0,15	0,22	0,29	0,98	1,53	<b>2,5</b>

#### 4.4.2.1. Eficiência do cimento reciclado

Na Figura 4.13 apresentam-se os resultados da absorção ao longo do tempo e do coeficiente de absorção para as argamassas produzidas com diferentes tipos de cimento, ou seja, CPN, cimento reciclado não termoativado, CRPNT, cimento termoativado proveniente de resíduos de pasta (CRP) e de betão (CRB).

Como seria de esperar, o material não tratado, associado a elevada porosidade e a estrutura porosa muito aberta, apresentou elevada absorção e coeficiente de absorção. Confirma-se a fraca reatividade do CR não tratado.

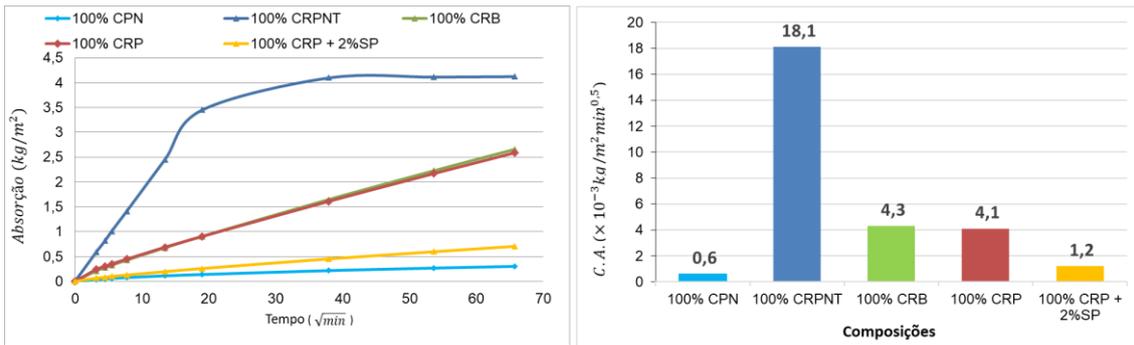


Figura 4.13 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP.

Face às argamassas com 100%CPN, as misturas com 100%CRP conduziram a coeficientes de absorção 7 vezes superiores, o que resulta essencialmente do aumento significativo de  $a/l$  nestas misturas (cerca de 2 vezes superior). No entanto, considera-se que tanto a absorção como o coeficiente de absorção foram semelhantes nas argamassas com resíduos de pasta (CRP) ou de betão (CRB). Neste caso, o menor teor de CR no CRB não afeta significativamente a porosidade, o que poderá estar relacionado com o facto de ambas as misturas possuírem semelhante  $a/l$  de 0,96 (equivalente) (CRB) e 0,90 (CRP), conforme discutido em 4.4.1.1. A maior influência da relação  $a/l$  é confirmada na mistura com 100%CRP e 2%SP, em que uma redução de 20 % neste parâmetro conduziu a uma diminuição de 72 % no coeficiente de absorção (Figura 4.13). Inclusivamente, comparando argamassas de igual  $a/l$  (0,72), verifica-se que misturas com 100%CRP foram capazes de apresentar menor absorção e coeficiente de absorção do que as argamassas com 100%CPN (Figura 4.14). Estes resultados não corroboram o observado na resistência à compressão.

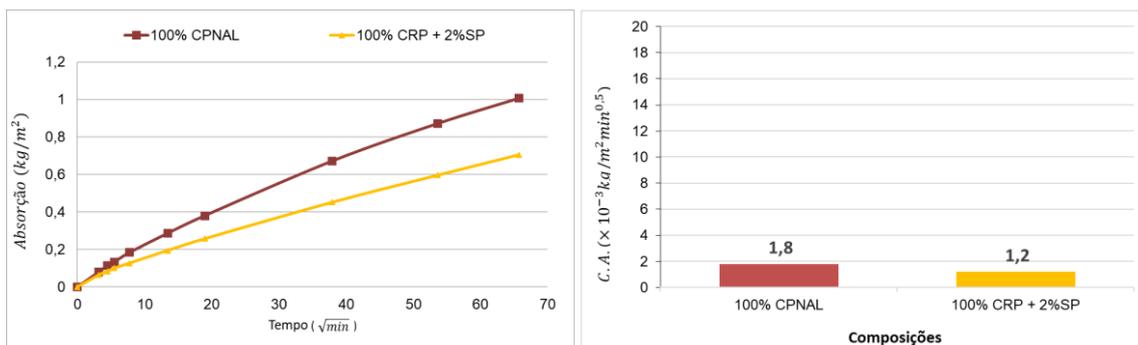


Figura 4.14 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação  $a/l$  de 0,72: 100%CPNAL e 100%CRP + 2%SP.

De facto, em trabalhos realizados por Bogas (2019) e Real (2020), verifica-se que para uma mesma relação  $a/l$  estabelece-se uma maior proximidade entre as partículas de CR, desenvolvendo-se microestruturas mais densas, principalmente em idades jovens. Isso resulta do facto de parte da água ser absorvida pelas partículas porosas de CR, permitindo que a estrutura externa a estes grânulos apresente menor  $a/l$  e, como tal, menor porosidade capilar. Em termos globais, o volume de poros é idêntico nas duas argamassas, porém nas argamassas

com CRP parte desses poros estão incluídos nas próprias partículas, o que proporciona um maior refinamento global da porosidade. Na Figura 4.15 ilustra-se de forma esquemática o desenvolvimento de porosidade nas misturas com CPN e com CRP, percebendo-se melhor este efeito. De facto, as argamassas com CRP apresentam uma estrutura porosa associada a 2 fases distintas (interior das partículas e espaço exterior entre partículas) enquanto as argamassas com CPN apresentam apenas uma estrutura porosa fora das partículas, que para idêntico volume global de porosidade terá de ser necessariamente menos refinada.

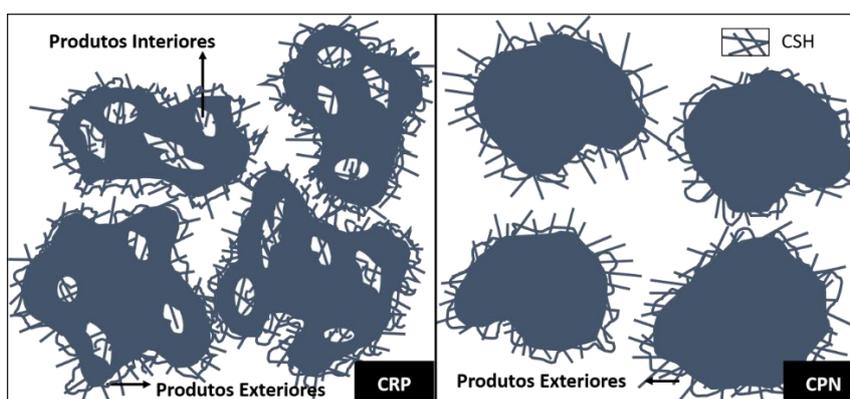


Figura 4.15 – Desenvolvimento de porosidade em pastas com CRP (esquerda) e CPN (direita). Esquema indicativo. Adaptado de Real (2020).

Visto que a resistência mecânica é mais afetada pelo volume total de porosidade e a forma como se ligam os produtos de hidratação, não existe relação com a absorção capilar.

#### 4.4.2.2. Influência da composição da pasta de origem

Na Figura 4.16 apresentam-se os valores da absorção e coeficiente de capilaridade das misturas produzidas com pastas de origem de diferente compacidade. Verifica-se que as argamassas apresentam coeficientes de absorção semelhantes ao longo do tempo, apesar da argamassa com CRP35 ter sido produzida com menor a/l. Isso justifica-se pelo facto da porosidade das partículas de CRP35 ser menor, o que implica uma menor absorção de água. Pelos motivos referidos no ponto anterior, isso faz com que a relação a/l do espaço exterior entre partículas seja aumentado e até possa ser superior do que aquele que se atinge nas misturas de CRP.

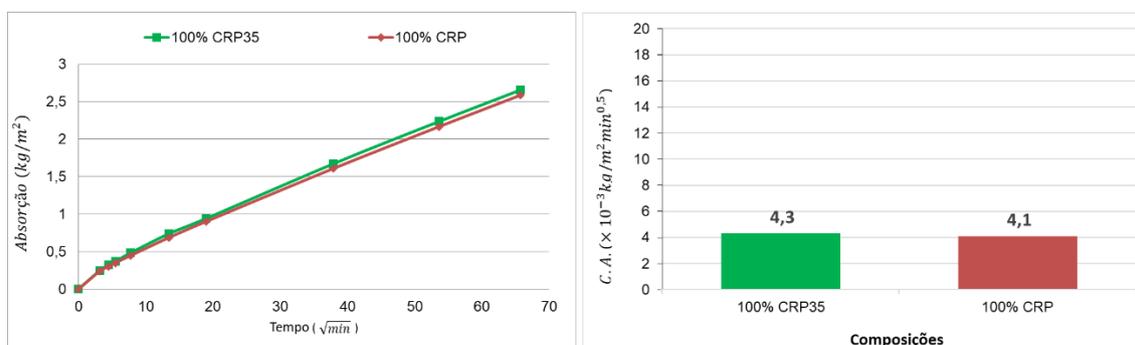


Figura 4.16 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP.

De facto, tendo em consideração argamassas de igual a/l (0,90), observa-se que as misturas com CRP35 passam a estar associadas a maior coeficiente de absorção (Figura 4.17), exatamente pelo facto de a microestrutura do espaço entre partículas tornar-se mais aberto do que aquele que se obtém para 100%CRP.

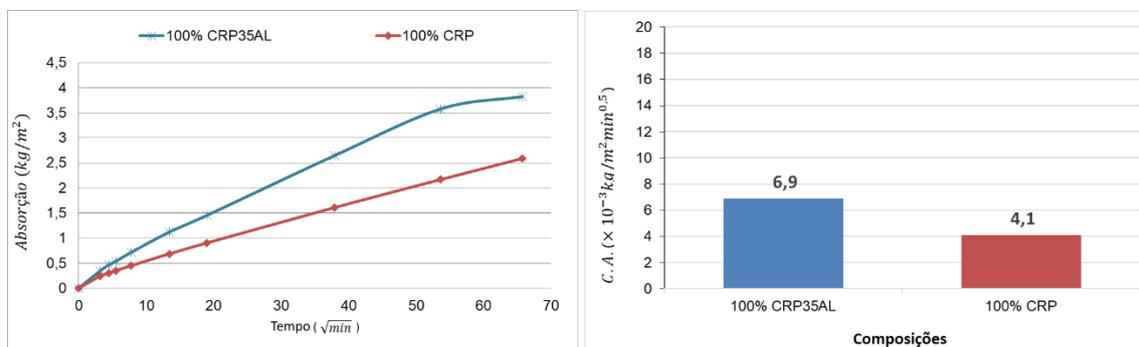


Figura 4.17 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,90: 100%CRP35AL e 100%CRP.

#### 4.4.2.3. Influência da percentagem de cimento reciclado

A influência da percentagem de substituição de CPN por cimento reciclado, CRP, pode ser observado na Figura 4.18. Em geral, a absorção e o coeficiente de absorção tende a aumentar com a incorporação de CRP nas misturas. Apenas na argamassa com 15%CRP obteve-se um CA maior do que aquele que seria de esperar, não se encontrando uma justificação clara para o sucedido.

O aumento do coeficiente de absorção acompanhou o incremento observado na relação a/l para as misturas com maior percentagem de incorporação de CRP. No entanto, o aumento de CA foi mais modesto do que aquele que se poderia esperar pelo simples incremento da relação a/l. Mais uma vez, isso resulta do facto do aumento de relação a/l da matriz entre grânulos anidros ter sido menos importante devido à absorção de água ocorrida nas partículas de CR. Isso justifica, por exemplo, o facto de se observar igual CA nas misturas com 5%CRP, produzidas com o mesmo a/l das argamassas com 100%CPN.

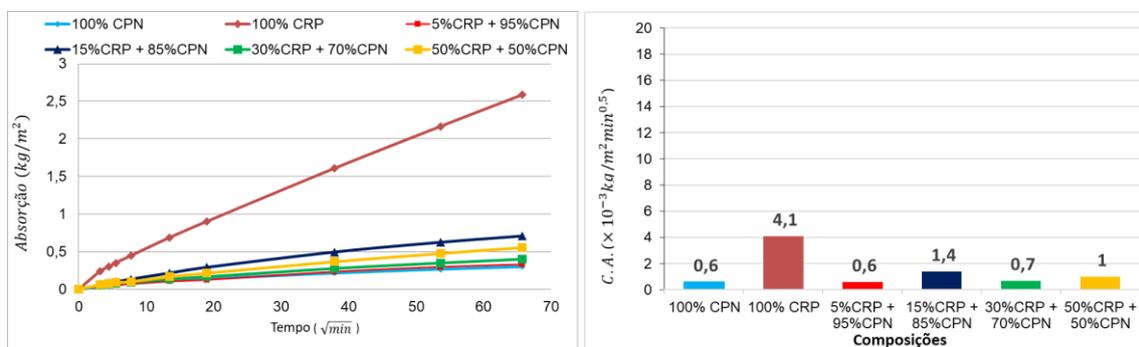


Figura 4.18 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

Por sua vez, tendo em consideração misturas de igual a/l (0,60) (Figura 4.19), apesar das argamassas com maior teor de CRP apresentarem pior trabalhabilidade, o que afeta a sua compacidade (maior teor de vazios, Tabela 4.2), confirma-se um decréscimo ligeiro de CA com o aumento da percentagem de incorporação de CR. Conclui-se assim que o parâmetro fundamental na absorção capilar é a relação a/l da matriz que envolve as partículas de cimento, condicionando de forma importante o desenvolvimento da microestrutura.

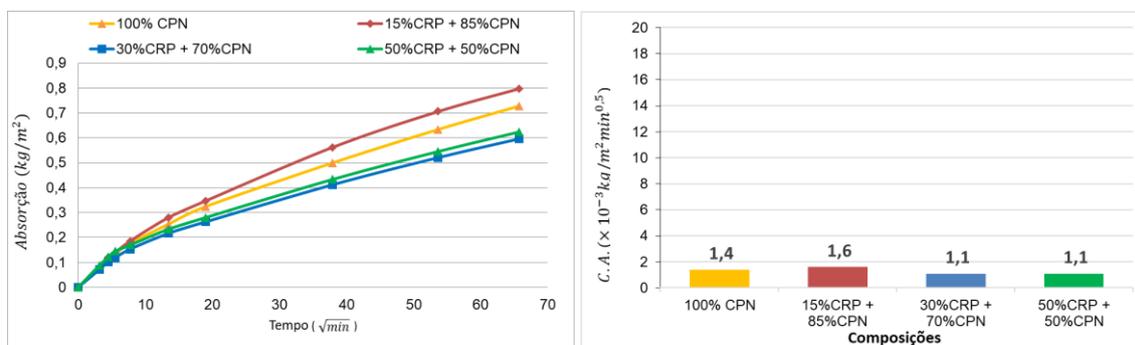


Figura 4.19 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

#### 4.4.2.4. Influência da finura do cimento reciclado

Na Figura 4.20, constata-se que o aumento de finura no CRP (CRF) não afetou significativamente o CA das argamassas ensaiadas, o que se justifica pelo facto de ambas as misturas apresentarem matrizes de idêntico a/l.

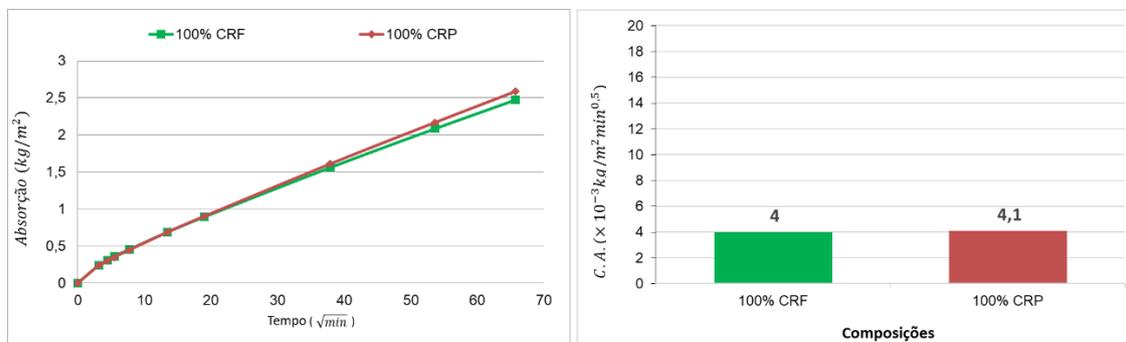


Figura 4.20 - Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP.

#### 4.4.2.5. Influência da incorporação de cinzas volantes

A influência da incorporação de Cz em argamassas com a mesma trabalhabilidade pode ser observada na Figura 4.21.

Nas misturas com CPN, a introdução de cinzas conduziu a um ligeiro aumento do CA para percentagens de incorporação superiores a 15 %. Neste caso, a reatividade mais lenta das cinzas volantes não compensou a menor relação a/l atingida na argamassa.

Nas argamassas com CRP, a incorporação de 30%Cz terá sido mais eficaz, atingindo-se CA semelhantes aos da mistura com 100%CR. Ao contrário do verificado na resistência mecânica,

a Cz teve um maior efeito de refinamento da estrutura porosa das argamassas com CRP do que com CPN. Para tal terá contribuído a maior redução atingida na relação a/l quando se introduziu Cz na argamassa de CRP.

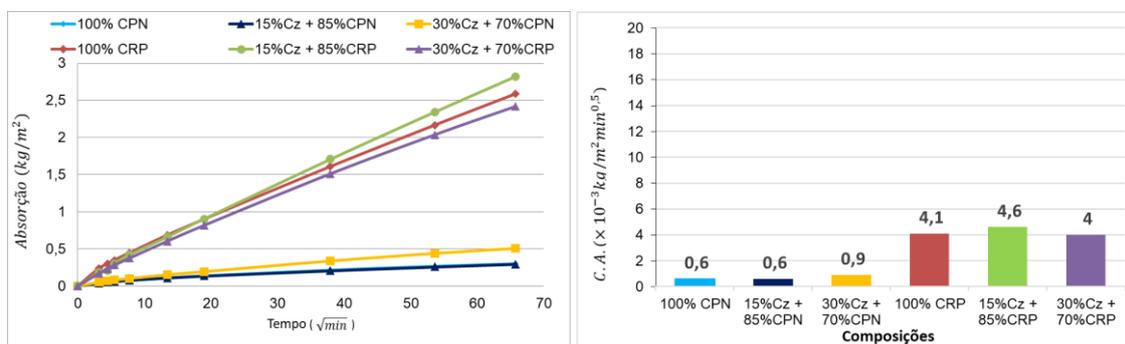


Figura 4.21 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com igual trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP, 30%CRP + 70%CRP, 100%CPN, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN.

Tendo em consideração misturas de igual a/l (0,60), a incorporação de 30% Cz conduziu a um aumento importante de CA face à argamassa com 100%CPN (Figura 4.22). Neste caso, a introdução de 30%CRP em vez de 30%Cz conduziu a CA cerca de 3 vezes inferiores para idêntica relação a/l. Ou seja, a adição de CR mostrou ser bastante mais eficaz e ativa do que a adição de Cz.

Na mistura ternária onde se procedeu à substituição adicional de 30%CPN por 30%CR, obtiveram-se CA ligeiramente inferiores, o que reforça o bom comportamento do CR em relação a esta propriedade de transporte.

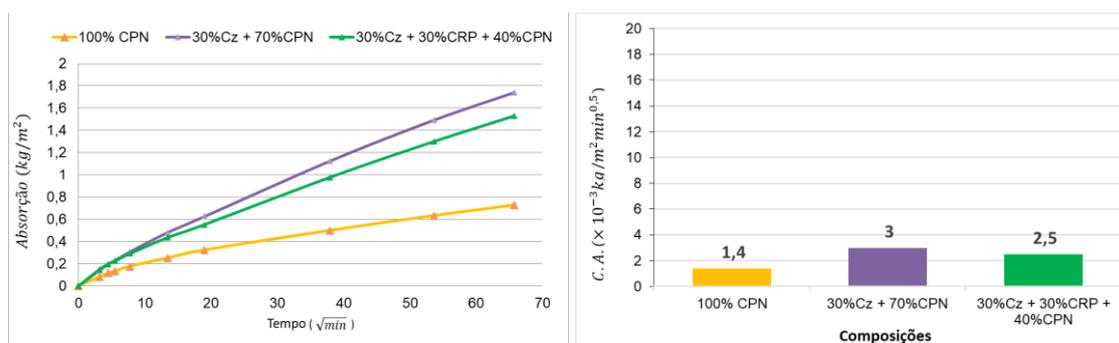


Figura 4.22 – Absorção ao longo do tempo (esquerda) e coeficiente de absorção (direita) para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN.

### 4.4.3. Retração

Na Tabela 4.5 apresentam-se os valores de retração para as idades de 3, 7, 28 e 90 dias.

*Tabela 4.5 - Resultados da retração medida nos ensaios realizados.*

Composição	a/l	$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ m/m)			
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>100%CPN</b>	0,47	-230	-455	-900	-1186
<b>100%CPNAL</b>	0,72	-219	-551	-1177	-1574
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	-399	-585	-1043	-1246
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	-189	-450	-793	-963
<b>100%CRP35AL</b>	0,90	-70	-771	-2169	-2685
<b>100%CRP35</b>	0,80	-59	-650	-1884	-2467
<b>100%CRPNT</b>	0,63	-170	-532	-1011	-1203
<b>100%CRF</b>	0,92	-331	-972	-3276	-3820
<b>100%CRB</b>	0,73	-297	-781	-2422	-2855
<b>100%CRP</b>	0,90	-368	-814	-2954	-3554
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	-115	-341	-871	-1142
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	-147	-378	-1020	-1316
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	-199	-445	-1175	-1517
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	-097	-460	-1430	-1821
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	-232	-1050	-2794	-3205
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	-193	-821	-2316	-2694
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	-282	-852	-1947	-2414
<b>100%CPN</b>	0,60	-298	-536	-1121	-1468
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	-268	-560	-1259	-1623
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	-286	-615	-1327	-1694
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	-304	-632	-1349	-1731
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	-57	-384	-740	-1003
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	-117	-681	-1268	-1605

#### 4.4.3.1. Eficiência do cimento reciclado

Na Figura 4.23 apresentam-se os valores de retração para cimentos de diferentes origens. As misturas com CPN e CRPNT apresentaram retrações mais baixas, ambas na ordem de  $1200 \times 10^{-6}$  m/m, valores na mesma ordem de grandeza aos obtidos por Ahmed (2017) para misturas semelhantes de CPN. No primeiro caso, a menor retração na argamassa com CPN justifica-se pela menor relação a/l face às restantes misturas. Por outro lado, no caso da argamassa com CRPNT, a menor retração resulta da inatividade deste ligante, que funciona como microagregado quase inerte.

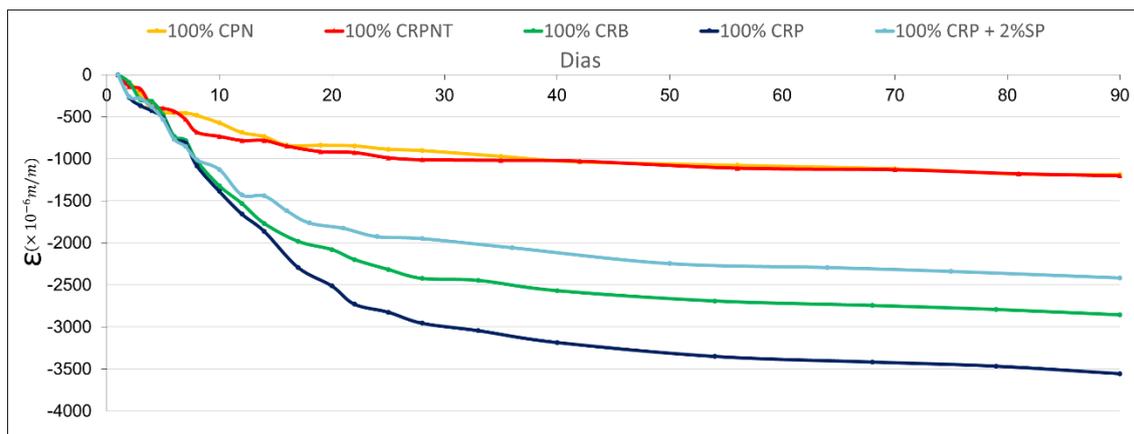


Figura 4.23 – Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRPNT, 100%CRB, 100%CRP e 100%CRP + 2%SP.

Como seria de esperar, a argamassa com CRB, associada a menor relação a/l e maior teor de agregado fino, apresentou menor retração do que a mistura com CRP devido ao menor volume de pasta associado a esta mistura. A retração por secagem na argamassa com 100%CRP foi significativa, tendo sido cerca de 3 vezes superior à da argamassa de referência com CPN, após 90 dias.

A incorporação de SP, com conseqüente redução da relação a/l, permitiu reduzir a retração em 32 %. Ainda assim, a retração foi 54 % superior à da argamassa com CPN de igual a/l. Conclui-se assim que a maior retração nas argamassas com CRP não resulta apenas de estas estarem associadas a maior exigência de água e a maior a/l, devendo estar relacionado com uma maior porosidade e menor rigidez das partículas de cimento reciclado.

#### 4.4.3.2. Influência da composição da pasta de origem

Na Figura 4.24 analisa-se a influência da pasta de origem na retração de argamassas com cimento reciclado de igual trabalhabilidade. A retração da argamassa com CRP35, de maior compactidade, foi cerca de 30 % inferior à da argamassa com CRP. Isso justifica-se pela maior rigidez das partículas CRP35 e menor relação a/l destas argamassas.

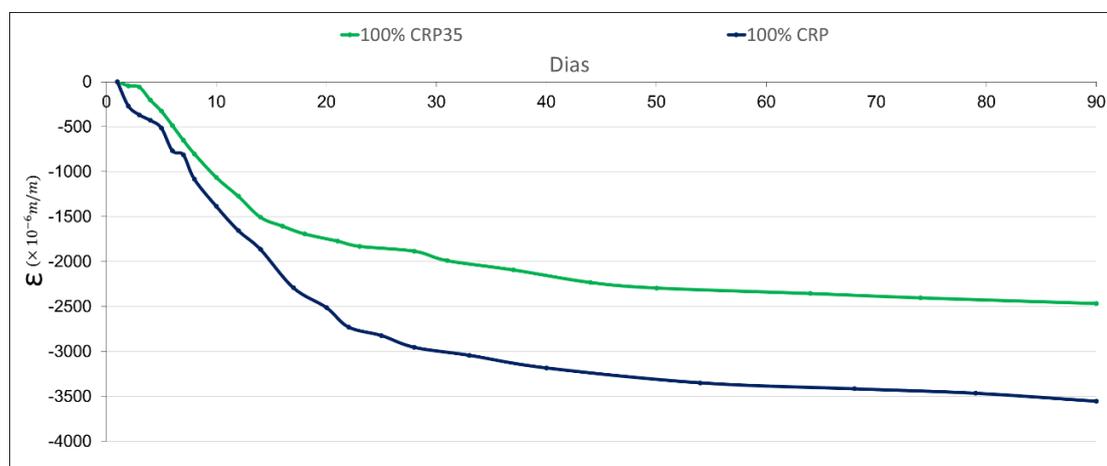


Figura 4.24 - Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRP35 e 100%CRP

Mesmo tendo em consideração argamassas de igual a/l, a retração na argamassa com CRP35 foi 24 % inferior à da mistura com CRP. Ou seja, a maior rigidez das partículas de CRP35 assume maior relevância do que a relação a/l.

#### 4.4.3.3. Influência da percentagem de cimento reciclado

Na Figura 4.25, são apresentados os resultados para argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP em substituição do CPN. Conforme esperado, tendo em conta o anteriormente referido, em geral a retração aumenta com o incremento da taxa de incorporação de CR. No entanto, esse aumento não foi muito pronunciado, verificando-se inclusivamente que, em argamassas de igual espalhamento e apenas 5 % de CRP, a retração foi inferior à da mistura de referência com 100%CPN. Constata-se ainda que durante os 3 primeiros dias, a retração foi inferior nas argamassas com até 50 % de CRP. A tendência observada não corrobora a grande diferença verificada para 100%CRP (Figura 4.25).

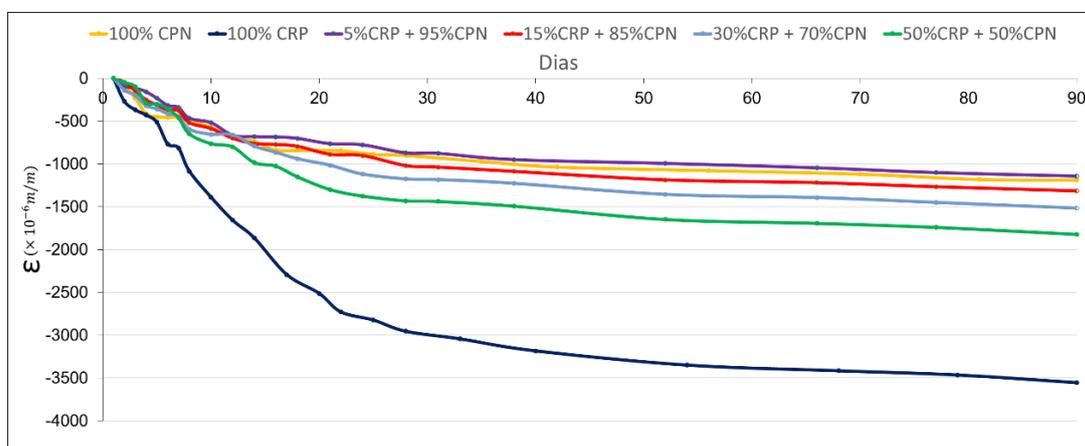


Figura 4.25 – Resultados da retração para argamassas com a mesma trabalhabilidade: 100%CPN, 100%CRP, 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

Por sua vez, tendo em consideração argamassas de igual relação a/l, é mais notória a pequena diferença de retração entre argamassas, com diferenças inferiores a 18 % para 50 % de substituição (Figura 4.26).

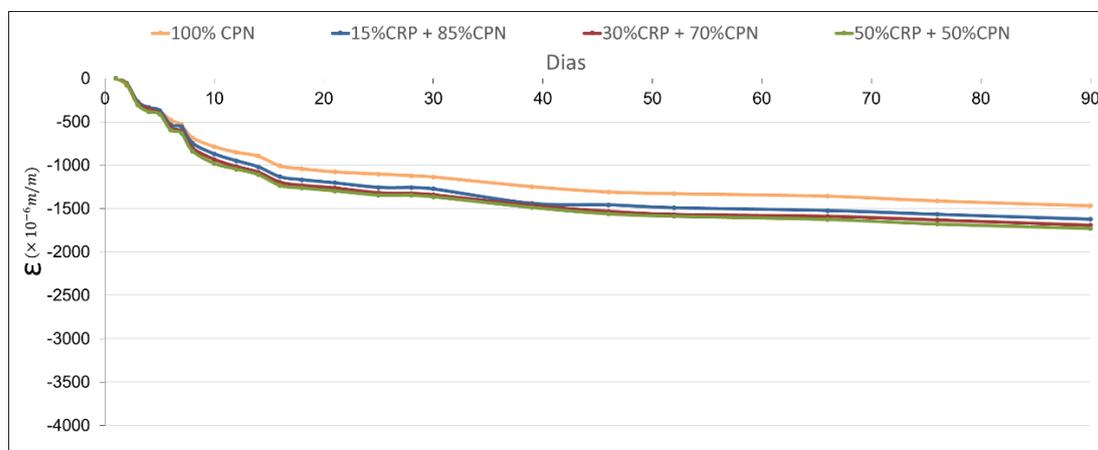


Figura 4.26 – Resultados da retração para argamassas com relação a/l de 0,60: 100%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN e 50%CRP + 50%CPN.

#### 4.4.3.4. Influência da granulometria do cimento reciclado

O aumento de finura no CRP conduziu a um ligeiro aumento de retração aos 90 dias de idade, de 7,5 % (Figura 4.27). Para a mesma relação a/l e volume de poros, a maior finura do CR conduz a maior reatividade e refinamento da porosidade, promovendo uma maior ação capilar.

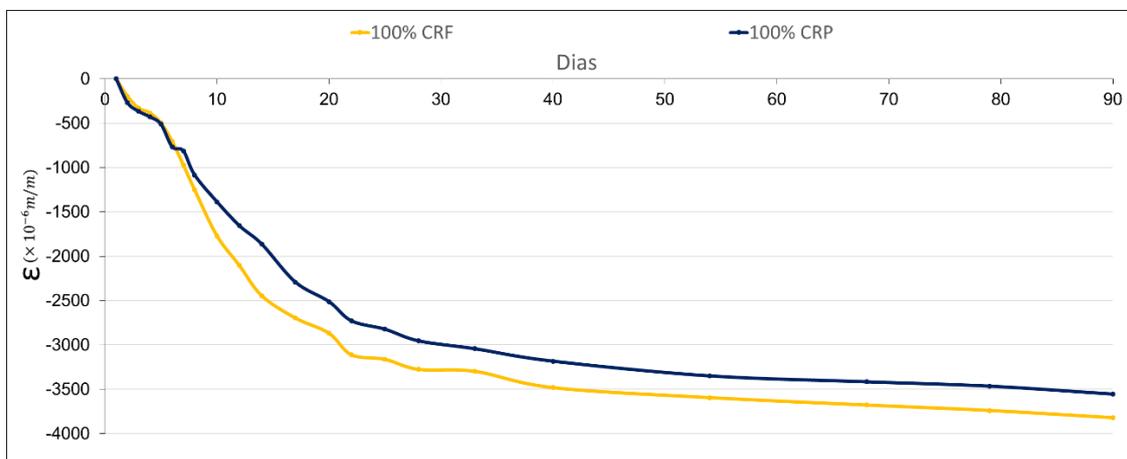


Figura 4.27 - Resultados da retração para misturas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRF e 100%CRP.

#### 4.4.3.5. Influência da incorporação de cinzas volantes

A introdução de cinzas volantes promoveu uma redução de retração nas argamassas com CPN e CRP (Figura 4.28), em parte devido à diminuição na relação a/l e na quantidade de água evaporável.

Principalmente, durante as primeiras idades em que a cinza volante tem menos catividade, esta funciona como microagregado, não contribuindo como fonte de retração para a argamassa. Ou seja, a mistura funciona como se tivesse menos teor de pasta, o que conduz a menor retração. Isso é tanto mais importante quanto maior for o teor de Cz.

Tendo em consideração os vários resultados obtidos, conclui-se que incorporações até 30%Cz, em misturas primárias ou trenarias, o aumento de retração não é muito significativo (<25 %).

Observa-se uma maior influência das cinzas volantes em misturas com CRP em comparação com o CPN, apresentando uma redução da retração em 10 e 25 % para incorporações de 15 e 30 %, respetivamente.

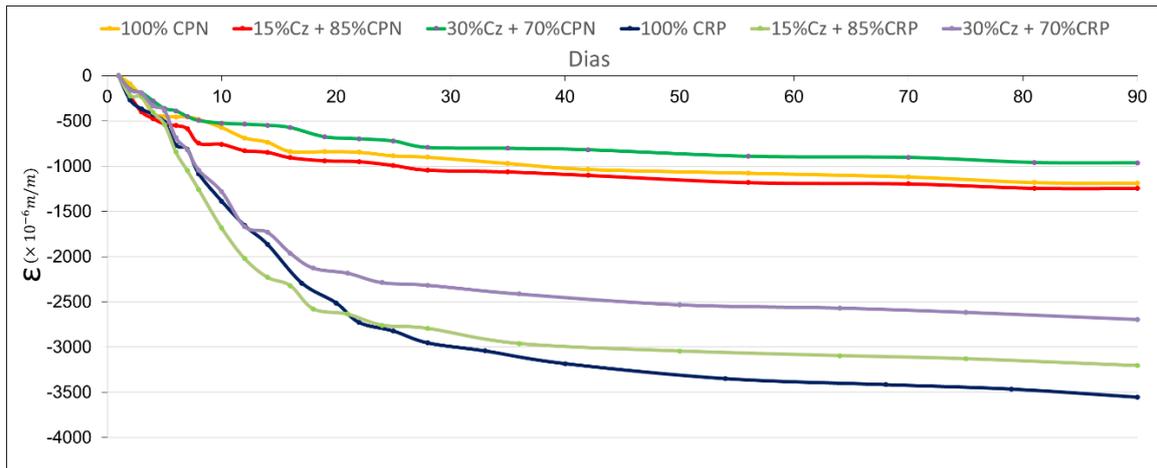


Figura 4.28 - Resultados da retração para misturas com a mesma trabalhabilidade: 100%CRP, 15%Cz + 85%CRP, 30%Cz + 70%CRP, 100%CPN, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN.

## 5. Conclusões

No presente capítulo apresentam-se as principais conclusões referentes à campanha experimental descrita no capítulo 3 e cujos resultados são analisados no capítulo 4.

Este trabalho incidiu essencialmente na caracterização de argamassas produzidas com cimento reciclado (CR) proveniente de resíduos de pastas e betões de composição conhecida, CRP e CRB, respetivamente, avaliando-se as suas características mecânicas e, sobretudo, o seu comportamento em termos de retração e absorção capilar. Para uma melhor compreensão do potencial destes cimentos foram comparadas as propriedades de argamassas com diferentes incorporações de CR, grau de finura e material de origem. Ao contrário do que é comum efetuar neste tipo de trabalhos, destaca-se também a consideração de CR proveniente de resíduos de betão, após de introduzir um método de separação inovador desenvolvido no IST. Analisou-se ainda a interação entre os novos CR e cinzas volantes (Cz), de modo a aferir a ação sinérgica destes materiais.

O presente estudo deu seguimento aos trabalhos que se têm desenvolvido no IST e que visam a produção de um cimento eco-eficiente com baixas emissões de CO<sub>2</sub>, bem como o reaproveitamento de materiais em fim de vida como os RCD, promovendo uma menor exploração de recursos naturais e um menor volume de resíduos depositados em aterro.

### 5.1. Conclusões finais

O cimento reciclado é um produto resultante de vários processos, mecânicos e térmicos, aplicados a resíduos de materiais cimentícios, como pastas e betões, que visam a recuperação das suas propriedades ligantes. Após a produção inicial de pastas e betões, estes foram deixados em condições de cura em ambiente exterior durante 120 dias, após os quais se iniciaram os processos de moagem. Foram então realizadas diversas operações, recorrendo a um conjunto diversificado de equipamentos laboratoriais existentes nos laboratórios do IST (LC e GEOLAB), com vista à obtenção de produtos com granulometria o mais fina possível: britadeira de maxilas, moinho de rolos e moinho de bolas. Este material foi posteriormente peneirado em duas frações de diferente granulometria, <250 µm (CRP) e <125 µm (CRF). O cimento proveniente de resíduos de betão, CRB, foi ainda sujeito a um processo de separação inovador desenvolvido no IST, com o objetivo de separar a matriz cimentícia dos agregados presentes no betão. Com este processo, conseguiu-se reduzir a quantidade inicial de agregados para apenas 24 % da sua composição. Num estudo mais abrangente, foram ainda consideradas pastas com diferentes relações água/ligante (a/l), ou seja, diferentes níveis de hidratação inicial, denominadas por CRP e CRP35, para relações a/l de 0,55 e 0,35, respetivamente. No presente trabalho foi considerado CR termoativado a 700 °C.

As análises termogravimétricas (TG) e de difração de raios-X (DRX) revelaram que para temperaturas de termoativação a 700 °C, são obtidos compostos anidros de características similares aos do cimento Portland, nomeadamente com a presença na sua composição de

silicatos bicálcicos,  $C_2S$ . Verifica-se que os CR são mais sensíveis a processos de pré-hidratação durante o armazenamento, reidratando grande parte da cal livre existente na sua composição.

Após a reativação térmica dos produtos cimentícios resultantes da moagem, foram produzidas argamassas com diferentes composições com o intuito de avaliar não só o desempenho destes cimentos, mas também a sua interação com o cimento Portland corrente e com um tipo de adição pozolânica, cinzas volantes. Inicialmente, produziram-se misturas com consistência plástica, estando o valor do seu espalhamento compreendido entre 140-150 mm. Posteriormente, produziram-se argamassas com a mesma relação a/l (0,60), avaliando-se as propriedades das argamassas para iguais níveis de hidratação.

Confirmou-se uma maior exigência de água dos CR face ao CPN, resultante da sua maior porosidade e superfície específica. Em argamassas de igual espalhamento, com apenas CRP, foi necessário um aumento de 83 % de água da mistura em comparação com o CPN, tornando-se um dos maiores obstáculos à utilização de CR. No entanto, para percentagens de substituição de até 30 %, o aumento de exigência de água foi inferior a 25 % e para 5 % de substituição não ocorreram alterações significativas. Para a mesma relação a/l, a incorporação de 50%CRP reduziu a trabalhabilidade em 45 %. O uso de superplastificante (SP) na mistura com CRP permitiu uma redução da água na amassadura de 20 %, para a mesma trabalhabilidade, sendo que este revelou maior eficiência para misturas com CPN do que em misturas com CRP.

A consideração de CR de granulometria mais fina (FRC) conduziu a um ligeiro aumento da exigência de água, justificado pela sua maior área superficial e maior reatividade. As argamassas com CRB apresentaram menor exigência de água (19 %) devido à presença de agregados finos na sua composição, concluindo-se que este contribui favoravelmente para a sua trabalhabilidade.

As misturas produzidas com CR proveniente de pastas mais compactas (CRP35), associadas a menor porosidade e menor nível de hidratação, revelaram menor exigência de água.

A incorporação de cinzas volantes, permitiu aumentar a trabalhabilidade das misturas com CR, e de forma mais eficiente do que nas argamassas com CPN. Conclui-se que devido à sua geometria esférica e maior finura, as cinzas funcionam como lubrificante, impedindo a aglomeração do CR.

Devido à menor massa volúmica e maior exigência de água do CR, as argamassas com CR tendem a apresentar menor massa volúmica do que as com CPN. Essas diferenças são reduzidas quando se considera CR proveniente do betão (CRB).

A incorporação de adições pozolânicas, como cinzas volantes, ajudaram a aumentar a compacidade das misturas, verificando-se um ligeiro aumento da massa volúmica.

A resistência mecânica das argamassas produzidas com CR foi significativamente superior à das argamassas com cimento não termoativado, demonstrando-se a eficiência do processo de termoativação. Tendo em conta argamassas de igual trabalhabilidade, a incorporação de 100%CRB conduziu a resistências aos 28 dias 74 e 79 % inferiores às das argamassas de CPN,

de menor a/l, respetivamente. A contaminação de CRB por agregado fino conduziu a uma redução de 22 % na resistência à compressão face ao CRP. No entanto, verifica-se um maior ganho de resistência inicial nas argamassas com CR face ao CPN, estando este fenómeno associado a uma maior reatividade destes novos cimentos, conferida pela sua maior área superficial.

Em argamassas de idêntico a/l, a incorporação de 100%CRP conduziu a resistências apenas 23 % inferiores face às argamassas de referência com CPN. Estima-se que a resistência das argamassas de CRP para relação a/l de 0,50 possa atingir cerca de 43 MPa, equiparando-se a um CPN de classe de resistência 32,5.

Para idêntica trabalhabilidade, a consideração de CRP35 permitiu aumentar a resistência em até 17 % face à argamassa com CRP, associada a maior a/l.

Confirma-se uma redução proporcional da resistência mecânica com o aumento da percentagem de substituição de CPN por CR. Para idêntica trabalhabilidade, a perda de resistência foi de até 40 % para até 50 % de substituição. Ainda assim, a mistura ligante atingida permitiu classes de resistência superiores a 32,5. Estas diferenças são menores em idades mais jovens, até 3 dias de idade. Para misturas com a mesma relação a/l (0,60), as diferenças de resistência observadas foram menores, concluindo-se que até 15 % de incorporação não se verificam perdas significativas de resistência mecânica.

A redução de finura do CR permitiu aumentar ligeiramente a resistência mecânica até aos 28 dias de idade.

A utilização de Cz nas misturas produzidas com a mesma trabalhabilidade revelou efeitos semelhantes para misturas com CRP e CPN, observando-se que ambas aumentaram a resistência a longo prazo. Para idades jovens o comportamento destas adições pode ser comparado ao de microagregados, atuando apenas por efeito de fíler. Nas misturas com CPN, a incorporação de Cz foi menos eficiente no aumento da resistência a longo prazo.

Em misturas com CRP, a adição de 30%Cz permitiu um aumento da resistência à compressão de 19 % aos 90 dias, sendo que para isso contribuiu a redução em 17 % atingida na relação a/l. Conclui-se também que, para incorporações de 30 %, a adição de CRP em misturas com CPN foi mais eficiente do que a adição de Cz, pelo menos até aos 90 dias de idade. Até aos 28 dias de idade o incremento de resistência foi cerca de 50 % superior ao proporcionado pelas Cz, concluindo-se que o CR é uma adição mais ativa e de maior potencial.

As argamassas com CR revelaram maior absorção e coeficiente de absorção (CA) do que as argamassas de CPN. Para igual trabalhabilidade, o CA foi 7 vezes superior ao obtido para misturas com CPN. Este facto pode ser explicado pelo valor quase 2 vezes superior da relação a/l nas misturas com CRP, que se apresenta como o parâmetro mais condicionante desta propriedade de transporte. No entanto, para idêntica relação a/l verifica-se que as misturas com CRP foram capazes de apresentar menor CA do que as argamassas com CPN. Isso justifica-se

pelo facto de as misturas com CR desenvolverem microestruturas mais densas entre partículas anidras. De facto, constata-se que apesar da porosidade global ser semelhante nas argamassas com CR e CPN, esta apresenta-se mais refinada nas misturas com cimento reciclado.

Sugeriu-se um novo esquema para o desenvolvimento da estrutura porosa nas pastas com CR, em que se distinguem duas fases bem distintas associadas à porosidade interior das partículas do CR e ao espaço exterior entre partículas. Desse modo, conclui-se que não existe relação entre a resistência mecânica e a absorção nas argamassas com CR.

O CRB revelou um CA semelhante ao do CRP, mesmo com uma relação a/l mais baixa, o que faria prever uma absorção também mais baixa. Isso é explicado pelo facto de, devido à presença de agregados finos na sua composição (24 %), as argamassas com CRP e CRB apresentarem idêntico a/l efetivo.

Para pastas com diferentes níveis de hidratação inicial, CRP e CRP35, obtiveram-se coeficientes de absorção semelhantes, mesmo para relações a/l distintas, de 0,80 e 0,90, respetivamente. Este facto é justificado pela menor porosidade do CRP35, absorvendo menores quantidades de água no seus poros interiores, o que conduz a uma maior relação a/l no exterior das partículas.

Em argamassas de idêntica trabalhabilidade, confirma-se o aumento da absorção e do CA com o aumento da substituição de CPN por CR. No entanto, para iguais relações a/l, existe uma redução da absorção com o aumento do incremento de CR, enfatizando a importância da absorção interna de água pelas partículas de CR. Conclui-se que a relação a/l da matriz entre as partículas anidras de cimento é o parâmetro fundamental da absorção capilar.

Não foram encontradas diferenças significativas nos valores de absorção e CA para misturas de granulometria mais fina.

Em misturas de igual trabalhabilidade, enquanto a incorporação de 15%Cz fez aumentar o CA nas argamassas com CPN, nas misturas com CRP a incorporação destes adições em 30% permitiu atingir valores semelhantes aos obtidos para o CRP sem adições. Para tal, contribuiu a redução atingida na relação a/l após a incorporação de Cz.

Considerando misturas de igual relação a/l (0,60), verifica-se que a incorporação de 30%CRP conduz a CA cerca de 4 vezes inferiores aos das argamassas com idêntico teor de Cz, demonstrando-se a maior eficiência do CR como material de adição.

Em misturas com a mesma trabalhabilidade, observaram-se retrações mais baixas nas argamassas com CRP não tratado, CRPNT, e CPN. Este facto deve-se à baixa relação a/l da mistura com CPN e à fraca atividade da mistura com CRPNT.

Como era de esperar, a mistura com CRB revelou menores valores de retração em comparação com a mistura de CRP, o que se justifica pela menor relação a/l e maior teor de agregado fino existente nos resíduos provenientes de betão (CRB).

Em face da elevada relação a/l, a retração após 90 dias nas argamassas com CRP foi cerca de 3 vezes superior à da argamassa com CPN. Ainda assim, mesmo tendo em consideração argamassas de igual a/l, a retração nas argamassas com CRP foi 54 % mais elevada, o que deverá estar relacionado com a maior porosidade e menor rigidez das partículas de CR. Por esse motivo, as argamassas com CRP35, associadas a partículas menos porosas, apresentaram retrações 30 % menores do que com CRP.

Verificou-se um aumento natural da retração com o incremento da percentagem de substituição de CPN por CRP, devido ao aumento da relação a/l e à presença de partículas menos rígidas e mais porosas. Para misturas com o mesmo a/l, as diferenças não foram tão significativas, com uma diferença de apenas 18 % aos 90 dias para 50 % de substituição de CPN por CRP. Para 5% de substituição a relação foi inclusivamente mais baixa nas argamassas com CR.

A granulometria mais fina do FRP fez aumentar a retração em 7,5 %, sendo este facto explicado pelo ligeiro aumento da relação a/l e pela maior reatividade das partículas de FRC em comparação com o CRP.

O incremento de cinzas, para misturas com a mesma trabalhabilidade, reduziu a retração das argamassas com CPN e CRP devido à redução introduzida na relação a/l e, consequentemente, na água evaporável presente nas misturas. Conclui-se também que o efeito pozolânico das cinzas teve maior influência no CR em comparação com o CPN, apresentando uma redução de retração de 10 e 25 % para misturas com 15 e 30 % de incorporação, respetivamente.

## 5.2. Desenvolvimentos futuros

Com a realização deste trabalho foi possível aprofundar os conhecimentos sobre algumas propriedades e características dos cimentos reciclados, sendo que este tema ainda apresenta alguma ambiguidade nos resultados obtidos por vários autores devido a sua complexidade de análise. Assim, sugerem-se estudos mais aprofundados nesta matéria devido ao grande potencial futuro dos eco-cimentos, entre eles:

- Soluções para o problema da maior necessidade de água, reduzido tempo de presa e elevado calor de hidratação dos cimentos reciclados;
- Aprofundamento das características de durabilidade de argamassas com cimento reciclado;
- Análise de características no estado fresco e endurecido e de durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado;
- Otimização dos processos de separação de pasta e agregados existentes nos RCD;
- Análise de vida útil e de ciclo de vida de produtos com cimento reciclado;
- Aplicação de produtos cimentícios reciclados em pastas, argamassas e betões em condições reais como ligante principal ou material de adição.



## 6. Referencias bibliográficas

- A116130 - Bogas, J.A., Pereira, M.F.C., Guedes, A.M., Carriço, A., Hu, S., Sousa, R. (2020). "Processo de separação dos componentes de resíduos de betão endurecido para obtenção de cimento reciclado". Application No. 116130, priority date 24/02/2020
- ACI232R-03 (2003). Use of Fly Ash in Concrete. American Concrete Institute
- ACI Committee 116 (2000). 116R-90: Cement and Concrete Terminology. *American Concrete Institute*, 58. [http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI\\_116R-00\\_Cement\\_and\\_Concrete\\_Terminology\\_MyCivil.ir.pdf](http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI_116R-00_Cement_and_Concrete_Terminology_MyCivil.ir.pdf)
- Ahmed, H. H. (2017). Dissertação - Cementitious composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Portugal
- Ahn, J. W., Kim, H. S., & Han, G. C. (2001). Recovery of aggregates from waste concrete by heating and grinding. *Geosystem Engineering*, 117–122. <https://doi.org/10.1080/12269328.2001.10541178>
- Aïtcin, P. C., & Flatt, R. J. (2015). Science and technology of concrete admixtures. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00150-2>
- Aitcin, P. C., Neville, A. M., & Acker, P. (1997). Integrated view of shrinkage deformation. *Concrete International*, 35-41
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Zhang, M. H., Tam, C. T., & Foo, T. W. J. (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 3469–3479 Contents. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038>
- Alonso, C., & Fernandez, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>
- 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*, 222-229
- Arandigoyen, M., Bernal, J. L. P., López, M. A. B., & Alvarez, J. I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 1449–1459. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145>
- Baldusco, T. S., Nobre, S.C., Angulo, V.A. (2017). Quarcioni, Reatividade e resistência mecânica de pastas reidratadas de cimento de alto forno, Encontro Nac. Sobre Aproveitamento Resíduos Na Construção, Fortaleza
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2005). Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. <https://doi.org/10.1002/3527603379>

Bogas, J. A. (2011). Dissertação - Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal

Bogas, J.A. (2019). Shrinkage by digital image correlation and hydration of recycled cements. Report of the program “Movilidad de profesorado português” for the Fundación Carolina. EcoHydB/R6, 67

Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>

Bogas, J. A., De Brito, J., & Ramos, D. (2016). Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>

Burange, L. G., & Yamini, S. (2009). Performance of the Indian Cement Industry: The Competitive Landscape. *Artha Vijnana: Journal of The Gokhale Institute of Politics and Economics*, 209-242. <https://doi.org/10.21648/arthavij/2009/v51/i3/115389>

Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. In *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>

CEMBUREAU (2017). Key Facts and Figures about Cement. The European Cement Association, Brussels

Coutinho, A. S. (1988). Fabrico e Propriedades do Betão - Volume I, LNEC, Lisboa

Coutinho, A. S., Gonçalves, A. (1994). Fabrico e Propriedades do Betão – Volume 3, LNEC, Lisboa

Crook, D. N., & Murray, M. J. (1970). Regain of strength after firing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 327–431. <https://doi.org/10.1680/mac.1970.22.72.149>

Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., McCarthy, M. J., & Chaipanich, A. (2007). Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 459–473. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9143-7>

Directiva 2009/29/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (2009). Jornal Oficial da União Europeia

EC (2000). Matérias-primas críticas para a EU. Relatório do Grupo de Trabalho Ad-hoc na definição de matérias – primas críticas. European Comission

EN 1015-2 (1998): Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars

EN 1015-18 (2002): Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water-absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar

EN 12617-4 (2002): Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of shrinkage and expansion

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*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.012>

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. *Cement and Concrete Research*, 1489–1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>

Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. In *Cement and Concrete Research*, 126–142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>

Gouveia, M. F. (2019). Dissertação - Incorporação de adições em argamassas produzidas com cimento reciclado, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal

Guedes, T. C. (2019). Dissertação - Avaliação do ciclo de vida na produção de cimento reciclado, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal

Gursel, A.P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>

Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., & Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*, 820–826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.031>

Hammer, T. A. 2003. Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete.” Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on SelfCompacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 553–557

Hu, S. (2019). Dissertação - Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal

Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. In *International Journal of Sustainable Built Environment*, 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>

Ishak, S. A., & Hashim, H. (2015). Low carbon measures for cement plant - A review. In *Journal of Cleaner Production*, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.003>

Jacoby, P. C., & Pelisser, F. (2015). Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>

- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>
- LNEC E 64 (1979): Cimentos. Determinação da massa volúmica
- Linnu, L., He, Y., & Hu, S. (2009). Binding materials of dehydrated phases of waste hardened cement paste and pozzolanic admixture. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 140–144. <https://doi.org/10.1007/s11595-009-1140-6>
- Ma, X., Han, Z., & Li, X. (2010). Reactivity of dehydrated cement paste from waste concrete subjected to heat treatment. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 175-180
- Malek, K., Odijk, T., & Coppens, M. O. (2005). Diffusion of water and sodium counter-ions in nanopores of a  $\beta$ -lactoglobulin crystal: A molecular dynamics study. *Nanotechnology*. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/7/029>
- Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 130–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>
- Mehta, P. & Monteiro, P. (1994). *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*, São Paulo
- Mindess, S., Darwin, D., & Young, J. F. (2003). *Concrete 2nd Edition. Technical Documents*, 547-562
- Molion, L.B. (2008). AQUECIMENTO GLOBAL: UMA VISÃO CRÍTICA. *Revista Brasileira de Climatologia*, 7–24. <https://doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25404>
- Monteagudo, S. M., Moragues, A., Gálvez, J. C., Casati, M. J., & Reyes, E. (2014). The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. *Thermochimica Acta*, 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>
- Neto, G. C. (2019). *Dissertação – Argamassas com Resíduos de Matérias Cimentícias de Diferentes Finuras*, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal
- Neville, A. (2012). *Properties of Concrete - 5th Edition*. In *Pearson Education Limited*.
- NP EN 450-1 (2012): Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade

NP EN 196-1 (2006): Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas

NP EN 196-2 (2006): Métodos de ensaio de cimentos - Parte 2: Análise química dos cimentos

NP EN 196-3 (2005): Métodos de ensaio de cimentos - Parte 3: Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade

NP EN 196-6 (2010): Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: Determinação da finura

NP EN 451-1 (2006): Métodos de ensaio das cinzas volantes - Parte 1: Determinação do teor de óxido de cálcio livre

NP EN 450-1 (2012): Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade

NP EN 933-1 (2014): Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração

NP EN 933-4 (2008): Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma

NP EN 1015-3 (2006): Métodos de ensaio de argamassas – Parte 3: Determinação da consistência pelo método da mesa de espalhamento

NP EN 1015-6 (2006): Métodos de ensaio de argamassas – Parte 6: Determinação da massa volúmica

NP EN 1015-11 (2006): Métodos de ensaio de argamassas – Parte 11: Determinação da resistência a flexão e da resistência a compressão em argamassas

NP EN 1097-3 (2002): Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios

NP EN 1097-6 (2016): Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água

NP EN 12350-2 (2009): Ensaio do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento

NP EN 12350-6 (2009): Ensaio do betão fresco - Parte 6: Massa volúmica

NP EN 12390-3 (2011): Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes

NP EN 12620 (2003): Agregados para betão

OECD (2009). World Business Council for Sustainable Development, Cement Technology Roadmap

- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J. A., & John, V. M. (2013). Eco-Efficient Concrete. In *Eco-Efficient Concrete*, 577-595. <https://doi.org/10.1533/9780857098993>
- Páscoa, L. (2012). Dissertação - Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Portugal
- Pereira, T. A. (2008). Dissertação - Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Portugal
- Poon, C. S., & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>
- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. (2015). Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. In *Fuel*, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.029>
- Real, S., Carriço, A., Bogas J.A. (2019). Production of source materials. Report EcoHydB/R1, DTC nº12/2019, CERIS, Lisbon, Portugal
- Real, S., Carriço, A., Bogas, J.A. (2019). Production of thermo-activated recycled cement. Report EcoHydB/R5, DTC nº12/2019, CERIS, Lisbon, Portugal
- 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*, 3937, <https://doi.org/10.3390/ma13183937>
- Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. In *European Commission*. <https://doi.org/10.2788/12850>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2013). Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cement and Concrete Composites*, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. In *Journal of Cleaner Production*, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Shigeishi, M. (2017). Separation and collection of coarse aggregate from waste concrete by electric pulsed power. *AIP Conference Proceedings*, 1–10. <https://doi.org/10.1063/1.5003560>

- Shui, Z., Lu, J., Tian, S., Shen, P., & Ding, S. (2014). Preparation of new cementitious system using fly ash and dehydrated autoclaved aerated concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 726–732. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0987-3>
- 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*, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Singh, M. (2018). Coal bottom ash. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, 3–50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00001-8>
- Sjølie, H. K. (2012). Reducing greenhouse gas emissions from households and industry by the use of charcoal from sawmill residues in Tanzania. *Journal of Cleaner Production*, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.008>
- Splittgerber, F., & Mueller, A. (2003). Inversion of the Cement Hydration As a New Method for Identification and / or Recycling? *11th International Congress on the Chemistry of Cement*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>
- Usón, A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Llera Sastresa, E. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 242–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>
- Veiga, M.R.; Souza, R.H. (2004). Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem. Universidade do Minho, Revista nº 20, 45-56.
- Volkart, K., Bauer, C., & Boulet, C. (2013). Life cycle assessment of carbon capture and storage in power generation and industry in Europe. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.03.003>
- Vyšvařil, M., Bayer, P., Chromá, M., & Rovnaníková, P. (2014). Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>
- Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- Xu, J. H., Fleiter, T., Fan, Y., & Eichhammer, W. (2014). CO<sub>2</sub> emissions reduction potential in China's cement industry compared to IEA's Cement Technology Roadmap up to 2050. *Applied Energy*, 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.004>
- Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2011). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and Materials*, 481–490. <https://doi.org/10.1002/fam.1067>

Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>

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*, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>

## Anexos



## A1. Análise TG

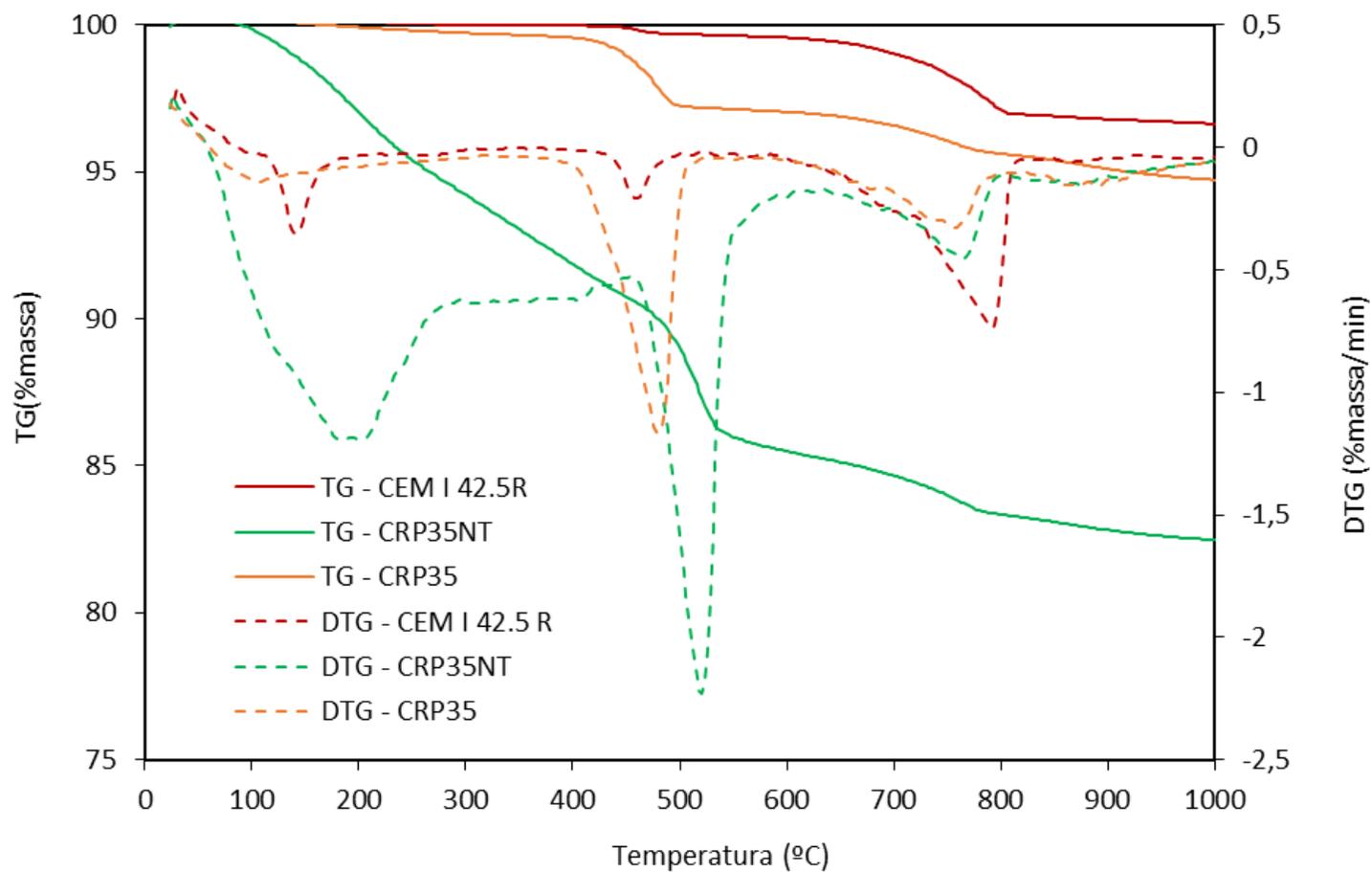


Figura A1.1 - Análises TG e DTG realizadas ao CPN, cimento reciclado não termoativado, CRP35NT, e cimento termoativado a 700°C, CRP35.

## A2. Composição das misturas

Tabela A2.1 – Composição das misturas produzidas na campanha experimental, por litro.

Composição	a/l	CPN (%)	CRP (%)	Cz (%)	CPN (g)	CR (g)	Cz (g)	AF (g)	AG (g)	Água (g)
<b>100% CPN</b>	0,47	100	-	-	488,1	-	-	512,5	951,7	229,4
<b>100% CPNAL</b>	0,72	100	-	-	432,5	-	-	454,1	843,4	311,4
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	85	-	15	417,7	-	73,7	516,0	958,2	216,2
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	70	-	30	344,5	-	147,4	516,8	959,8	206,7
<b>100% CRP35AL</b>	0,90	-	100	-	-	391,9	-	411,5	764,2	352,7
<b>100% CRP35</b>	0,80	-	100	-	-	408,7	-	429,2	797,0	327,0
<b>100% CRPNT</b>	0,63	-	100	-	-	441,0	-	463,0	859,9	277,8
<b>100% CRF</b>	0,92	-	100	-	-	388,7	-	408,1	757,9	357,6
<b>100% CRB</b>	0,73	-	100	-	-	421,4	-	442,5	821,8	307,6
<b>100% CRP</b>	0,90	-	100	-	-	391,9	-	411,5	764,2	352,7
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	95	5	-	463,1	24,4	-	511,8	950,6	229,1
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	85	15	-	397,1	70,1	-	490,5	910,9	256,9
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	70	30	-	321,1	137,6	-	481,7	894,6	266,1
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	50	50	-	221,9	221,9	-	466,1	865,5	284,1
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	-	85	15	-	338,7	59,8	418,4	777,1	338,7
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	-	70	30	-	289,9	124,3	434,9	807,7	310,7
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	-	100	-	-	423,3	-	444,5	825,5	304,8
<b>100% CPN</b>	0,60	100	-	-	457,5	0,0	-	480,4	892,2	274,5
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	85	15	-	387,6	68,4	-	478,7	889,1	273,6
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	70	30	-	318,1	136,3	-	477,1	886,0	272,6
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	50	50	-	226,2	226,2	-	474,9	882,0	271,4
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	70	-	30	315,2	0,0	135,1	472,7	877,9	270,1
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	40	30	30	180,0	310,2	133,0	465,4	864,2	265,9

### A3. Resistências mecânicas à compressão e flexão

Tabela A3.1 – Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respetivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CPN, 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias							
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)
100% CPN	0,47	593,9	2,555			65,31	40,82			590,7	2,555			80,35	50,22		
						66,43	41,52							80,86	50,54		
		590,6	2,404	5,8	2,5	67,38	42,11	42,4	4,0	587,6	2,266	5,6	5,5	75,91	47,44	50,2	3,9
						72,41	45,26								76,89	48,06	
100% CPNAL	0,72	586,6	2,459			70,37	43,98			583,9	2,296			83,88	52,43		
						65,03	40,64							84,18	52,61		
		588,1	2,255			43,04	26,90			578,4	2,411			48,50	30,31		
						43,08	26,93								48,31	30,19	
15%Cz + 85%CPN	0,44	594,7	2,261	5,3	0,4	33,43	20,89	22,9	12,6	568,5	2,358	5,8	5,6	49,99	31,24	31,0	1,7
						32,46	20,29							50,36	31,48		
		604,6	2,242			34,48	21,55			582,5	2,674			49,80	31,13		
						33,06	20,66								50,41	31,51	
30%Cz + 70%CPN	0,42	589,6	2,377			65,77	41,11			591,3	2,655			63,95	39,97		
						61,87	38,67							66,48	41,55		
		588,7	2,490	5,8	3,2	62,53	39,08	40,0	3,7	588,0	2,829	6,2	6,1	75,04	46,90	43,0	6,0
						65,33	40,83							-	-		
30%Cz + 70%CPN	0,42	586,6	2,573			67,79	42,37			592,8	2,433			-	-		
						61,15	38,22							69,55	43,47		
		583,6	2,223			49,91	31,19			588,9	2,386			64,53	40,33		
						52,17	32,61							59,36	37,10		
30%Cz + 70%CPN	0,42	584,3	2,104	5,0	3,5	52,99	33,12	31,2	7,0	592,8	2,342	5,6	1,6	56,11	35,07	36,3	6,2
						53,01	33,13							52,53	32,83		
		590,8	2,045			48,32	30,20			583,3	2,436			57,47	35,92		
						43,02	26,89							58,16	36,35		

Tabela A3.1 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CPN, 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CPN e 30%Cz + 70%CPN, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias							
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)
100% CPN	0,47	588,8	2,956	6,9	2,8	93,04	58,15	58,3	1,1	590,7	3,478	7,8	4,1	97,45	60,91	60,6	2,6
						91,87	57,42							96,49	60,31		
		590,3	3,069			92,92	58,08			596,9	3,144			96,88	60,55		
						94,82	59,26							92,15	57,59		
		582,1	2,866			94,27	58,92			591,1	3,322			98,05	61,28		
						92,38	57,74							100,59	62,87		
100% CPNAL	0,72	609,0	2,903	7,2	4,5	54,07	33,79	36,9	9,2	581,5	3,278	7,6	3,2	55,53	34,71	38,3	14,4
						55,38	34,61							57,93	36,21		
		610,6	3,085			64,84	40,53			608,1	3,077			54,25	33,91		
						68,13	42,58							52,86	33,04		
		605,9	3,241			55,51	34,69			578,5	3,310			72,84	45,53		
						56,07	35,04							74,39	46,49		
15%Cz + 85%CPN	0,44	593,3	3,025	7,1	0,8	98,01	61,26	57,5	3,9	592,8	3,711	8,8	1,4	108,84	68,03	67,3	4,1
						95,56	59,73							99,68	62,30		
		590,8	3,008			88,31	55,19			591,1	3,750			114,38	71,49		
						89,4	55,88							108,47	67,79		
		594,4	3,067			91,87	57,42			592,6	3,840			108,78	67,99		
						88,93	55,58							106,04	66,28		
30%Cz + 70%CPN	0,42	592,5	3,116	6,6	8,4	87,20	54,50	50,5	6,0	584,3	3,341	8,0	3,7	86,95	54,34	57,2	5,8
						82,17	51,36							91,11	56,94		
		585,9	2,797			81,23	50,77			595,3	3,589			97,21	60,76		
						70,91	44,32							100,22	62,64		
		584,6	2,535			81,82	51,14			594,7	3,301			86,90	54,31		
						81,17	50,73							87,10	54,44		

Tabela A2.3 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP35AL, 100% CRP35, 100% CRPNT e 100% CRF, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias																
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)									
100% CRP35AL	0,90	530,2	0,966	2,3	2,6	14,95	9,34	8,8	3,8	530,0	1,160	2,7	2,0	17,36	10,85	10,8	1,3									
						13,70	8,56							17,46	10,91											
		527,7	1,006			13,91	8,69							532,3	1,168					16,98	10,61					
						13,94	8,71														17,01	10,63				
		539,4	1,029			14,42	9,01							531,2	1,115					17,27	10,79					
						13,28	8,30														17,60	11,00				
100% CRP35	0,80	551,6	1,344	3,2	1,7	22,81	14,26	14,0	2,6	532,1	1,310	3,1	1,8	25,29	15,81	15,1	2,8									
						22,33	13,96							24,75	15,47											
		553,4	1,369							23,45	14,66							533,8	1,366			23,35	14,59			
										21,59	13,49												24,40	15,25		
		554,3	1,401							22,26	13,91							543,1	1,353			24,02	15,01			
										22,16	13,85												23,45	14,66		
100% CRPNT	0,63	543,6	0,120	0,3	5,4	0,82	0,51	0,6	9,4																	
						1,00	0,63																			
		546,6	0,128							1,08	0,68															
										1,11	0,69															
		532,0	0,112							1,03	0,64															
										0,97	0,61															
100% CRF	0,92	530,1	1,059	2,7	7,5	21,59	13,49	14,8	5,8	523,8	1,190	2,850	2,0	20,20	12,63	12,6	1,7									
						22,35	13,97							20,53	12,83											
		522,7	1,269							25,05	15,66							521,4	1,209			20,70	12,94			
										23,30	14,56												19,81	12,38		
		520,7	1,133							25,37	15,86							519,1	1,249			19,79	12,37			
										24,01	15,01												20,23	12,64		

Tabela A3.3 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP35AL, 100% CRP35, 100% CRPNT e 100% CRF, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias									
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)		
100% CRP35AL	0,90	533,4	1,511	3,2	7,9	22,10	13,81	13,7	1,1	540,5	1,383	3,5	7,6	23,94	14,96	14,6	3,9		
						21,67	13,54							24,24	15,15				
		538,4	1,358			21,68	13,55			22,22	13,89			541,7	1,465			24,30	15,19
						22,15	13,84							540,8	1,657			22,53	14,08
		534,7	1,247			21,71	13,57											21,83	13,64
																		23,58	14,74
100% CRP35	0,80	535,8	1,611	3,6	3,5	27,94	17,46	18,1	5,3	540,1	1,550	3,7	2,2	29,97	18,73	18,7	4,1		
						29,55	18,47							27,79	17,37				
		535,8	1,507			27,30	17,06			27,20	17,00			535,6	1,616			29,98	18,74
						31,04	19,40							543,4	1,535			29,14	18,21
		534,9	1,487			30,49	19,06											31,12	19,45
																		31,47	19,67
100% CRPNT	0,63	543,7	0,237	0,5	8,7	1,40	0,88	0,9	5,8										
						1,40	0,88												
		541,7	0,204			1,63	1,02			1,52	0,95								
						1,49	0,93												
		544,5	0,194			1,59	0,99												
100% CRF	0,92	529,0	1,662	3,8	2,3	28,40	17,75	17,8	3,4	525,2	1,415	3,0	9,4	26,03	16,27	16,0	2,7		
						28,69	17,93							25,48	15,93				
		538,2	1,573			30,10	18,81			29,23	18,27			524,7	1,129			26,37	16,48
						27,59	17,24							520,6	1,343			26,12	16,33
		531,0	1,638			27,22	17,01											25,14	15,71
																		24,33	15,21

Tabela A3.4 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRB, 100% CRP, 5%CRP + 95%CPN e 15%CRP + 85%CPN, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias								
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	
100% CRB	0,73	531,7	0,696	1,8	8,4	11,80	7,38	7,4	2,9	556,1	0,967	2,396	4,1	17,51	10,94	10,9	2,8	
						11,18	6,99							16,80	10,50			
		535,0	0,739			11,63	7,27			557,2	1,033			17,28	10,80			
						11,91	7,44								16,88	10,55		
		535,9	0,848			12,26	7,66			549,2	1,067				17,66	11,04		
						12,09	7,56								18,25	11,41		
100% CRP	0,90	254,7	1,175	2,8	1,9	20,61	12,88	12,9	5,8	524,8	1,295	2,923	3,0	21,40	13,38	13,2	5,5	
						21,01	13,13							21,29	13,31			
		527,5	1,221			20,63	12,89			522,8	1,204			21,68	13,55			
						18,26	11,41								23,17	14,48		
		531,3	1,171			22,33	13,96			529,9	1,242				19,92	12,45		
						20,63	12,89								19,68	12,30		
5%CRP + 95%CPN	0,47	579,3	2,415	5,647	7,3	66,29	41,43	41,4	7,3	581,3	2,822	6,422	3,2	66,49	41,56	44,9	10,8	
						71,13	44,46							64,32	40,20			
		583,1	2,621			66,79	41,74			581,4	2,620			67,53	42,21			
						72,22	45,14								67,21	42,01		
		588,3	2,192			63,38	39,61			585,6	2,778				81,48	50,93		
						57,84	36,15								83,77	52,36		
15%CRP + 85%CPN	0,55	580,8	1,952	5,268	9,3	41,94	26,21	31,5	9,8	571,2	2,318	5,638	4,5	46,47	29,04	36,6	12,6	
						48,56	30,35							50,88	31,80			
		577,4	2,401			51,22	32,01			567,4	2,341			64,74	40,46			
						-	-								65,49	40,93		
		567,2	2,390			54,81	34,26			564,7	2,558				64,52	40,33		
						55,62	34,76								59,36	37,10		

Tabela A3.5 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRB, 100% CRP, 5%CRP + 95%CPN e 15%CRP + 85%CPN, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias							
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)
100% CRB	0,73	553,0	1,083	2,5	0,8	16,68	10,43	12,0	6,3	536,0	1,258	3,0	4,6	15,78	9,86	10,1	2,7
						18,99	11,87							16,75	10,47		
		549,5	1,077			20,18	12,61			538,6	1,347			15,64	9,78		
						19,66	12,29							16,75	10,47		
		553,1	1,098			19,41	12,13			542,2	1,207			16,16	10,10		
						20,28	12,68							15,90	9,94		
100% CRP	0,90	526,2	1,212	3,1	5,3	24,92	15,58	15,4	2,4	523,7	1,322	3,0	2,1	24,91	15,57	15,4	4,7
						23,51	14,69							25,80	16,13		
		532,6	1,376			24,95	15,59			529,2	1,296			25,53	15,96		
						25,31	15,82							25,02	15,64		
		527,5	1,328			24,44	15,28			529,8	1,256			23,54	14,71		
						24,27	15,17							22,56	14,10		
5%CRP + 95%CPN	0,47	591,7	2,986	7,078	1,2	80,02	50,01	52,6	3,7	589,1	2,665	6,5	3,0	86,12	53,83	53,8	1,8
						81,34	50,84							85,91	53,69		
		584,5	3,002			83,63	52,27			587,1	2,794			88,15	55,09		
						89,04	55,65							87,22	54,51		
		582,0	3,072			83,75	52,34			579,4	2,863			85,72	53,58		
						87,27	54,54							83,09	51,93		
15%CRP + 85%CPN	0,55	579,7	2,262	5,497	7,1	66,04	41,28	38,9	7,6	588,4	2,474	5,4	5,1	63,09	39,43	42,6	9,3
						60,92	38,08							65,96	41,23		
		566,3	2,579			67,63	42,27			576,4	2,275			61,41	38,38		
						66,33	41,46							66,42	41,51		
		583,6	2,195			54,95	34,34			574,7	2,194			80,45	50,28		
						57,96	36,23							71,42	44,64		

Tabela A3.6 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN, 15%Cz + 85%CRP e 30%Cz + 70%CRP, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias							
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)
30%CRP + 70%CPN	0,55	570,9	1,895	4,237	3,4	48,85	30,53	30,4	4,2	583,3	2,152	4,811	3,7	58,74	36,71	36,5	2,2
						45,51	28,44							58,44	36,53		
		562,9	1,772			50,35	31,47			551,6	2,040			59,26	37,04		
						46,57	29,11							59,05	36,91		
		567,2	1,756			49,28	30,80			561,4	1,966			55,55	34,72		
						51,41	32,13							59,04	36,90		
50%CRP + 50%CPN	0,58	555,6	1,632	3,996	3,9	46,37	28,98	28,0	1,7	561,0	1,942	4,609	2,6	50,93	31,83	31,5	5,1
						44,85	28,03							51,62	32,26		
		560,7	1,793			44,04	27,53			560,7	2,037			46,28	28,93		
						45,03	28,14							47,99	29,99		
		556,8	1,690			44,26	27,66			562,6	1,920			51,92	32,45		
						44,50	27,81							54,01	33,76		
15%Cz + 85%CRP	0,64	532,5	0,957	2,370	6,1	18,41	11,51	11,0	4,9	537,7	1,197	2,636	4,7	19,96	12,48	12,6	1,0
						18,18	11,36							20,47	12,79		
		533,4	0,979			18,79	11,74			530,5	1,102			20,00	12,50		
						16,79	10,49							20,11	12,57		
		542,5	1,098			16,67	10,42			531,5	1,075			20,22	12,64		
						16,90	10,56							19,82	12,39		
30%Cz + 70%CRP	0,85	544,7	0,844	1,835	5,6	13,74	8,59	8,2	3,7	538,2	0,787	1,858	0,8	15,11	9,44	9,2	4,9
						12,86	8,04							14,32	8,95		
		535,1	0,764			12,85	8,03			536,3	0,801			14,52	9,08		
						12,40	7,75							13,71	8,57		
		537,3	0,741			13,16	8,23			541,0	0,790			15,09	9,43		
						13,74	8,59							16,03	10,02		

Tabela A3.7 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN, 15%Cz + 85%CRP e 30%Cz + 70%CRP, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias							
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)
30%CRP + 70%CPN	0,55	561,6	-			62,94	39,34			576,9	2,319			76,01	47,51		
						64,21	40,13							75,35	47,09		
		572,4	-	5,602	0,0	64,82	40,51	38,7	3,6	566,0	2,202	5,2	4,0	66,74	41,71	43,3	6,9
						59,72	37,33							63,39	39,62		
50%CRP + 50%CPN	0,58	564,9	2,390			60,78	37,99			570,3	2,105			68,41	42,76		
						58,93	36,83							65,47	40,92		
		564,6	2,106			58,10	36,31			562,1	2,303			58,65	36,66		
						57,35	35,84							60,16	37,60		
50%CRP + 50%CPN	0,58	569,5	2,212	5,233	5,1	59,13	36,96	36,0	2,0	557,8	2,218	5,5	4,3	56,16	35,10	36,9	3,1
						55,9	34,94							58,07	36,29		
		574,4	2,380			58,46	36,54			558,0	2,461			59,05	36,91		
						56,25	35,16							62,19	38,87		
15%Cz + 85%CRP	0,64	529,0	1,323			21,05	13,16			538,5	1,380			25,22	15,76		
						19,90	12,44							24,89	15,56		
		534,1	1,186	3,051	6,7	21,65	13,53	13,4	3,9	541,9	1,443	3,2	3,5	25,34	15,84	15,3	3,0
						21,7	13,56							24,55	15,34		
30%Cz + 70%CRP	0,85	533,7	1,396			22,51	14,07			537,6	1,324			23,46	14,66		
						22,18	13,86							23,64	14,78		
		545,7	1,198			22,88	14,30			536,9	1,821			30,17	18,86		
						22,63	14,14							27,51	17,19		
30%Cz + 70%CRP	0,85	541,9	1,132	2,765	2,9	21,60	13,50	14,2	2,4	545,1	1,574	4,1	6,7	30,20	18,88	18,3	3,4
						23,24	14,53							28,56	17,85		
		545,9	1,209			22,87	14,29			538,5	1,820			30,04	18,78		
						23,15	14,47							28,97	18,11		

Tabela A3.8 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP + 2%SP, 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN e 30%CRP + 70%CPN, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias								
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	550,9	1,961			40,26	25,16			540,3	1,889			36,28	22,68			
						40,79	25,49							37,60	23,50			
		537,0	1,748	4,373	4,7	39,11	24,44	24,9	1,5	542,0	1,977	4,523	1,9	38,59	24,12	24,0	3,2	
						39,11	24,44								39,31	24,57		
		540,1	1,888			40,11	25,07			539,0	1,923			38,36	23,98			
						39,62	24,76								40,12	25,08		
<b>100% CPN</b>	0,60	583,7	2,300			43,42	27,14			579,9	2,589			59,61	37,26			
						43,22	27,01							63,14	39,46			
		576,6	2,700	5,836	6,6	44,95	28,09	28,3	4,3	581,9	2,357	5,627	5,8	60,30	37,69	39,2	3,2	
						44,82	28,01							63,50	39,69			
		581,4	2,470			48,99	30,62			580,5	2,257			64,66	40,41			
						46,50	29,06								64,86	40,54		
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	578,9	2,230			44,61	27,88			579,0	2,535			59,61	37,26			
						45,01	28,13							61,41	38,38			
		577,6	2,342	5,324	2,2	44,51	27,82	27,8	2,7	573,3	2,748	6,191	3,3	59,34	37,09	37,4	3,1	
						46,37	28,98							63,05	39,41			
		578,8	2,243			43,38	27,11			569,4	2,641			58,69	36,68			
						42,53	26,58								57,23	35,77		
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	569,3	1,788			41,95	26,22			574,1	2,101			57,22	35,76			
						43,17	26,98							54,23	33,89			
		570,4	2,047	4,609	6,4	41,79	26,12	28,4	8,8	573,7	2,698	5,572	10,3	55,28	34,55	34,5	2,0	
						44,59	27,87							53,73	33,58			
		579,7	2,064			48,19	30,12			581,7	2,333			55,36	34,60			
						53,00	33,13								55,30	34,56		

Tabela A3.9 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 100% CRP + 2%SP, 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN e 30%CRP + 70%CPN, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias									
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)		
100% CRP + 2%SP	0,72	556,9	2,100	4,808	1,8	45,55	28,47	28,3	1,0	541,2	1,953	4,6	4,3	43,87	27,42	27,6	3,5		
						45,11	28,19							44,08	27,55				
		556,0	2,008			45,47	28,42			45,03	28,14			543,2	2,053			45,88	28,68
						44,41	27,76			41,24	25,78								
		552,9	2,046			44,41	27,76			45,73	28,58			543,3	1,847			45,69	28,56
						43,76	27,35												
100% CPN	0,60	581,7	2,984	7,014	0,8	83,98	52,49	50,7	1,9	575,3	3,351	7,4	6,0	84,41	52,76	54,6	3,9		
						82,06	51,29							86,94	54,34				
		577,2	3,024			79,34	49,59			81,19	50,74			575,1	2,904			93,90	58,69
						80,18	50,11			89,08	55,68								
		579,0	2,970			79,89	49,93			573,1	3,246			573,1	3,246			85,11	53,19
						84,39	52,74												
15%CRP + 85%CPN	0,60	581,4	3,165	6,670	9,6	74,62	46,64	47,1	1,6	584,4	2,932	6,7	5,1	83,15	51,97	49,9	6,4		
						77,47	48,42							84,01	52,51				
		580,7	2,498			75,12	46,95			75,77	47,36			581,8	2,667			74,01	46,26
						75,83	47,39			74,26	46,41								
		578,1	2,874			73,55	45,97			582,2	3,004			582,2	3,004			87,19	54,49
						76,83	48,02												
30%CRP + 70%CPN	0,60	574,3	2,555	6,001	2,7	69,91	43,69	44,3	1,9	564,9	2,617	6,2	3,3	62,35	38,97	42,5	7,1		
						70,13	43,83							61,78	38,61				
		579,9	2,646			70,17	43,86			69,88	43,68			564,7	2,559			70,06	43,79
						73,78	46,11			66,88	41,80								
		578,1	2,480			71,05	44,41			574,4	2,766			574,4	2,766			72,52	45,33
						74,74	46,71												

Tabela A3.10 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 50%CRP + 50%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN, aos 3 e 7 dias.

Composição	a/l	3 dias								7 dias								
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	580,0	2,111			44,67	27,92			575,7	2,288			52,85	33,03			
						42,84	26,78							50,69	31,68			
		569,8	2,077	4,966	1,8	41,82	26,14	27,7	5,9	575,3	2,221	5,373	2,6	55,61	34,76	34,3	4,9	
						41,66	26,04								53,90	33,69		
		574,5	2,169			49,05	30,66			573,2	2,368				58,68	36,68		
						45,84	28,65								57,41	35,88		
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	569,2	1,638			23,90	14,94			566,6	2,073			33,95	21,22			
						23,42	14,64							32,91	20,57			
		570,8	1,801	4,168	6,0	22,97	14,36	15,2	5,6	572,5	2,015	4,872	2,6	36,64	22,90	21,5	3,5	
						23,68	14,80								34,07	21,29		
		570,9	1,896			27,09	16,93			572,0	2,148				35,27	22,04		
						24,67	15,42								33,93	21,21		
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	568,4	1,097			22,07	13,79			561,3	1,381			28,58	17,86			
						22,15	13,84							30,53	19,08			
		561,9	1,108	2,770	9,5	21,69	13,56	13,8	1,3	564,9	1,472	3,639	11,7	29,64	18,53	18,3	3,1	
						22,65	14,16								29,94	18,71		
		567,9	1,340			22,18	13,86			569,7	1,805				27,81	17,38		
						22,18	13,86								29,54	18,46		

Tabela A3.11 - Valores obtidos de massa, resistências mecânicas à compressão e flexão, fcm e fctm, respectivamente, e coeficiente de variação para os provetes com 50%CRP + 50%CPN, 30%Cz + 70%CPN e 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN, aos 28 e 90 dias.

Composição	a/l	28 dias								90 dias								
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	CV (%)	
50%CRP + 50%CPN	0,60	590,2	2,236			60,10	37,56			576,9	2,576			63,68	39,80			
						65,11	40,69							69,91	43,69			
		557,9	2,250	5,264	0,3	61,40	38,38	39,7	4,4	574,7	2,771	6,2	3,3	61,72	38,58	40,8	4,0	
						61,65	38,53								64,05	40,03		
		581,5	2,252			64,32	40,20			573,7	2,601				66,87	41,79		
						68,49	42,81								65,89	41,18		
30%Cz + 70%CPN	0,60	573,7	2,502			49,15	30,72			584,3	2,772			63,62	39,76			
						49,13	30,71							66,05	41,28			
		579,7	2,547	5,714	5,1	49,77	31,11	30,4	3,0	593,1	2,684	6,3	2,7	65,01	40,63	39,8	2,1	
						50,34	31,46								62,40	39,00		
		572,2	2,265			46,53	29,08			587,0	2,594				62,33	38,96		
						46,76	29,23								63,09	39,43		
30%Cz + 30%CRP + 40%CPN	0,60	567,4	1,979			40,91	25,57			577,4	2,202			49,69	31,06			
						41,58	25,99							51,39	32,12			
		567,8	2,032	4,664	1,5	39,19	24,49	25,8	6,2	564,2	2,262	5,3	1,8	51,26	32,04	31,9	2,3	
						46,57	29,11								50,98	31,86		
		566,9	1,959			38,86	24,29			567,6	2,299				49,58	30,99		
						40,25	25,16								53,11	33,19		

## A4. Absorção capilar

Tabela A4.1 – Valores médios dos valores de absorção obtidos no ensaio de absorção capilar, em kg/m<sup>2</sup>.

Composição	a/l	10 min	20 min	30 min	60 min	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
<b>100% CPN</b>	0,47	0,03	0,05	0,06	0,08	0,11	0,14	0,21	0,27	0,30
<b>100% CPNAL</b>	0,72	0,08	0,11	0,13	0,18	0,29	0,38	0,67	0,87	1,01
<b>15%Cz + 85%CPN</b>	0,44	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11	0,13	0,21	0,26	0,30
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,42	0,05	0,07	0,08	0,10	0,15	0,19	0,34	0,44	0,51
<b>100% CRP35AL</b>	0,90	0,34	0,46	0,53	0,71	1,12	1,45	2,65	3,57	3,82
<b>100% CRP35</b>	0,80	0,25	0,32	0,37	0,48	0,74	0,94	1,67	2,24	2,66
<b>100% CRPNT</b>	0,63	0,59	0,81	1,01	1,42	2,45	3,45	4,10	4,11	4,12
<b>100% CRF</b>	0,92	0,24	0,31	0,36	0,46	0,69	0,89	1,56	2,08	2,47
<b>100% CRB</b>	0,73	0,21	0,27	0,33	0,43	0,67	0,90	1,65	2,22	2,65
<b>100% CRP</b>	0,90	0,24	0,30	0,35	0,45	0,69	0,90	1,61	2,17	2,58
<b>5%CRP + 95%CPN</b>	0,47	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,13	0,23	0,30	0,33
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,55	0,05	0,08	0,10	0,13	0,22	0,29	0,50	0,62	0,71
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,58	0,05	0,07	0,08	0,09	0,14	0,17	0,28	0,35	0,40
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,64	0,06	0,08	0,09	0,10	0,17	0,21	0,37	0,48	0,56
<b>15%Cz + 85%CRP</b>	0,85	0,18	0,21	0,30	0,42	0,66	0,90	1,71	2,34	2,82
<b>30%Cz + 70%CRP</b>	0,75	0,17	0,23	0,28	0,37	0,60	0,82	1,51	2,04	2,42
<b>100% CRP + 2%SP</b>	0,72	0,06	0,08	0,10	0,13	0,19	0,26	0,45	0,60	0,71
<b>100% CPN</b>	0,60	0,08	0,12	0,13	0,18	0,25	0,32	0,50	0,63	0,73
<b>15%CRP + 85%CPN</b>	0,60	0,08	0,12	0,14	0,19	0,28	0,35	0,56	0,71	0,80
<b>30%CRP + 70%CPN</b>	0,60	0,07	0,10	0,12	0,15	0,22	0,26	0,41	0,52	0,60
<b>50%CRP + 50%CPN</b>	0,60	0,09	0,12	0,14	0,17	0,23	0,28	0,43	0,55	0,62
<b>30%Cz + 70%CPN</b>	0,60	0,14	0,19	0,23	0,31	0,48	0,62	1,12	1,49	1,74
<b>30%Cz + 30%CRP + 40%CPN</b>	0,60	0,15	0,20	0,22	0,29	0,43	0,55	0,98	1,30	1,53

## A5. Retração

Tabela A5.1 – Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPN, 15%Cz + 85%CPN, 30%Cz + 70%CPN, 100% CRPNT.

Dias	100% CPN		15%Cz + 85%CPN		30%Cz + 70%CPN		100% CRPNT	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	-0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
2	-0,97	-92	-1,39	-223	-1,87	-150	-3,39	-140
3	-1,31	-230	-1,71	-399	-2,37	-189	-6,62	-170
4	-1,51	-414	1,94	-473	-2,57	-277	-8,22	-373
5	-1,64	-449	-2,04	-533	-2,75	-363	-8,82	-400
6	-1,75	-454	-2,08	-551	-2,77	-389	-8,98	-435
7	-1,78	-455	-2,07	-585	-2,80	-450	-9,23	-532
8	-1,83	-483	-2,17	-747	-2,83	-495	-9,29	-684
10	-2,01	-572	-2,28	-757	-2,96	-525	-9,58	-733
12	-2,11	-686	-2,33	-827	-3,06	-535	-9,69	-782
14	-2,18	-734	-2,42	-846	-3,13	-548	-9,72	-782
16	-2,25	-838	-2,50	-905	-3,20	-573	-9,75	-849
19	-2,34	-839	-2,57	-940	-3,25	-675	-9,73	-915
22	-2,42	-845	-2,65	-949	-3,32	-697	-9,74	-926
25	-2,51	-885	-2,72	-991	-3,37	-721	-9,77	-987
28	-2,52	-900	-2,76	-1043	-3,40	-793	-9,58	-1011
35	-2,52	-969	-2,77	-1063	-3,40	-802	-9,44	-1019
42	-2,57	-1034	-2,79	-1100	-3,43	-818	-9,39	-1028
56	-2,71	-1076	-2,89	-1180	-3,51	-890	-9,22	-1111
70	-2,76	-1118	-2,92	-1195	-3,54	-902	-9,05	-1130
81	-2,78	-1179	-2,92	-1243	-3,51	-958	-8,94	-1178
90	-2,80	-1186	-2,95	-1246	-3,52	-963	-8,87	-1203

Tabela A5.2 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CRF, 100% CRB, 100% CRP.

Dias	100% CRF		100% CRB		100% CRP	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	0,00	0	0,00	0	0,00	0
2	-2,39	-197	-3,10	-92	-2,94	-269
3	-3,57	-331	-4,54	-297	-4,20	-368
4	-4,31	-384	-5,05	-316	-4,56	-429
5	-4,79	-499	-5,47	-475	-4,85	-514
6	-5,21	-705	-5,68	-733	-5,15	-767
7	-5,69	-972	-6,01	-781	-5,50	-814
8	-6,08	-1250	-6,28	-1023	-5,87	-1083
10	-6,57	-1770	-6,59	-1321	-6,29	-1386
12	-6,91	-2104	-6,89	-1530	-6,55	-1656
14	-7,20	-2446	-7,13	-1769	-6,92	-1864
17	-7,45	-2697	-7,41	-1981	-7,23	-2292
20	-7,72	-2868	-7,52	-2079	-7,47	-2511
22	-7,88	-3111	-7,62	-2197	-7,68	-2728
25	-7,96	-3163	-7,71	-2316	-7,77	-2823
28	-7,99	-3276	-7,79	-2422	-7,81	-2954
33	-8,10	-3297	-7,83	-2446	-7,91	-3043
40	-8,31	-3481	-7,96	-2568	-8,11	-3183
54	-8,57	-3594	-8,14	-2691	-2,04	-3349
68	-8,71	-3677	-8,19	-2744	-8,48	-3416
79	-8,70	-3739	-8,19	-2792	-8,46	-3465
90	-8,78	-3820	-8,26	-2855	-8,54	-3554

Tabela A5.3 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 5%CRP + 95%CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN.

Dias	5%CRP + 95%CPN		15%CRP + 85%CPN		30%CRP + 70%CPN		50%CRP + 50%CPN	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	0,00	0	0,00	0	-0,00	0	-0,00	0
2	-0,93	-95	-1,28	-46	-1,06	-139	-1,35	-51
3	-1,22	-115	-1,69	-147	-1,55	-199	-1,78	-97
4	-1,30	-157	-1,80	-252	-1,64	-320	-2,00	-290
5	-1,50	-232	-1,97	-311	-1,82	-356	-2,24	-300
6	-1,61	-317	-2,06	-369	-1,92	-415	-2,49	-354
7	-1,67	-341	-2,15	-378	-2,03	-445	-2,66	-460
8	-1,76	-467	-2,27	-520	-2,22	-595	-2,85	-649
10	-1,88	-518	-2,44	-586	-2,40	-654	-3,08	-762
12	-1,97	-664	-2,55	-700	-2,53	-659	-3,28	-800
14	-2,06	-681	-2,64	-762	-2,64	-792	-3,42	-983
16	-2,11	-684	-2,71	-773	-2,76	-866	-3,49	-1025
18	-2,27	-701	-2,81	-795	-2,87	-940	-3,62	-1150
21	-2,28	-764	-2,92	-887	-2,83	-1016	-3,72	-1298
24	-2,32	-776	-2,93	-902	-3,08	-1119	-3,78	-1374
28	-2,33	-871	-2,96	-1020	-3,08	-1175	-3,81	-1430
31	-2,34	-876	-2,99	-1038	-3,13	-1183	-3,84	-1438
38	-2,44	-949	-3,09	-1088	-3,27	-1227	-3,98	-1492
52	-2,59	-994	-3,24	-1186	-3,47	-1356	-4,15	-1647
66	-2,66	-1045	-3,31	-1220	-3,53	-1394	-4,23	-1693
77	-2,67	-1100	-3,37	-1267	-3,55	-1450	-4,24	-1740
90	-2,73	-1142	-3,38	-1316	-3,61	-1517	-4,29	-1821

Tabela A5.4 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPNAL, 15%Cz + 85%CRP, 30%Cz + 70%CRP, 100% CRP + 2%SP.

Dias	100% CPNAL		15%Cz + 85%CRP		30%Cz + 70%CRP		100% CRP + 2%SP	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
2	2,53	-130	-2,40	-221	-1,65	-160	-1,46	-261
3	3,61	-219	-3,96	-232	-3,07	-193	-2,29	-282
4	4,08	-340	-4,79	-406	-3,73	-334	-2,82	-382
5	4,50	-374	-5,45	-537	-4,40	-384	-3,18	-531
6	4,61	-532	-5,98	-845	-4,99	-685	-3,48	-767
7	4,85	-551	-6,32	-1050	-5,29	-821	-3,67	-852
8	4,98	-560	-6,58	-1259	-5,59	-1045	-3,85	-1011
10	5,19	-841	-7,06	-1684	-5,92	-1280	-4,11	-1126
12	5,34	-879	-7,32	-2021	-6,24	-1668	-4,27	-1427
14	5,41	-940	-7,53	-2229	-6,45	-1730	-4,43	-1440
16	5,56	-950	-7,69	-2321	-6,61	-1961	-4,56	-1618
18	5,62	-1109	-7,90	-2578	-6,79	-2126	-4,72	-1761
21	5,65	-1115	-7,93	-2636	-6,84	-2182	-4,74	-1824
24	5,67	-1168	-7,97	-2758	-6,88	-2286	-4,74	-1924
28	5,70	-1177	-8,08	-2794	-6,96	-2316	-4,85	-1947
36	5,76	-1319	-8,24	-2961	-7,12	-2413	-5,00	-2055
50	5,89	-1374	-8,43	-3044	-7,31	-2532	-5,24	-2244
64	5,91	-1446	-8,50	-3095	-7,39	-2568	-5,31	-2291
75	5,86	-1519	-8,45	-3129	-7,33	-2615	-5,30	-2336
90	5,94	-1574	-8,58	-3205	-7,45	-2694	-5,47	-2414

Tabela A5.5 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CPN, 15%CRP + 85%CPN, 30%CRP + 70%CPN, 50%CRP + 50%CPN.

Dias	100% CPN		15%CRP + 85%CPN		30%CRP + 70%CPN		50%CRP + 50%CPN	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
2	-2,51	-80	-1,88	-57	-1,99	-59	-2,23	-71
3	-3,01	-298	-2,72	-268	-2,52	-286	-2,66	-304
4	-3,26	-345	-2,96	-335	-2,78	-352	-2,84	-384
5	-3,48	-376	-3,26	-370	-2,93	-402	-2,95	-411
6	-3,68	-480	-3,40	-534	-3,14	-568	-3,51	-594
7	-3,85	-536	-3,63	-560	-3,45	-615	-3,32	-632
8	-4,00	-683	-3,80	-745	-3,54	-802	-3,50	-837
10	-4,19	-786	-4,04	-871	-3,80	-934	-3,71	-981
12	-4,37	-851	-4,17	-949	-3,92	-1017	-3,81	-1046
14	-4,45	-896	-4,25	-1019	-4,01	-1081	-3,66	-1109
16	-4,52	-1008	-4,35	-1134	-4,11	-1197	-4,00	-1235
18	-4,55	-1042	-4,37	-1168	-4,13	-1233	-4,03	-1265
21	-4,57	-1077	-4,39	-1204	-4,16	-1264	-4,04	-1298
25	-4,62	-1102	-4,42	-1256	-4,18	-1320	-4,04	-1346
28	-4,61	-1121	-4,40	-1259	-4,18	-1327	-4,01	-1349
30	-4,59	-1135	-4,40	-1274	-4,17	-1343	-4,03	-1366
39	-4,73	-1247	-4,55	-1441	-4,33	-1466	-4,18	-1489
46	-4,89	-1308	-4,72	-1457	-4,43	-1532	-4,34	-1563
52	-5,00	-1328	-4,78	-1491	-4,57	-1569	-4,39	-1591
66	-5,10	-1357	-4,92	-1523	-4,77	-1591	-4,59	-1627
76	-5,04	-1411	-4,96	-1567	-4,73	-1633	-4,55	-1680
90	-5,04	-1468	-4,91	-1623	-4,73	-1694	-3,69	-1731

Tabela A5.6 - Valores médios da variação de massa, em %, e retração, em  $\times 10^{-6}m/m$ , obtidos no ensaio de retração das misturas 100% CRP35AL, 100% CRP35, 30%Cz + 70%CPN, 30%Cz + 30%CRP + 40%CPN.

Dias	100% CRP35AL		100% CRP35		30%Cz + 70%CPN		30%Cz + 30%CRP + 40%CPN	
	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$	$\delta M$	$\epsilon$
1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
2	-3,00	-36	-2,14	-43	-1,93	-40	-2,89	-84
3	-4,70	-70	-3,08	-59	-2,91	-57	-4,03	-117
4	-5,50	-255	-3,72	-203	-3,55	-189	-4,58	-286
5	-6,15	-427	-4,40	-326	-4,03	-258	-5,01	-430
6	-6,61	-586	-4,88	-485	-4,36	-318	-5,29	-542
7	-7,00	-771	-5,28	-650	-4,55	-384	-5,47	-681
8	-7,33	-950	-5,56	-801	-4,73	-417	-5,63	-741
10	-7,77	-1263	-6,01	-1065	-4,96	-488	-5,83	-885
12	-7,98	-1469	-6,30	-1274	-5,08	-540	-5,92	-974
14	-8,21	-1733	-6,50	-1506	-5,21	-643	-6,04	-1111
16	-8,30	-1839	-6,63	-1605	-5,26	-668	-6,06	-1155
18	-8,37	-1941	-6,66	-1692	-5,29	-701	-6,06	-1192
21	-8,52	-2025	-6,85	-1772	-5,38	-706	-6,16	-1215
23	-8,45	-2086	-6,80	-1830	-5,34	-728	-6,08	-1247
28	-8,42	-2169	-6,83	-1884	-5,33	-740	-6,05	-1268
31	-8,52	-2264	-6,90	-1990	-5,35	-803	-6,06	-1343
37	-8,72	-2383	-7,10	-2093	-5,44	-828	-6,13	-1400
44	-8,95	-2510	-7,35	-2232	-5,58	-882	-6,31	-1453
50	-9,03	-2540	-7,53	-2294	-5,64	-892	-6,37	-1470
64	-9,11	-2570	-7,75	-2355	-5,69	-915	-6,43	-1497
74	-9,06	-2628	-7,66	-2403	-5,69	-954	-6,32	-1559
90	-9,00	-2685	-7,66	-2467	-5,66	-1003	-6,33	-1605

