

**Separação dos constituintes do betão
para a obtenção de argamassas 100%
recicladas**

Carolina Marques Cyrne

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Professor Doutor Manuel Francisco Costa Pereira

Júri

Presidente: Professor Doutor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito
Aleixo Bogas

Vogal: Professora Doutora Rita Maria Vilela Nogueira

Setembro de 2022

(página intencionalmente deixada em branco)

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.

(página intencionalmente deixada em branco)

**Separação dos constituintes do betão
para a obtenção de argamassas 100%
recicladas**

Carolina Marques Cyrne

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 1 – Waste concrete production

Projeto FCT PTDC/ECI-CON/28308/2017



FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

(página intencionalmente deixada em branco)

Agradecimentos

Esta dissertação significa que atingi a meta deste meu percurso no Instituto Superior Técnico pelo que é a hora de agradecer a todas as pessoas que tornaram a caminhada mais fácil.

Ao meu orientador, Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas, pelos ensinamentos, conselhos, disponibilidade e motivação.

Ao meu coorientador, Professor Manuel Francisco Costa Pereira pela revisão do texto e palavras de incentivo para a continuação deste trabalho.

À investigadora Susana Hu pela ajuda durante todo o trabalho experimental e paciência para todas as minhas dúvidas. Às investigadoras Ana Chambel Carriço e Sofia Real pelo acompanhamento e ajuda a encontrar soluções.

Ao Sr. Francisco Almeida e Sr. Pedro Costa, técnicos do Laboratório de Construção, por estarem sempre disponíveis durante todo o meu trabalho experimental.

À minha madrinha, pelo apoio prestado nesta reta final.

À minha mãe e avó, por serem os meus pilares e me darem força para nunca desistir.

Aos meus colegas do Técnico, que me acompanharam durante este percurso académico e que me ajudaram sempre.

Aos meus amigos, que apesar de não compreenderem o tema do meu trabalho me motivaram para dar o meu melhor.

Ao meu namorado, por me ter apoiado sempre e me ter puxado para cima quando as coisas não estavam a correr bem.

Por fim, dedico esta dissertação ao meu pai.

(página intencionalmente deixada em branco)

Resumo

Os resíduos criados na atividade da construção são atualmente um tópico de forte investigação, pretendendo-se que a sua reutilização seja efetiva no sentido de se caminhar para práticas mais sustentáveis e de acordo com uma economia verdadeiramente circular. Para tal, é importante que se desenvolvam métodos efetivos de tratamento e individualização dos vários constituintes dos resíduos de construção, de modo a se alcançarem novos materiais de elevada qualidade, de desempenho semelhante aos que estiveram na sua origem.

O presente trabalho experimental tem como objetivo a separação dos constituintes do betão endurecido, para a obtenção de cimento reciclado (CR) e areia de elevada qualidade (HQS), bem como a produção e a caracterização de argamassas com incorporação de CR. A metodologia de separação foi definida e avaliada tendo por base o método patenteado no âmbito do projeto FCT EcoHydb, ainda em curso. Numa primeira fase o novo método de separação foi avaliado para diferentes tipos de resíduos de betão, com distinta composição e tipo de agregado, diferentes frações granulométricas e diferentes condições de preparação dos resíduos sujeitos a separação. O rendimento e a qualidade dos produtos de separação obtidos foram aferidos com recurso a ensaios de termogravimetria, perda de massa em mufla, ataque ácido e análise microscópica. Finalmente, produziram-se argamassas com incorporação de CR, resultante da termoativação da fração cimentícia separada dos resíduos de betão, que foram caracterizadas no estado fresco (trabalhabilidade, massa volúmica) e endurecido (resistência mecânica, absorção capilar e porosidade aparente).

Do balanço geral do processo de separação aplicado aos diferentes tipos de resíduos analisados, conclui-se que é possível obter cerca de 47% de HQS e 5% de CR, garantindo a recuperação e valorização de mais de 50% dos resíduos de betão. Para além destas matérias-primas de elevada qualidade para a indústria dos produtos de base cimentícia, o processo gerou ainda 20-25% de fíler e cerca de 20% de RCD, como subprodutos. A quantidade de desperdícios totais do processo foi inferior a 20%. Numa visão global, por cada tonelada de resíduos de betão foi possível recuperar e valorizar mais de 450 kg de areia, 50 kg de CR e 200 kg de fíler.

Palavras-Chave:

Cimento reciclado; Areia de elevada qualidade; Método de separação; Fração cimentícia; Argamassas com CR; Resíduos de betão.

(página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

The waste resulting from construction activity is currently a strong topic of research. Thereby, the main goal is to reuse this waste moving towards more sustainable practices, and in accordance with a circular economy. To this end, it is important to develop effective methods of treatment and individualization of the various constituents of construction waste, aiming to achieve new high-quality materials, with a similar performance to the original material.

The present experimental research aims to separate the constituents of hardened concrete, to obtain recycled cement (RC) and high-quality sand (HQS), as well as the production and characterization of mortars with RC incorporation. The separation methodology was defined and evaluated based on the patented method within the scope of the FCT EcoHydb project, still in progress. During the first phase, the new separation method was evaluated for different types of concrete waste, with different compositions and aggregate types, different granulometric fractions and different conditions of preparation of the waste subject to separation. The output and quality of the separation products obtained were measured using thermogravimetry tests, loss of mass in a muffle, acid attack and microscopic analysis. Finally, mortars with RC incorporation were produced, resulting from the thermo-activation of the cement fraction separated from the concrete waste, which were characterized in the fresh state (workability, density) and hardened (mechanical strength, capillary absorption, and apparent porosity).

From the overall separation process applied to the different types of waste analyzed, it can be concluded that it is possible to obtain about 47% of HQS and 5% of RC, guaranteeing the recovery and improvement of more than 50% of concrete waste. In addition to these high-quality raw materials for the cement-based products industry, the process also generated 20-25% filler and around 20% CDW as by-products. The amount of total waste resulting from the process was less than 20%. Globally, for each ton of concrete waste, it was possible to recover and improve more than 450 kg of sand, 50 kg of RC and 200 kg of filler.

Keywords:

Recycled cement; High-quality sand; Separation method; Cement fraction; Mortars with RC; Concrete waste.

(página intencionalmente deixada em branco

Índice

Declaração	iii
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Organização da dissertação	3
2. Estado de Arte	5
2.1 Impacto ambiental do betão.....	5
2.2 Estratégias de redução do impacto ambiental do betão.....	6
2.3 Tratamento dos resíduos de construção e demolição.....	7
2.4 Métodos de separação	8
2.5 Metodologias de avaliação da qualidade de separação.....	10
2.6 Método de separação desenvolvido no IST.....	10
3. Campanha experimental	15
3.1 Descrição da campanha	15
3.2 Betões e pastas de origem	16
3.2.1 Material.....	16
3.2.2 Composição.....	18
3.2.3 Produção de betão e pasta	18
3.2.4 Características de betão e pasta.....	20
3.3 Libertação dos constituintes do betão	21
3.4 Separação magnética.....	22
3.5 Produção de cimento reciclado	26
3.6 Avaliação da qualidade e rendimento dos produtos separados	28
3.6.1 Análise termogravimétrica.....	28
3.6.2 Ensaio de perda de massa em mufla	29
3.6.3 Ataque ácido.....	30
3.6.4 Análise visual em microscópio digital	30
3.7 Composição e produção de argamassas	31
3.7.1 Materiais.....	31
3.7.2 Composição das argamassas	31
3.7.3 Produção de argamassas	32
3.8 Caracterização de argamassas.....	33

3.8.1	Ensaio no estado fresco	33
3.8.2	Resistência mecânica	35
3.8.3	Absorção capilar	38
3.8.4	Porosidade aparente.....	39
4.	Análise de resultados	41
4.1	Influência de diferentes fatores no método da separação	41
4.1.1	Influência o número de passagens e parâmetros de separação	41
4.1.2	Influência da granulometria	45
4.1.3	Influência do tipo de pré-tratamento (sem lavagem, com lavagem, limpeza por ar).....	52
4.1.4	Influência da compactação do betão de origem.....	53
4.1.5	Influência do tipo de agregado (calcário; granítico).....	54
4.2	Caracterização dos cimentos reciclados	56
4.3	Análise de TG versus PMM	60
4.4	Balanço do processo de separação	61
4.5	Caracterização das argamassas no estado fresco	64
4.5.1	Espalhamento.....	65
4.5.2	Massa volúmica fresca e teor de vazios	67
4.6	Caracterização das argamassas no estado endurecido.....	69
4.6.1	Resistência mecânica	69
4.6.2	Porosidade aparente.....	71
4.6.3	Absorção capilar	73
5.	Conclusões	76
5.1	Principais resultados.....	76
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	79
	Anexo I	A

Índice de Figuras

Figura 1 – Tipologia de partículas obtidas através da separação	12
Figura 2 – Misturadora de eixo vertical para a produção de BO	19
Figura 3 – Moldagem de provetes de BO para posterior reciclagem – provetes de 15x15x30 cm ³	19
Figura 4 – Produção de PO em recipiente de 50 litros e utilizando berbequim misturador	19
Figura 5 – Moldagem de provetes de PO para posterior reciclagem – provetes cúbicos de 15 cm ³	19
Figura 6 – Cura de provetes de BO em atmosfera exterior até idade de reciclagem	20
Figura 7 – Cura de provetes de PO em atmosfera exterior até idade de reciclagem	20
Figura 8 – Determinação da massa volúmica fresca do BO e PO	21
Figura 9 – Determinação do abaixamento do BO e PO	21
Figura 10 – Britadeira de maxilas com abertura de 20 mm na base, existente no LC	21
Figura 11 – Britadeira de maxilas pequena, com abertura de 10 mm na base, existente no GEOLAB/IST	21
Figura 12 – Crivagem de material em peneiro com malha de 1 mm	22
Figura 13 – Moinho de rolos existentes no GEOLAB/IST	22
Figura 14 - Imagem ilustrativa do equipamento utilizado e do processo de separação magnética preconizado no presente trabalho	23
Figura 15 - Equipamento utilizado para a separação magnética dos materiais	23
Figura 16 - Exemplo de separação magnética, com efetiva separação dos constituintes de betão (Bogas et al., 2021)	23
Figura 17 - Divisor para ajuste do ponto de separação da trajetória dos diferentes tipos de partículas	23
Figura 18 – Peneiração com lavagem prévia	24
Figura 19 – Peneiração a seco sem lavagem	24
Figura 20 – Peneiração a seco com auxílio de ar comprimido	24
Figura 21 - Primeira etapa de limpeza da mica nos detritos de betão com agregado de natureza granítica	25
Figura 22 - Segunda etapa de separação dos detritos de betão com agregado de natureza granítica, visando a purificação da fase cimentícia.	25
Figura 23 – Fluxograma dos métodos de libertação e separação	26
Figura 24 - Moinho de bolas pequeno horizontal utilizado na moagem do resíduo de cimento recuperado do BO para produção de CR.	27
Figura 25 - Moinho de bolas horizontal grande utilizado na moagem do resíduo de cimento recuperado da PO, para produção de CR	27
Figura 26 - Forno rotativo utilizado para a termoativação do cimento reciclado	27
Figura 27 - Equipamento para análises de termogravimetria.	28
Figura 28 - Ataque ácido - Pesagem inicial da amostra (esquerda), ataque ácido e mistura em agitador magnético (centro) e obtenção de resíduo de areia após o ensaio (direita).	30
Figura 29 - Microscópio digital utilizado na análise visual das amostras	31
Figura 30 - Exemplo de imagem recolhida do microscópio digital - amostra de G55	31

Figura 31 - Misturadora de argamassas de eixo vertical.....	33
Figura 32 - Moldagem e compactação das argamassas.....	33
Figura 33 - Ensaio de espalhamento. Após remoção do molde troncocônico (à esquerda) e medição do diâmetro de espalhamento (à direita)	34
Figura 34 - Ensaio de massa volúmica fresca da argamassa.....	35
Figura 35 - Prensa Form+Test Seidner 505/200/10 DM1 utilizada nos ensaios de compressão e flexão	36
Figura 36 - Ensaio à flexão	37
Figura 37 - Rotura à flexão.....	37
Figura 38 - Ensaio à compressão.....	37
Figura 39 - Rotura à compressão	37
Figura 40 - Provetes durante o ensaio.....	39
Figura 41- Nível da água no tabuleiro.....	39
Figura 42 - Porosidade aparente - Exsicador ligado à bomba de vácuo (esquerda), provetes submersos em água(centro) e tubo ligado ao recipiente com água destilada (direita).	40
Figura 43 - Pesagem hidrostática.....	40
Figura 44 - Provete submerso na pesagem	40
Figura 45 - Evolução do rendimento e pureza da fração cimentícia em função do número de passagens (B35SL, fração 250-500 μm)	44
Figura 46 - Percentagem de material retido na mistura de resíduo antes da separação, em função da fração granulométrica (B55, B35 e G55)	46
Figura 47 - Teor de cimento hidratado na mistura de resíduo antes da separação, em função da fração granulométrica (B55, B35 e G55)	46
Figura 48 - Teor de areia siliciosa e agregado calcário na mistura de resíduo antes da separação em função da fração granulométrica: esquerda – B55; direita - B35.....	47
Figura 49 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 125-150 (B55CL) – análise em microscópio digital.....	48
Figura 50 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 150-250 (B55CL) – análise em microscópio digital.....	49
Figura 51 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 250-500 (B55CL) – análise em microscópio digital.....	49
Figura 52 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 500-1000 μm (B55) – análise em microscópio digital	50
Figura 53 - Análise visual da fração não magnética (areia reciclada) após a primeira passagem das frações: 125-250 μm (esquerda); 250-500 μm (centro); 500-1000 μm (direita) – análise em microscópio digital – B55CL.....	51
Figura 54 - Análises TG e DTG do cimento hidratado não tratado resultante da separação dos betões B35, B55 e G55, bem como da pasta P35.....	57
Figura 55 - Análises TG e DTG do ligante reciclado, resultante da separação dos betões B55, B35 e G55 (MB35, MB55, MG55), bem como da pasta P35 (MP35).....	59

Figura 56 - Composição dos CR provindos de B55CL, B55SL e B35, em termos de percentagem de fração de cimento, areia silicosa e agregado calcário (proporções relativas ao resíduo não tratado) .	60
Figura 57 - Esquema do fluxo do processo de separação após moagem e crivagem em diferentes frações granulométricas. Resíduos do B55 sujeitos a diferentes tipos de pré-tratamento: sem lavagem (SL); com lavagem (CL); com ar forçado (AR)	62
Figura 58 - Esquema do fluxo do processo de separação após moagem e crivagem em diferentes frações granulométricas. Resíduos dos diferentes tipos de betão B55, B35 e G55	63
Figura 59 - Resultados dos ensaios de espalhamento das misturas produzidas	66
Figura 60 - Espalhamento das argamassas MB35 (esquerda) e MG55 (direita).....	67
Figura 61 - Resultados dos ensaios de massa volúmica fresca de cada mistura produzida	68
Figura 62 - Provetes de argamassa das composições MB35 (esquerda) e MG55 (direita)	69
Figura 63 - Resistência à compressão média das argamassas produzidas aos 3, 28 e 90 dias de idade	70
Figura 64 - Resistência à flexão média das argamassas produzidas aos 3 e 28 dias de idade.....	70
Figura 65 - Relação entre a porosidade aparente, P_{ab} , e o valor estimado do volume de vazios, V_v , das argamassas	73
Figura 66 - Desenvolvimento de porosidade em pastas com CR proveniente de pastas puras (CRP, à esquerda) e em pastas com CPN (à direita). Esquema indicativo (Real et al. 2020)	74

(página intencionalmente deixada em branco)

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do cimento tipo CEM I 42,5R	17
Tabela 2 - Propriedades dos agregados.....	17
Tabela 3 - Propriedades do superplastificante.....	18
Tabela 4 - Composição de BO com agregados calcários (BOC) e graníticos (BOG)	18
Tabela 5 - Características no estado fresco e endurecido de BO e PO.....	20
Tabela 6 - Composição das argamassas estudadas.....	32
Tabela 7 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55SL, na fração 250-500 μm	43
Tabela 8 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55CL, na fração 150-250 μm	43
Tabela 9 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B35SL, na fração 250-500	44
Tabela 10 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55CL, na fração 125-150 μm	44
Tabela 11 - Parâmetros e rendimentos da separação das várias frações de B55CL.....	47
Tabela 12 - Produtividade do método de separação em função da fração granulométrica do betão B55	51
Tabela 13 - Parâmetros e rendimentos de separação tendo em consideração diferentes tipos de pré- tratamento (SL, CL, AR) – fracções 150-250 μm e 250-500 μm do B55.....	52
Tabela 14 - Parâmetros e rendimentos da separação das várias frações de B35 e B55	53
Tabela 15 - Parâmetros e rendimentos obtidos da separação do G55	55
Tabela 16 - Resultados obtidos do ataque ácido para o betão G55, definidos em termos de percentagem de cimento hidratado em cada passagem	56
Tabela 18 - Perdas de massa por desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), água combinada (W_B) e respectivo grau de hidratação (α_H) para os resíduos de P35, B35, B55 e G55, no estado hidratado não termoactivado.....	57
Tabela 19 – Perdas de massa por desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), água combinada (W_B) e respectivo grau de hidratação (α_H) para os ligantes reciclados CRB55, CRB35, CRG55 e CRP35.	59
Tabela 20 - Estimativa do teor de pasta pelo ensaio de TG e PMM nos resíduos separados de B55SL, B35 e G55	61
Tabela 21 - Espalhamento, massa volúmica fresca (MV_i) e teor de vazios (V_v)	65
Tabela 22 - Valores médios de resistência à compressão, fcm, e flexão, fctm, das argamassas (MPa)	69
Tabela 23 - Valores médios da porosidade aparente, P_{ab} , e das massas volúmicas real, MV_{real} , e aparente, MV_{ap} das argamassas	72
Tabela 24 - Absorção capilar média aos 20 minutos, 6 horas e 72 horas, e coeficiente de absorção (CA) das argamassas	73

(página intencionalmente deixada em branco)

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

BO	Betão de origem
CR	Cimento Reciclado
CPN	Cimento Portland
DTG	Termografia diferencial
GEOLAB/IST	Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST
HQS	Areia de elevada qualidade
LC	Laboratório de construção
PO	Pasta de origem
RCD	Resíduos de construção e demolição
SP	Superplastificante
PMM	Perda de massa em mufla
TG	Análise termogravimétrica
TRL	Technology readiness level
SL	Material sem lavagem
CL	Material sujeito a lavagem prévia
AR	Material com tratamento de ar comprimido
PMM	Perda de massa em mufla
TG	Análise termogravimétrica
TRL	Technology readiness level
PO_0.35	Pasta de cimento com a/l 0,35
BOC_0.35	Betão com agregados calcários com a/l 0,35
BOC_0.55	Betão com agregados calcários com a/l 0,55
BOG_0.55	Betão com agregados graníticos com a/l 0,55
P35	Pasta depois de moída
B35	Betão depois de libertação e crivagem nas frações granulométricas proveniente do BOC_0.35
B55	Betão depois de libertação e crivagem nas frações granulométricas proveniente do BOC_0.55
G55	Betão depois de libertação e crivagem nas frações granulométricas proveniente do BOG_0.55
MCPN	Argamassa com cimento Portland
MP35	Argamassa obtida do PO_0.35
MB35	Argamassa obtida do BOC_0.35
MB55SL	Argamassa obtida do BOC_0.55
MB55CL	Argamassa obtida do BOC_0.55 com lavagem

Componentes químicos

CaO	Óxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH	Hidróxido de cálcio
CSH	Silicato de cálcio hidratado

Simbologia

a/l	Relação água/ligante em massa
f _{cm}	Valor médio da resistência à compressão
f _{ctm}	Valor médio da resistência à flexão
CV	Coefficiente de variação

Unidades

m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
h	Hora
min	Minuto
s	Segundo
MPa	Megapascal
N	Newton
ton	Tonelada
kg	Quilograma
g	Grama
°C	Graus Celsius
T	Tesla
A	Ampere

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

O crescimento acelerado das grandes áreas urbanas veio potenciar o desenvolvimento da indústria da construção. A construção é um setor que tem contribuído fortemente para a evolução da economia e tem influenciado diretamente ou indiretamente outras atividades. A dinamização alcançada tem introduzido um relevante impacto no contexto económico e social, mas também numa perspetiva ambiental, com influência na modificação do meio, no consumo de energia, de água e de recursos naturais, bem como na geração de resíduos associados e a emissão de gases com efeito de estufa. A gestão de resíduos e a sustentabilidade têm sido dois dos principais temas de debate na construção, tendo por objetivo fomentar uma economia verdadeiramente circular, em que se incentiva a reutilização dos resíduos de construção (RCD) em novos produtos.

O betão é o material mais utilizado na construção, sendo responsável por um elevado consumo de matérias-primas e a geração de mais de 30% do volume total de RCD (Shi et al., 2016; B. Wang et al., 2021). Este material tem ainda como principal constituinte o cimento, associado a um elevado consumo energético e à emissão significativa de CO₂, representando 7% das emissões globais em todo o mundo (Neves et al., 2017, Sousa & Bogas, 2021). Como tal, a indústria do betão tem sido particularmente exigente na procura de novas soluções que permitam reduzir o elevado impacto ambiental do betão, e que estejam alinhadas com o ambicioso objetivo do *EU green deal* [5], de atingir a neutralidade climática em 2050.

Entre outras estratégias, uma das alavancas para reduzir a pegada ambiental do betão e da indústria da construção, consiste na procura de soluções efetivas para a reutilização dos RCD, evitando a sua deposição em aterro. No entanto, até aos dias de hoje, a reutilização tem-se limitado essencialmente à aplicação em produtos de baixo valor, como betões pobres, soluções de enchimento ou recuperação paisagística (Sharma et al., 2021; Deloitte, 2017). Este facto, resulta dos atuais RCD apresentarem uma grande variabilidade e heterogeneidade dos seus constituintes, permanecendo um produto de muito baixa qualidade. Assim, apenas conseguindo a individualização dos vários constituintes, de modo que estes recuperem as suas propriedades originais, é possível alcançar resíduos de elevada qualidade, que fomentem a sua reutilização. Isso explica, por exemplo, a fraca reutilização de agregados reciclados de betão, pois a não remoção efetiva da pasta aderida nos agregados naturais prejudica as suas propriedades (European Aggregates Association, 2020). De facto, atualmente a separação efetiva dos resíduos de betão ainda permanece um objetivo não alcançado, pelo menos a nível industrial.

Recentemente, no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico foi desenvolvido e patenteado um método de separação dos constituintes do betão, tendo por base o trabalho pioneiro de (Hu, 2019). Esse estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto EcoHydb (PTDC/ECI-CON/28308/2017, (Bogas et al., 2021)), em que o presente trabalho também se insere. O objetivo consistia na obtenção de uma areia de melhor qualidade, com reduzida quantidade de pasta aderida, e uma fração cimentícia

de elevada pureza. A obtenção de areia de melhor qualidade tem como objetivo a sua reintegração em materiais de base cimentícia, como o betão. A fração cimentícia pode ser termoativada de modo a ser produzido cimento reciclado, o que conduz a uma potencial redução de 60% nas emissões de CO₂ associadas à produção do cimento corrente (Carriço et al., 2020). Este último tópico tem sido alvo de vários trabalhos de investigação desenvolvidos no nosso departamento, inseridos no âmbito do projeto EcoHydb (Bogas et al., 2021).

Porém, apesar da contribuição inovadora de (Hu, 2019), vários aspetos ficaram por abordar, como por exemplo a validação da metodologia a diferentes tipos de betão, a influência e otimização dos principais parâmetros de separação, a influência da granulometria e tipo de pré-tratamento dos resíduos de betão antes de se proceder à sua separação e a aplicação dos materiais separados em novos produtos de base cimentícia. Desse modo, é necessária investigação adicional que possa contribuir para a validação e aplicação do método idealizado. Foi neste pressuposto que o presente trabalho foi planeado e desenvolvido.

1.2 Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como principal objetivo a aplicação e análise da metodologia de separação, patenteada no âmbito do projeto EcoHydb, a diferentes tipos de resíduos de betão, visando separar os constituintes do betão endurecido para a obtenção de cimento reciclado (CR) e areia reciclada de elevada qualidade (HQS), bem como a produção e a caracterização de argamassas com a incorporação de CR.

O trabalho envolveu essencialmente 3 fases: (1) produção e preparação dos resíduos de betão; (2) avaliação do método de separação; e (3) caracterização de argamassas produzidas com o cimento reciclado resultante do método de separação. A separação dos constituintes do betão foi realizada por recurso a um rolo magnético permanente de alta intensidade, considerando a otimização de diversos parâmetros de separação (abertura do divisor, velocidade do tapete e frequência do alimentador).

Numa perspetiva de estender o domínio de validade da metodologia de separação proposta e alargar o seu âmbito de aplicação, foram considerados diferentes tipos de betão, com distinta composição e tipo de agregado (calcário, granito), e foram analisadas diferentes condições de preparação dos detritos de betão sujeitos a separação (sem lavagem – SL; com lavagem – CL; com limpeza por ar - AR). Nesta fase, o método de separação foi otimizado para diferentes frações granulométricas, no sentido de aumentar o rendimento e a qualidade. A avaliação do rendimento e da qualidade dos produtos de separação obtidos foi aferida com recurso à termogravimetria (TG), à perda de massa em mufla (PMM), ao ataque ácido e à análise microscópica.

Numa última fase do trabalho procedeu-se à caracterização das argamassas produzidas com os diferentes tipos de CR, termoativados a partir da fração cimentícia dos vários resíduos de betão resultantes do método de separação. O desempenho do CR obtido diretamente dos resíduos de betão é comparado com o cimento reciclado produzido a partir de pastas de referência, de maior pureza. As argamassas foram caracterizadas no estado fresco, em termos de trabalhabilidade e de massa

volúmica, e no estado endurecido, em termos de resistência mecânica e de porosidade (absorção capilar e porosidade aparente).

O presente trabalho pretende dar continuidade ao estudo de investigação iniciado por Hu (2019), que se insere no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECI-CON/28308/2017, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos:

- O capítulo 1, de introdução, visa enquadrar o impacto ambiental do betão, enunciar os principais objetivos do trabalho, e descrever brevemente a principal metodologia seguida na realização do mesmo;
- O capítulo 2 contextualiza e justifica a necessidade de tratamento e separação de resíduos, com vista à implementação efetiva da reutilização e reciclagem no sector da construção, numa perspetiva de economia circular. Adicionalmente, são apresentados alguns trabalhos sobre o tema, destacando-se a investigação desenvolvida no IST que conduziu à idealização de um novo método de separação, recentemente patenteado, e que foi a base da realização do presente trabalho;
- No capítulo 3 é descrita a campanha experimental, que envolveu diferentes etapas referentes à produção do betão de origem, tratamento e libertação mecânica dos constituintes do betão, implementação do método de separação magnética, produção do cimento reciclado e produção e caracterização de argamassas com incorporação deste ligante. Neste capítulo apresentam-se as características dos vários materiais utilizados e descrevem-se os vários ensaios realizados ao longo da campanha experimental;
- No capítulo 4 são apresentados e discutidos os vários resultados obtidos, tendo em consideração a influência de diferentes fatores no método de separação, o novo cimento reciclado produzido e a sua incorporação em argamassas. As argamassas foram analisadas no estado fresco e endurecido;
- O capítulo 5 apresenta as considerações finais e as propostas de desenvolvimento futuro.

(página intencionalmente deixada em branco)

2. Estado de Arte

Neste capítulo são abordadas algumas estratégias que têm vindo a ser implementadas no sentido de mitigar o impacto ambiental negativo associado à produção do betão, visando introduzir uma prática de economia circular, apostada na reciclagem e na reutilização. Adicionalmente, é efetuada uma breve exposição sobre o tratamento dos resíduos de construção e de demolição e os métodos existentes para a separação destes constituintes.

Por fim, são apresentados os principais estudos realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil, que conduziram ao desenvolvimento do método de separação patenteado no IST, aplicado no presente trabalho.

2.1 Impacto ambiental do betão

As cidades e os centros urbanos desempenham um papel relevante na economia global, pois concentram mais de metade da população mundial e estão em permanente crescimento. Segundo a *Ellen MacArthur Foundation* [1], os materiais de construção e os edifícios são responsáveis por mais de 1/3 do consumo de recursos no mundo, mas apenas 20 a 30% dos resíduos de construção e demolição são alvo de reciclagem ou de reutilização. Esta informação confirma que o crescimento dos meios urbanos tem provocado uma forte pressão no consumo dos recursos naturais, que não sendo infinitos, requer uma ação sustentada na procura de metodologias em economia circular.

O betão é o material mais utilizado na construção sendo a base da maioria das infraestruturas existentes. No entanto, é um material com grande pegada ecológica. O seu elevado impacto é essencialmente atribuído à produção de cimento que representa cerca de 80-90% da totalidade de emissão de CO₂ envolvida no fabrico de betão (Yang et al., 2014; Hu et al., 2020).

Como prioridade na redução do impacto negativo, a indústria da construção deve aplicar economias eficientes e cimentos sustentáveis. A inclusão de agregados reciclados no betão, provenientes de resíduos de construções, demolidas tem vindo a ser alvo de investigação e de estudos específicos. Por enquanto, ainda não se encontrou uma solução ideal para o problema pois a emissão de CO₂ está intimamente associada à produção de *clínquer*. As principais abordagens para reduzir a emissão de CO₂ na produção de cimento Portland são (Barcelo et al., 2014; Carriço et al., 2020):

- o aumento da eficiência energética no processo produtivo;
- o uso de combustíveis alternativos;
- a substituição de parte do clínquer (em alguns casos acima de 50%) por outro produto (pozolanas, cinzas volantes, sílica de fumo, escória de alto-forno e fíler calcário);
- captura e armazenamento de carbono

Combinando todas estas medidas, satisfazem plenamente as metas propostas pelos organismos *Concrete Sustainability Initiative (CSI)*[2] e *International Energy Agency (IEA)*[3].

A produção do cimento, a partir do cimento hidratado reciclado, permite que o material recupere as propriedades de hidratação, evitando assim a emissão de CO₂ neste processo. Os estudos anteriores consultados demonstraram um menor desempenho mecânico do cimento reciclado (CR) em

comparação com cimento Portland de igual composição (Real et al., 2020; Bogas et al., 2020). Uma questão importante no CR é a necessidade de água que conseqüentemente reduz a trabalhabilidade do material (Bogas et al., 2019; Carriço et al., 2020). A produção de CR a partir de resíduos do betão foi proposta e investigada por vários autores (Bogas et al., 2019; He et al., 2019; Wang et al., 2018).

A pesquisa desenvolvida no âmbito do projeto EcoHdyb, financiado pela Fundação Nacional para a Ciência e Tecnologia, visa potenciar a indústria cimenteira, na condução de desafios concretos de gestão de resíduos através do desenvolvimento de uma solução técnica para a produção de CR. Este procedimento constitui um impulso relevante na tendência em curso da incorporação de resíduos na indústria de cimento (CEMBUREAU, 2016) ao permitir:

- produzir cimento sem consumir matéria-prima natural usando apenas resíduos de betão;
- evitar a emissão de calcinação, por reativar termicamente os componentes de cimento hidratado;
- reduzir a temperatura necessária no processo de produção e, portanto, diminuir o consumo de combustível;
- produzir agregados finos reciclados de qualidade elevada, por separação da pasta de cimento dos agregados. (Sousa & Bogas, 2021)

O principal desafio é transformar estes materiais, de uma forma viável, na obtenção de cimento reciclado sem comprometer a qualidade dos produtos (Margarida et al., 2015). O conceito de economia circular tem como base um modelo económico organizado num sistema de circuito fechado de produção e consumo. Considera mecanismos dos ecossistemas naturais, que gerem os recursos num processo contínuo de reabsorção e reciclagem. Assim, assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, num processo integrado.

2.2 Estratégias de redução do impacto ambiental do betão

Na sequência da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) [4], nomeadamente o ODS 12 que tem como objetivo reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização. A União Europeia tem vindo a estabelecer metas no que diz respeito à reciclagem (Diretivas de Resíduos).

Em 2018, a UE estabeleceu novas metas relativamente à reciclagem, resíduos de embalagens e aterros, as quais fomentam um desenvolvimento mais sustentável no contexto da economia circular. Em março de 2020, apresentou um plano de ação referente à introdução de uma melhor gestão de recursos. Em fevereiro de 2021, o Parlamento europeu aprovou um conjunto de medidas adicionais para atingir uma economia neutra em termos de carbono, sustentável, livre de substâncias tóxicas e totalmente circular até 2050. O novo plano de ação inclui regras de reciclagem mais rigorosas com metas obrigatórias para a utilização e consumo de materiais até 2030.

Este plano de ação aponta sete setores essenciais para alcançar uma economia circular destacando os edifícios e a construção, pois de acordo com um relatório de 12 de fevereiro de 2021, o setor da construção produz cerca de 36,4 % dos resíduos gerados na União Europeia.

A um nível governamental a implementação destes modelos de gestão de resíduos são assegurados pela Agência Portuguesa do Ambiente que procura promover a eficiência na utilização dos recursos, baseada na hierarquização dos resíduos e no conceito atual de Economia Circular. Em Portugal tem sido concretizada diversa legislação de modo a implementar a estratégia da economia circular (Resolução do Conselho de Ministros nº 32/2016 de 3 de junho e Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) 2017-2020 (Resolução do Conselho de Ministros 190-A/2017).

Ainda no âmbito do conceito de economia circular, foi criado o projeto europeu CLOSER com o propósito de aumentar a reutilização e reciclagem dos materiais provenientes da demolição ou reabilitação de edifícios. Este projeto tem como parceiros o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a Agência Portuguesa do Ambiente e o Instituto dos Mercados Públicos do Imobiliário e da Construção, financiado pela *EEA Grants*. (financiamento do Espaço Económico Europeu) (Martins et al., 2022).

O principal objetivo do projeto é a elaboração e a implementação de um guia nacional para apoiar as auditorias de pré-demolição e/ou reabilitação de edifícios, contribuindo para melhorar a qualidade e a confiança nos materiais de construção obtidos a partir de resíduos e construção e demolição (RCD) e, assim, minimizar a sua contaminação. No âmbito do projeto foram reunidas as melhores práticas de diferentes países quanto à aplicação de auditorias de pré-demolição e efetuada uma avaliação das condicionantes e potencialidades do processo. As condicionantes mais relevantes consideram:

- A deficiente triagem na origem;
- A aplicação de práticas incorretas de desconstrução;
- A falta de orientação técnica para o uso de material reciclado;
- A desconfiança na qualidade dos materiais reciclados.

Como potencialidades acrescidas surgem:

- O recurso de tecnologias mais atuais na gestão de RCD;
- A promoção do mercado de materiais reutilizados e reciclados;
- A separação dos materiais que contêm substâncias perigosas para prevenir a contaminação de materiais a recuperar;
- A melhoria da qualidade dos recursos recuperados através da identificação dos tipos e quantidade de materiais presentes na demolição ou reabilitação;
- A apresentação de soluções de utilização que conduzam ao fecho de ciclos dos materiais recuperados.

2.3 Tratamento dos resíduos de construção e demolição

Os materiais RCD geram mais de 3 bilhões de toneladas em todo o mundo, incluindo os resíduos de betão (Akhatr & Sarmah, 2018). Existem muitos resíduos na construção provenientes de várias fontes:

- Os materiais provenientes das demolições;
- Os materiais de sobras constituindo desperdícios;
- Os materiais que resultam do aparecimento de patologias no edificado e que provocam a redução da sua vida útil, consumindo mais matéria-prima na reparação e manutenção e, como, consequência gera mais resíduos.

Um dos obstáculos à reciclagem de RCD é a diversidade de materiais que os constituem. Os RCD são compostos por betão, cerâmica, gesso, madeira, plásticos, vidro entre outros, criando um forte condicionante para a recuperação do cimento reciclado (CR) e da areia elevada qualidade (HQS) (Bogas et al., 2021). Na Europa, são produzidas mais de 1 bilião de toneladas de areia, o que perfaz cerca de 1/3 do valor total do consumo agregado (UEPG, 2020). Por isso, têm sido feitas pesquisas para encontrar alternativas à areia natural (Kirthika et al., 2020).

Os constituintes dos RCD diferem na sua proporção e propriedades, limitando a fácil utilização de HQS. Neste âmbito, recentes estudos têm sido feitos para melhorar a qualidade da areia reciclada (HQS), com base na análise dos métodos utilizados no processamento dos detritos do betão, que ainda não são eficientes na remoção de pasta de cimento envolvente (Mistri et al., 2020), o que compromete as características da areia. Outra abordagem consiste na tentativa de modificar a HQS, reduzindo a porosidade da pasta aderida, nomeadamente, a carbonatação forçada, a biodeposição, a adição de pozolana e a impregnação de silicato de sódio e emulsões poliméricas. Mas este procedimento permite apenas a reutilização de RCD como HQS e não para CR e não tem apresentado contributos significativos, nem em termos económicos, nem na produção industrial. Portanto, a abordagem mais adequada para a reutilização dos RCD deve envolver metodologias de separação que individualizem os vários tipos de resíduos.

2.4 Métodos de separação

A indústria de construção tem vindo a desenvolver diversos métodos dirigidos à separação dos constituintes do betão. A investigação atual está essencialmente orientada para a obtenção de agregados limpos de elevada qualidade, não considerando a reutilização do cimento reciclado. Suportada no conhecimento das propriedades físicas do betão, a separação pode ser efetuada por processos mecânicos, térmicos, químicos e por gravidade (Akbarnezhad & Ong, 2013):

- As técnicas de separação mecânica envolvem etapas de britagem, impacto e moagem, estas são fáceis de aplicar e permitem a remoção parcial da pasta aderida ao agregado, sem afetar as suas propriedades. Para uma remoção mais eficiente da pasta, as etapas de britagem são seguidas de moagem autogénea (moinho de bolas) para promover o desgaste das partículas (Bogas et al., 2021). Outra técnica de moagem consiste na utilização de um moinho com cilindros rotativos concêntricos, em que as partículas de betão são friccionadas entre as paredes de ambos os cilindros. A eficiência de cada técnica está relacionada com a resistência da argamassa e tipo de agregado do material a reciclar. Por exemplo, para agregados mais macios, como o calcário, as frações finas podem ser altamente contaminadas pela presença de cal em pó.

- Os métodos de separação térmica podem ser mais eficazes, mas também consomem muita energia. O resíduo de betão é aquecido a 300-600 °C e depois submetido a uma ação mecânica ou à crivagem após arrefecimento. A posterior moagem do material aquecido apresenta uma elevada eficiência na separação, mas um grande impacto económico e ambiental, longos tempos de execução e mudanças nas características físicas e mecânicas dos constituintes (Niry et al., 2013). Contudo, Al-Bayati et al. (2016) referem que o agregado deve ser sujeito apenas a temperaturas entre os 300-350 °C, pois pode ficar danificado com temperaturas muito elevadas. No entanto, segundo (Bogas et al., 2019), a remoção da pasta aderida pode ser efetuada a temperaturas abaixo dos 400 °C.
- A separação por gravidade (usando líquidos com densidade específica) permite uma separação direta dos seus constituintes, apesar da dificuldade da proximidade de massa volúmica dos seus constituintes. Foram estudados os métodos da Mesa *Wilfley* e da Mesa *Mozley* (Hu, 2019). A técnica de separação da Mesa *Wilfley* consiste numa mesa oscilatória, que consoante um fluxo de água e inclinação, separa as partículas com base na diferença de densidades, tamanho e forma dos materiais. A Mesa *Mozley*, semelhante à Mesa *Wilfley*, difere na estrutura, mas contém os mesmos princípios. Ambas apresentaram resultados razoáveis na separação das componentes do betão, principalmente na individualização da matriz cimentícia.
- Os métodos químicos (usando ataque ácido da pasta aderida) são dispendiosos, nocivos para o ambiente, de difícil aplicação e envolvem etapas complexas de limpeza e de descontaminação. Estes métodos não permitem a reutilização da matriz cimentícia pois destrói a pasta aderida e não são viáveis para betões com agregados calcários.

Podem ainda ser considerados outros métodos de menor aplicação. O processo baseado em ultrasons, que consiste numa descarga de pulso elétrico de alta tensão, que envolve um elevado consumo energético e é de difícil implementação industrial (Katz, 2004). A técnica micro-ondas, recorre ao conhecimento das propriedades dos agregados apresentarem características dielétricas diferentes da pasta cimentícia, e, portanto, os constituintes do betão respondendo com diferentes taxas de aquecimento, geram um gradiente de tensões diferenciais que levam à separação entre o agregado e a matriz cimentícia (Lippiatt & Bourgeois, 2011). Estes dois métodos não são rentáveis e são de difícil implementação a uma escala industrial.

Contudo, apesar da investigação que tem vindo a ser desenvolvida, ainda não há consenso em relação a um método de separação dos constituintes do betão totalmente viável e eficaz. Os métodos atuais são caros, consomem muita energia e muitas vezes os produtos estão bastante contaminados. Além disso, os métodos existentes são essencialmente limitados à recuperação de HQS grosseiro. No entanto, a areia fina afeta as propriedades do betão de forma mais negativa que a areia grossa, devido ao maior teor em pasta associado. Para além disso, é de considerar que o custo da areia natural tem vindo a aumentar significativamente. O presente trabalho pretende contribuir para o estabelecimento de um método inovador mais eficaz para a produção de areia reciclada mais limpa.

2.5 Metodologias de avaliação da qualidade de separação

Os materiais resultantes dos processos de separação aplicados, são submetidos a ensaios com o objetivo de determinar o grau de pureza. Os métodos mais utilizados são os ensaios de análise termogravimétrica (TG), de difração de raios X, análise microscópica e de ataque ácido:

- A análise termogravimétrica (TG) permite avaliar a quantidade de cimento em cada fração. O ensaio requer a utilização de uma balança de alta precisão, que permita relacionar as variações de massa com a temperatura ou com o tempo, à medida que a amostra a analisar é submetida a um programa de temperatura e atmosfera controlados (Carriço et al., 2021);
- A difração de raios X é usada para identificar e quantificar fases cristalinas, através das reflexões produzidas pelas diferentes fases presentes. Serve também para avaliar a presença ou quantificar as fases amorfas ou nanocristalinas, tipicamente presentes nos materiais cimentícios (Hu, 2019). Contudo a quantificação dos constituintes cimentícios é uma tarefa complexa, necessitando de muitos padrões e experiência analítica.;
- A análise microscópica (lupa binocular) permite uma primeira avaliação visual do grau de libertação alcançado pelos métodos e eficiência da separação magnética. O equipamento permite a observação nítida de partículas com um tamanho mínimo de 100 μm , mas vai perdendo visibilidade no sentido das partículas mais pequenas (Carriço et al., 2021).
- O ataque ácido é utilizado para a determinação do teor em areia nas frações. O ácido ataca (dissolve) os componentes cimentícios, sobretudo os produtos carbonatos, deixando uma fração residual. Quando os agregados são calcários, o resíduo é apenas areia. (Carriço et al., 2021).

2.6 Método de separação desenvolvido no IST

Recentemente, no Departamento de Engenharia Civil, do IST, foi desenvolvido um processo inovador para a separação dos componentes do betão endurecido resultante de detritos de construção e demolição para a obtenção de cimento reciclado.

Aproveitando as diferenças de propriedades magnéticas dos constituintes do betão, o conceito reside na separação dos constituintes do betão através do uso de um rolo composto por ímanes permanentes de terras raras de alta intensidade. Por um lado, os minerais mais comuns, nos agregados, são o quartzo, o feldspato e a calcite, que têm características diamagnéticas e que, portanto, são fracamente repelidos na direção oposta à intensidade de campo (Rosenblum & Brownfield, 2000; Svoboda, 2004). Em oposição, o cimento é um material paramagnético com suscetibilidade magnética positiva que é atraído pelo campo magnético de maior intensidade (Gopalakrishnan et al., 2012). Este efeito é causado pela presença de óxidos de ferro nas fases ferrosas do cimento hidratado e não hidratado. Devido à fraca suscetibilidade magnética do cimento, apenas separadores de alta intensidade e alto gradiente são adequados, como aqueles feitos de ímanes de terras raras, como considerados nesta metodologia (Carriço et al., 2021).

Os resíduos de betão devem ser previamente moídos para promover a libertação dos constituintes do betão e reduzir as forças de gravidade. No entanto, a separação não é viável para partículas de

dimensão inferior a 150 μm (Carriço et al., 2021). Os métodos existentes são mais dirigidos à fase de libertação, seguidos de processos de peneiração, conduzindo a elevados níveis de contaminação. O método patenteado permite alcançar uma etapa de separação dos resíduos mais refinada, possibilitando obter um produto mais puro (Bogas et al., 2021). A separação magnética é menos afetada pela densidade e geometria das partículas do que a classificação com fluxo de ar (é um método em que o fluxo do ar, quando aplicado contra as partículas, permite efetuar uma divisão suportada na diferença de densidade dos componentes). A separação magnética, quando comparada com outros procedimentos, é uma metodologia mais económica e mais verde.

O método inovador patenteado é adequado para a reciclagem do betão pelo baixo consumo de energia, pois não exige sistemas de refrigeração durante a sua utilização e conseqüentemente com baixo impacto ambiental. Adicionalmente, o método apresenta um baixo custo de instalação e utilização. Este método de separação mecânica envolve duas fases:

Inicialmente é efetuada a fase de libertação dos constituintes do betão, através da triagem dos materiais que fazem parte dos RCD e que não vão ser recuperados, nomeadamente, elementos cerâmicos, a areia, poeiras, madeira, plástico, papel e metais. A triagem é realizada com separadores de ar, métodos de aspiração, métodos de separação gravítica e crivagem. Este processo é aplicado após a etapa de britagem e de crivagem, para a separação de materiais;

Numa segunda fase é efetuada a individualização da fração magnética e não magnética através do processo de separação magnética. Para a separação das armaduras de betão são usados separadores magnéticos convencionais de baixa intensidade. No entanto, esta separação não faz parte do procedimento proposto, pois a patente só se refere à separação dos constituintes do betão, a partir de resíduos RCD constituídos por materiais cimentícios.

O procedimento propõe a separação dos constituintes do betão endurecido resultante de detritos de construção e demolição. Na patente estão considerados dois métodos de britagem:

O primeiro processo tem como objetivo a separação e recuperação do cimento endurecido, que tem como desvantagem a não recuperação de agregado grosso reciclado obtendo apenas agregados limpos e de melhor qualidade (Figura 1).

Os resíduos são colocados numa britadeira de maxilas grande, que simula o processo de tratamento industrial dos RCD, e que reduz o betão a partículas de dimensão até 20 mm. O material de dimensão inferior a 1 mm é reservado para ser submetido posteriormente a um processo de crivagem. O restante material é colocado numa britadeira de maxilas pequena de forma a reduzir as partículas até 12 mm de tamanho. Nesta fase, se o material tiver resíduos cerâmicos ou de betão, pode ser sujeito a um processo de separação magnética;

De seguida, as partículas superiores a 1 mm são sujeitas a duas passagens no moinho de rolos intercalado com a crivagem no peneiro de 1 mm. A execução de 3 passagens é considerada adequada;

Na separação magnética, os materiais magnéticos com dimensão inferior a 1 mm são submetidos a crivagem em frações granulométricas entre 150 μm e 1 mm, seguidos de uma separação magnética.

Finalmente as partículas inferiores a 1 mm são separadas nas seguintes frações granulométricas: <150 µm, 150-250 µm, 250-500 µm e 500-1000 µm. Como a separação é afetada pela presença de partículas finas e de pó, o material pode ser lavado e seco em estufa a 80 °C, antes de ser passado no rolo. O material retido no peneiro de 1 mm não é significativo. O maior grau de libertação é atingido em frações inferiores a 1mm pois contêm a maior quantidade de cimento. No entanto, as partículas inferiores a 150 µm também apresentam um baixo desempenho pois são afetadas por outros efeitos, como por exemplo, a adesão ao rolo e a mudança de trajetória devido a convexões do ar;

Sob o rolo de separação está disposto um divisor, cuja abertura pode ser manualmente regulada, e permite dividir o material magnético do material não magnético. Este divisor é ajustado tendo em conta a trajetória feita pelas partículas, que depende da granulometria, velocidade do tapete e suscetibilidade magnética do material. É realizada a individualização da matriz cimentícia dos restantes constituintes do betão. No processo, é eliminado inicialmente o material não magnético, abrindo o divisor e com uma velocidade rápida, tentando obter um agregado de boa qualidade com pouca pasta aderida. Depois o material é retido na parte magnética e é novamente passado pelo dispositivo, com uma abertura mais fechada e, portanto, a uma velocidade menor. Assim, é obtido um material magnético mais puro (cimento reciclado). O material é triturado no moinho de bolas para ser reduzido a uma dimensão inferior a 125 µm. Depois o material é recolhido e armazenado o mais hermeticamente possível para ser termoativado e obter o cimento reciclado.

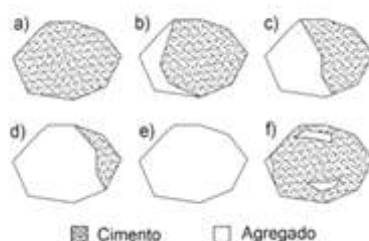


Figura 1 – Tipologia de partículas obtidas através da separação

Como o betão é composto maioritariamente por agregados (material não magnético, no caso de ser carbonatado) é proposto outro método. O segundo processo tem como objetivo obtenção de agregados finos e grossos reciclados e da fração de cimento endurecido, permitindo assim a produção de betões completamente reciclados ao nível do agregado e ligante. Este tem como desvantagem uma etapa extra de separação térmica e moagem que aumenta os custos de exploração e um prolongamento de tempo de processamento do material separado:

Igualmente, é necessário aplicar um processo de britagem para a obtenção de partículas com uma dimensão inferiores a 20 mm. Se forem identificados resíduos de material cerâmico é aplicada uma a separação magnética, ainda, nesta fase;

Posteriormente, os detritos de betão de dimensão superior a 1 mm, são aquecidos a 400 °C num forno rotativo, durante um período de cerca de 2 horas, provocando, após arrefecimento, a separação dos componentes.

O material é, de seguida, sujeito a moagem, durante cerca de 30 min, e submetido a uma ação de crivagem em distintas frações granulométricas (<150 µm, 150-250 µm, 250-500 µm, 500-1000 µm, 1-12 mm, >12 mm);

Os resíduos superiores a 12 mm apresentam uma menor percentagem de partículas com reduzida contaminação de cimento, sendo assim aconselhável reduzir o agregado até frações inferiores a 12 mm. As frações entre 1 e 12 mm apresentam uma boa limpeza de agregado para a maioria das partículas;

Finalizado o procedimento de moagem, todos os materiais inferiores a 1 mm são sujeitos a crivagem húmida, separação magnética, moagem e termoativação. O material não magnético e o restante material acima de 1 mm é reutilizado como agregado reciclado de melhor qualidade.

Em relação ao método descrito, apenas uma parte desta tecnologia inovadora foi alcançada (Bogas, 2021). Os estudos subsequentes devem tentar analisar como otimizar e escalar o procedimento proposto.

O método foi testado apenas para um tipo de betão calcário feito em laboratório, que foi moído, lavado e seco antes da separação. O intervalo de validade deve ser estendido para resíduos de betão com outras composições (diferentes relações a/l (água/ligante), agregado silicioso, cimentos misturados). Para aumentar o rendimento de separação e garantir a continuidade do processo, podem ser dispostos vários rolos permanente de forma sequencial.

Seguindo esta linha de investigação, o trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende acrescentar valor à proposta otimizando o processo para diversos betões, no sentido de conseguir a obtenção de cimento reciclado, a partir de resíduos de construção e demolição.

(página intencionalmente deixada em branco)

3. Campanha experimental

A campanha experimental, aplicada no trabalho, teve como principal objetivo efetuar a separação dos constituintes do betão endurecido, para a obtenção de cimento reciclado (CR) e areia reciclada de elevada de qualidade (HQS), bem como a produção e a caracterização de argamassas com a incorporação de CR. A metodologia de separação foi definida e avaliada tendo por base o método patenteado no âmbito da atividade realizada no projeto FCT EcoHydb, ainda em curso.

Após uma breve descrição das etapas seguidas na campanha, é apresentada a produção dos betões e da pasta de origem, que serviram de base à obtenção dos detritos sujeitos a reciclagem. É descrita a metodologia de separação adotada, tendo por base as diferentes etapas de britagem, moagem, crivagem e separação magnética, com o recurso ao rolo permanente de alta intensidade. São descritos os diversos ensaios de caracterização considerados na avaliação do rendimento e da qualidade de separação, nomeadamente, da perda de massa em mufla, termogravimetria, ataque ácido e análise microscópica. Finalmente, é descrita a metodologia adotada para a produção do cimento reciclado e para a produção e caracterização de argamassas produzidas com este ligante.

A campanha experimental foi realizada maioritariamente no Laboratório de Construção (LC) e no Laboratório de Geociências e Geotecnologias (GEOLAB), disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior Técnico, durante o período compreendido entre fevereiro de 2021 e abril de 2022.

3.1 Descrição da campanha

A campanha experimental definida para este trabalho teve como objetivo a aplicação e a avaliação da metodologia de separação patenteada, no âmbito do projeto EcoHydb, a diferentes tipos de resíduos de betão. Numa perspetiva de ampliar e validar a metodologia proposta foram utilizados diferentes tipos de betão, com distinta composição e tipo de agregado, e foram analisadas distintas condições de preparação dos detritos de betão sujeitos a separação (lavagem, limpeza por ar, não tratado). Para tal, o trabalho experimental foi estruturado em três fases essenciais:

- produção do material de origem submetido posteriormente a reciclagem;
- caracterização do rendimento e grau de pureza dos materiais separados;
- avaliação da capacidade resistente do cimento reciclado produzido a partir do método de separação, considerando os estudos de caracterização em argamassas.

Assim, numa fase inicial foram produzidos betões de origem (BO) que visavam ser representativos de betões correntes de moderada a elevada resistência, e que podem ser identificados na maioria dos edifícios existentes. Para tal, foram trabalhados betões com coeficiente a/l de 0,55 e 0,35, produzidos com agregados de origem calcária e granítica. Simultaneamente, foi produzida uma pasta de origem (PO) de referência, com idêntica composição à do BO de a/l de 0,35, de modo a avaliar o máximo potencial do cimento reciclado. Contudo, não foram produzidas pastas adicionais com a/l de 0,55, pois este tipo de betão foi alvo de estudo por Hu (2019). No presente trabalho foram consideradas as seguintes composições:

- um betão com agregado calcário com relação a/l de 0,35 e 0,55 (BOC_0.35 e BOC_0.55);

- um betão com agregado granito com relação a/l de 0,55 (BOG_0.55);
- pasta de cimento com relação a/l 0,35 (PO_0.35),

Os provetes de betão foram submetidos a um período mínimo de 3 meses de cura. De modo a poder obter as matrizes cimentícias representativas de betões antigos, as amostras foram mantidas adequadamente hidratadas, durante aquele período. De seguida, foram aplicadas, inicialmente, a fase de libertação mecânica, por britagem, moagem e crivagem e, posteriormente, o método de separação magnética, considerando a metodologia patenteada descrita.

Nesta fase, foi avaliada a metodologia proposta tendo em consideração diferentes tipos de betão e de agregado, alargando o âmbito de aplicação e validação do método face ao inicialmente abrangido no trabalho de Hu (2019). O trabalho envolveu também uma análise mais detalhada da aplicabilidade do método a diferentes frações granulométricas, com o objetivo de otimizar a sua eficiência em termos de qualidade e rendimento de separação. De modo a atingir uma metodologia energeticamente e ecologicamente mais eficiente, foram ainda exploradas e avaliadas novas formas de pré-tratamento dos resíduos de betão, antes de serem sujeitos à separação. A caracterização e avaliação da qualidade de separação, teve em consideração a realização de ensaios de perda de massa em mufla, temogravimetria, ataque ácido e análise microscópica, conforme abordado nos próximos pontos.

Finalmente, após a avaliação da qualidade de separação, procedeu-se a uma fase demorada de separação e produção de resíduo de cimento suficiente para que após a sua termoativação e obtenção de cimento reciclado fosse utilizado na produção de argamassas. O objetivo foi avaliar o potencial do cimento reciclado obtido diretamente de betão e compará-lo face ao cimento reciclado produzido a partir de pastas de referência, de maior pureza. As argamassas foram caracterizadas no estado fresco (massa volúmica, trabalhabilidade) e endurecido, tendo em conta ensaios mecânicos (resistência à compressão e flexão) e de análise de porosidade (absorção capilar e porosidade aparente).

3.2 Betões e pastas de origem

Na produção dos diferentes betões e pasta de origem foram selecionados os materiais aplicados, caracterizada sua composição e analisado o material em estado fresco e endurecido.

3.2.1 Material

Para a produção da pasta de origem (PO) e betão de origem (BO) foi utilizado o cimento do tipo CEM I 42,5R fornecido pela empresa SECIL, localizada em Outão, Portugal. As características do cimento apresentam-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do cimento tipo CEM I 42,5R

Propriedade	Norma	Tempo de cura	CEM I 42,5R
Massa volúmica (kg/m ³)	LNEC E64 (1979)	-	3070
Superfície específica mássica de Blaine (cm ² /g)	NP EN 196-6 (2010)	-	4437
Resíduo de peneiração < 45 µm (%)	NP EN 196-6 (2010)	-	6,8
Resistência à compressão da argamassa de referência (MPa)	NP EN 196-1 (2006)	1 dia	16,8
		2 dias	28,8
		7 dias	43,6
		28 dias	57
Expansão (mm)	NP EN 196-3 (2006)	-	1
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	NP EN 196-2 (2006)	-	18,64+5,34+3,05
CaO+MgO (%)	NP EN 196-2 (2006)	-	62,80+1,80
CaO+MgO livre (%)	NP EN 451-1 (2006)	-	0,7+0,9
Tempo de presa (min)	NP EN 196-3 (2005)	Início	170
		Fim	280
Perda de massa por descarbonatação (%)	NP EN 196-2 (2014)	-	2,7
Perda ao fogo (950°)	NP EN 196-2 (2014)	-	2,54

Os BO foram produzidos com agregados grossos de origem calcária e granítica. No primeiro caso, foi utilizada a Brita 2, a Brita 1 e o Bago de arroz proveniente da Pedreira do Galo, em Sesimbra. No BO de origem granítica foram utilizados agregados graníticos proveniente de uma pedreira em Montemor. Para ambos os BO foram utilizados dois tipos de agregados finos de origem siliciosa, areia grossa de Pinhal do Conde, Seixal e areia fina da Herdade da Mesquita, Sesimbra. Na Tabela 2 resumem-se as principais características destes agregados.

Tabela 2 - Propriedades dos agregados

Propriedades	Norma	Agregados naturais					
		Siliciosos		Calcários		Graníticos	
		Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	Fino	Grosso
Absorção de água às 24h (%)	EN 1097-6 (2013)	0.15	0.26	0.31	0.46	0.21	0.08
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	EN 1097-6 (2013)	2598	2599	2683	2650	2751	2765
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	EN 1097-6 (2013)	2602	2606	2691	2662	2756	2767
Baridade seca em amostra não compactada (kg/m ³)	EN 1097-3 (1998)	1588	1606	1420	1462	1324	1423
Índice de vazios (%)	EN 1097-3 (1998)	39.1	38.4	47.5	45.5	52.1	48.7

Na produção do BO de reduzida relação a/l (0,35) foi ainda usado um material superplastificante de base policarboxílica fornecido pela empresa BASF Construction Chemicals, SA, cujas características se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do superplastificante

Propriedade	Superplastificante
Peso específico a 20°C (kg/cm³)	1038±0,02
pH	6±1
Viscosidade Brookfield a 20°C (cps)	<70
Teor de cloreto (%)	<0,1

3.2.2 Composição

Os BO foram produzidos com relação a/l de 0,35 e 0,55 no caso dos betões com agregado calcário e com relação a/l de 0,55, quando se considerou agregado granítico. Deste modo foi possível abranger betões de moderada a elevada resistência correntemente utilizados em estruturas existentes. A PO foi produzida apenas com relação a/l de 0,35. As composições utilizadas apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição de BO com agregados calcários (BOC) e graníticos (BOG)

Composição	a/c	Areia fina (kg/m³)	Areia grossa (kg/m³)	Bago de arroz (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Brita 2 (kg/m³)	Cimento (kg/m³)	Água (L/m³)
BOC_0.35	0.35	194	370	200	255	683	450	157.5
BOC_0.55	0.55	190	398	250	250	671	360	198
BOG_0.55	0.55	216	333	-	370	708	360	198

3.2.3 Produção de betão e pasta

Os BO foram produzidos numa misturadora de eixo vertical, conforme ilustrado na Figura 2. As britas e as areias foram colocadas na misturadora com 50% da quantidade total de água da mistura. Depois de misturar durante 2 minutos, a pasta ficou a descansar durante 1 min antes de ser adicionado o cimento e a restante água. Nas composições em que foi utilizado o superplastificante, a sua adição foi efetuada de um modo lento, ao longo de 1 min, diluído em 10% de água da mistura. O tempo total necessário para ser realizada a mistura foi de 7 minutos.

As pastas de cimento foram produzidas em recipientes cilíndricos com 50 L de capacidade, recorrendo a um berbequim misturador (Figura 4). Inicialmente, foi adicionada metade da quantidade de água e a totalidade do cimento e misturados durante 4 minutos. De seguida, foi gradualmente adicionada a restante água durante 4 minutos, até ser atingir uma pasta de adequada homogeneidade.



Figura 2 – Misturadora de eixo vertical para a produção de BO



Figura 3 – Moldagem de provetes de BO para posterior reciclagem – provetes de 15x15x30 cm³

Em seguida, procedeu-se à moldagem de provetes com 15x15x30 cm³ e de provetes cúbicos de 15cm de lado, como se ilustra nas Figuras 3 e 5, respetivamente. Para cada amassadura foram ainda produzidos 3 provetes cúbicos de BO e de PO, que foram ensaiados em termos de resistência à compressão aos 28 dias.



Figura 4 – Produção de PO em recipiente de 50 litros e utilizando berbequim misturador



Figura 5 – Moldagem de provetes de PO para posterior reciclagem – provetes cúbicos de 15 cm³

Após a moldagem, os vários provetes foram cobertos com uma película plástica e curados nos moldes até 24 horas, idade em que se procedeu à descofragem e à subsequente cura ao ar, em ambiente exterior ao laboratório (Figuras 6 e 7).



Figura 6 – Cura de provetes de BO em atmosfera exterior até idade de reciclagem



Figura 7 – Cura de provetes de PO em atmosfera exterior até idade de reciclagem

3.2.4 Características de betão e pasta

Para a determinação das características do betão BO e da pasta PO foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido. A trabalhabilidade foi avaliada através da medição do espalhamento de acordo com a EN 12350-2 (2009) (Figura 9), e a massa volúmica fresca, conforme o princípio indicado na EN 12350-6 (2009) (Figura 8). A Tabela 5 apresenta os valores obtidos de espalhamento, massa volúmica e resistência à compressão em cada uma das misturas de origem produzidas.

Tabela 5 - Características no estado fresco e endurecido de BO e PO

Tipo de agregado	a/c	Espalhamento (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
BOC_0.35	0.35	13	2380	80.7
BOC_0.55	0.55	15	2350	46.2
BOG_0.55	0.55	15	2400	54.3
PO_0.35	0.35	-	2070	79.5

Os BO foram produzidos com abaixamento entre 13 a 15 cm, enquadrando-se na classe S3, de acordo com a norma EN 12350-2 (2009). Para a mesma relação a/l o betão com agregados graníticos apresentaram maior massa volúmica que o betão com agregados calcários, devido à maior massa volúmica dos seus agregados. Ao contrário do que poderia ser esperado, o betão com granito apresentou uma maior resistência à compressão, o que indicia a participação do agregado granítico na resistência mecânica. Por análise da superfície de rotura, este efeito foi verificado apenas nos agregados com forma mais alongada e achatada.



Figura 8 – Determinação da massa volúmica fresca do BO e PO



Figura 9 – Determinação do espalhamento do BO e PO

3.3 Libertação dos constituintes do betão

O processo de libertação dos constituintes do betão foi realizado com recurso a sucessivas etapas de britagem e moagem realizadas no Laboratório de Construção (LC) e Laboratório de Geociências e Geotecnologias (GEOLAB/IST), nas instalações do DECivil do IST.

Após um período mínimo de 90 dias, os provetes de PO e BO foram sujeitos a uma primeira britagem realizada na britadeira de maxilas do LC, permitindo reduzir os blocos de betão a partículas de dimensão inferior a 30mm (Figura 10). Este processo simula o processo de britagem usualmente efetuado após receção dos resíduos de construção e demolição (RCD) em empresas gestoras de resíduos. Em seguida, o material foi transportado para o GEOLAB/IST, onde foi sujeito a uma segunda britagem em britadeira de maxilas de menor abertura, com cerca de 10 mm à base (Figura 11).



Figura 10 – Britadeira de maxilas com abertura de 20 mm na base, existente no LC



Figura 11 – Britadeira de maxilas pequena, com abertura de 10 mm na base, existente no GEOLAB/IST

Após britagem, o material obtido foi peneirado num crivo com malha de 1 mm (Figura 12), tendo sido obtido um material de granulometria superior para o moinho de rolos (Figura 13). Este contém cilindros concêntricos, que fazem com que as partículas de betão sejam friccionadas entre as paredes de ambos os cilindros, facilitando a remoção dos elementos finos de pasta. No moinho, com uma distância entre rolos de 2-3 mm, o material foi sujeito a uma passagem. A taxa de alimentação foi suficientemente lenta de modo a garantir que a quantidade de material em contacto com o rolo formasse uma camada aproximadamente monogranular, de espessura da ordem da máxima dimensão do agregado. Após a primeira passagem, o material foi novamente crivado no peneiro de 1 mm, e o material de granulometria superior foi submetido a uma segunda passagem. Este processo foi repetido pelo menos 3 vezes, de modo a garantir que o desperdício de material acima de 1 mm fosse reduzido. Para o BOC_0.55, BOC_0.35 e BOG_0.55 esse desperdício foi de 8%, 12% e 16%, respetivamente. O maior desperdício no BOG resulta da maior dureza e dificuldade de moagem dos betões com agregado granítico.



Figura 12 – Crivagem de material em peneiro com malha de 1 mm



Figura 13 – Moinho de rolos existentes no GEOLAB/IST

Em seguida, o material obtido após o processo mecânico de cominuição foi sujeito ao processo de separação apresentado em 3.4.

3.4 Separação magnética

A separação dos constituintes de betão foi realizada com base na metodologia desenvolvida e patenteada no âmbito do projeto EcoHydb (Bogas et al., 2021). Este processo, igualmente apresentado em (Hu, 2019) tem por base a utilização de rolos magnéticos permanentes fabricados a partir de ímanes de terras raras, nomeadamente de NdFeB (Neodímio-ferro-boro).

O equipamento de separação é constituído por um alimentador, onde é colocado o material que se pretende separar, por um tabuleiro vibratório que permite a deposição do material em monocamada e a sua condução para um tapete rolante, o rolo magnético permanente responsável pela sujeição do material a forças de desvio magnéticas e um divisor, que permite a separação do material consoante as suas características magnéticas (Figura 14). O rolo magnético tem um diâmetro de 100 mm, uma espessura de 1,5 mm e uma largura de 250 mm. A intensidade na superfície do rolo é de 1,4 T, a

intensidade na superfície do tapete é 0,8 T e a intensidade do campo magnético entre eles é 1 T. O divisor é regulado manualmente consoante as características físicas e magnéticas do material. Na Figura 15 apresenta-se o separador magnético construído para o presente trabalho, no âmbito do projeto EcoHydb.

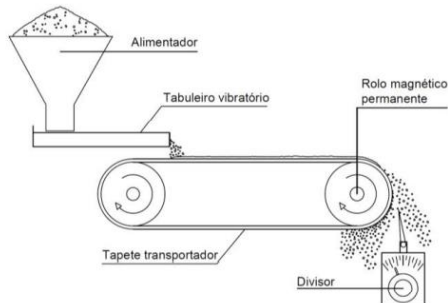


Figura 14 - Imagem ilustrativa do equipamento utilizado e do processo de separação magnética preconizado no presente trabalho



Figura 15 - Equipamento utilizado para a separação magnética dos materiais

Basicamente, a separação é realizada por via seca, aproveitando o facto de o betão ser constituído por materiais com diferentes características magnéticas. Neste caso, a matriz cimentícia inclui compostos com Fe na sua constituição, como é o exemplo de C_4AF (Ferro aluminato tetra cálcio), e apresenta fracas características paramagnéticas, enquanto o agregado, composto essencialmente por calcite, quartzo e feldspato, apresenta características diamagnéticas. Assim, na presença de um campo magnético de alta intensidade, as partículas de cimento tendem a desviar a sua trajetória no sentido do rolo magnético, enquanto as restantes partículas são apenas sujeitas às forças de gravidade, seguindo uma trajetória mais aberta (Figura 16). Posicionando o divisor na posição correta, e partindo de um material com uma adequada libertação, é possível separar os constituintes do betão. Este processo é simples e de baixo consumo de energia e de reduzido impacto ambiental, sendo afetado pelas características dos materiais sujeitos a separação. De facto, durante a separação atuam em simultâneo, forças magnéticas, gravíticas (de inércia), de adesão e de fricção que afetam a trajetória das partículas, obrigando ao ajuste da velocidade do rolo e abertura do divisor (Bogas et al., 2021; Hu, 2019).



Figura 16 - Exemplo de separação magnética, com efetiva separação dos constituintes de betão (Bogas et al., 2021)



Figura 17 - Divisor para ajuste do ponto de separação da trajetória dos diferentes tipos de partículas

De modo a reduzir a influência da forma e massa volúmica das partículas, o material deve ser previamente peneirado em diferentes frações granulométricas, reduzindo a diferença de dimensão entre partículas. No presente trabalho, foram consideradas as seguintes frações granulométricas, avaliando-se aquelas para as quais a libertação e separação foi mais efetiva: 75-125 μm ; 125-150 μm ; 150-250 μm ; 250-500 μm ; 500-710 μm ; 710-1000 μm . Os resultados obtidos desta análise permitem definir gamas ótimas de trabalho dos materiais reciclados, visando a sua purificação para uma melhor reutilização na construção.

Para partículas muito finas e materiais húmidos, a eficiência de separação pode ser significativamente afetada, devendo-se então limitar a mínima dimensão do agregado e o seu teor de humidade (ausência de água superficial, (Bogas et al., 2021)). De acordo com o processo inicialmente experimentado e validado por (Hu, 2019), os resíduos de betão devem ser previamente lavados e depois secos em estufa, de modo a garantir frações granulométricas de dimensão homogénea e baixas forças de adesão entre partículas. Durante o processo, as diferentes frações são separadas por lavagem de forma manual, conforme ilustrado na Figura 18. Neste caso, a crivagem termina quando a água através do peneiro escorre de forma limpa. Com esta metodologia fica garantida uma menor aderência de partículas muito finas nas partículas de maior dimensão, bem como a ausência de humidade na sua superfície. Um problema relacionado com este processo é que é energeticamente bastante penalizante, reduzindo a atratividade e aplicabilidade do mesmo (Sousa & Bogas, 2021). Assim, em alternativa, no presente trabalho foi considerada ainda a peneiração a seco (Figura 19), de modo a analisar a perda de eficiência e rendimento que resulta de se evitar esta etapa no processo de separação.

Finalmente, foi considerada ainda uma metodologia nova que envolve a limpeza a seco e crivagem dos agregados através da utilização de ar comprimido (Figura 20). Esta metodologia tem claras vantagens em termos de consumo energético e impacte ambiental, pretendendo-se avaliar a sua eficiência neste trabalho.



Figura 18 – Peneiração com lavagem prévia



Figura 19 – Peneiração a seco sem lavagem



Figura 20 – Peneiração a seco com auxílio de ar comprimido

O processo de separação de cada fração granulométrica consistiu em realizar uma primeira passagem em que se privilegiou a obtenção de material não magnético pouco contaminado, ou seja, adotando uma abertura menor do divisor (ficando mais longe da superfície do rolo). A razão de se adotar esta estratégia está relacionada com o facto da quantidade de material não magnético no betão (agregado) ser bastante superior à do material magnético (fração cimentícia). Assim, quando é efetuada a segunda passagem, visando purificar a fração magnética, trabalha-se com uma quantidade bastante mais reduzida de material o que aumenta a eficiência e rendimento do método (menor tempo de utilização). No presente trabalho foram realizadas até 3 passagens do material magnético, avaliando-se para cada tipo de betão e composição o rendimento e qualidade de separação atingido em cada uma delas.

A exceção a este procedimento ocorreu nos betões com agregados de natureza granítica, pela primeira vez testados no âmbito deste trabalho. De facto, dado que o agregado granítico contém na sua composição materiais ferromagnesianos de características paramagnéticas (mica, (Kendall & Yeo, 1948), é necessário considerar uma etapa de separação adicional. Neste caso, a mica apresenta uma suscetibilidade magnética superior à do cimento, o que obrigou a adotar uma estratégia diferente. Assim, realizou-se uma primeira passagem exclusivamente para separar a mica dos restantes constituintes do betão, adotando uma abertura elevada (divisor perto da superfície do rolo, de modo a separar a fração muito magnética), (Figura 21). Foi considerada ainda uma maior velocidade do tapete e menor frequência do tabuleiro, visto que se verificou que, estes fatores favoreciam a retenção de maior quantidade de mica menos contaminada por cimento na fração magnética. Após esta primeira fase de limpeza, para o restante material adotou-se a mesma metodologia definida para os betões de agregado calcário (Figura 22), visando obter uma fase de agregado e de mistura cimentícia mais purificada.



Figura 21 - Primeira etapa de limpeza da mica nos detritos de betão com agregado de natureza granítica.



Figura 22 - Segunda etapa de separação dos detritos de betão com agregado de natureza granítica, visando obter agregado pouco contaminado.

Apresenta-se um fluxograma, na Figura 23, dos métodos utilizados para a separação dos constituintes do betão.

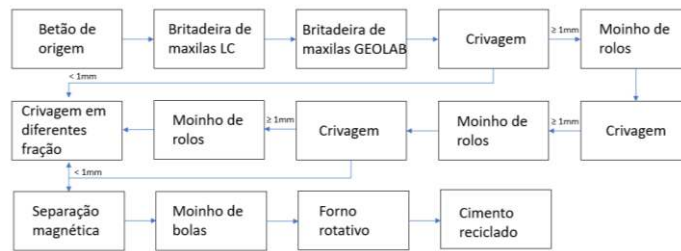


Figura 23 – Fluxograma dos métodos de libertação e separação

3.5 Produção de cimento reciclado

Tendo por base o estudo realizado em 3.4 e cujos resultados se apresentam no capítulo 4, concluiu-se que a fração 250-500 μm conduzia ao melhor compromisso de rendimento e qualidade de material separado para os detritos de betão analisados. Assim, optou-se por considerar o material cimentício resultante da separação desta fração granulométrica na produção de cimento reciclado a utilizar no estudo com argamassas.

Após a aplicação da metodologia referida em 3.4 e a obtenção de uma quantidade suficiente de material separado, procedeu-se à produção do cimento reciclado. Inicialmente, o resíduo cimentício com dimensão entre 250 e 500 μm foi moído num moinho horizontal pequeno com auxílio de esferas metálicas, de modo a se obter uma granulometria mais próxima da utilizada nos cimentos correntes (Figura 24). A moagem foi realizada com auxílio de 365 esferas metálicas, durante cerca de 2 horas, tendo-se adicionado um aditivo de moagem para facilitar a dispersão das partículas e assim garantir uma maior eficiência do processo e uma maior finura final. Após a moagem, o material foi vedado em sacos de plástico espessos de modo a evitar fenómenos indesejáveis de carbonatação do resíduo (Real et al., 2020).

Em paralelo, foi produzido cimento reciclado a partir da PO, adotando-se neste caso um moinho horizontal de maior dimensão (Figura 25). Isso justifica-se pelo facto de o material produzido ter sido também adotado na realização de outro trabalho no âmbito do projecto EcoHydb. Neste caso, foram utilizadas 525 esferas de diâmetro compreendido entre 20 e 30 mm. A moagem foi realizada durante cerca de 2 horas, tendo-se utilizado igualmente aditivo de moagem para facilitar o processo.



Figura 24 - Moinho de bolas pequeno horizontal utilizado na moagem do resíduo de cimento recuperado do BO para produção de CR.



Figura 25 - Moinho de bolas horizontal grande utilizado na moagem do resíduo de cimento recuperado da PO, para produção de CR.

Após a moagem do material provindo da separação do BO ou da PO, procedeu-se à termoativação do mesmo. O tratamento térmico foi realizado num forno elétrico rotativo, fabricado especificamente para este efeito pela *ThermoLab Scientific Equipments* (Figura 26). Tendo por base estudos prévios realizados no âmbito do projecto EcoHydb (Real et al., 2020; Guilherme et al., 2021), definiu-se uma curva térmica para o processo de termoativação: rampa de aquecimento de 10°C/min até 150°C; retenção do material a esta temperatura durante 1h; aquecimento do material até 650°C, adotando a mesma taxa de aquecimento até 150°C; retenção do material à temperatura máxima durante 3h; arrefecimento lento no forno até à temperatura ambiente. Após o tratamento térmico, o material foi recolhido e vedado em sacos de plástico até à sua utilização na produção de argamassas, de modo a evitar fenómenos indesejáveis de pré-hidratação e carbonatação do cimento reciclado (Real et al., 2020).



Figura 26 - Forno rotativo utilizado para a termoativação do cimento reciclado

3.6 Avaliação da qualidade e rendimento dos produtos separados

De modo a avaliar o rendimento e o grau de contaminação dos materiais submetidos ao processo de separação, foram realizados diferentes tipos de ensaios de caracterização, nomeadamente de termogravimetria, perda de massa em mufla, ataque ácido e análise visual em microscópio digital. Nos próximos pontos descrevem-se esses ensaios.

3.6.1 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica é uma técnica que permite medir a variação de massa da amostra em função da temperatura e do tempo. O equipamento é constituído por uma fonte de calor, uma balança de alta precisão, uma unidade de controlo e uma unidade de registo. Da análise de resultados é obtida a termografia diferencial (DTG), através da primeira derivada da variação de massa em função do tempo e temperatura. As regiões de variação acentuada de perda de massa (picos no DTG) estão associadas a alterações composicionais, permitindo dar indicações da composição dos materiais.

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior Técnico, tendo sido utilizado o equipamento *TGA Hitachi STAT7200* (Figura 27). O ensaio foi realizado para uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto, tendo-se efetuado medições entre 20 °C e 950 °C em atmosfera de azoto. Este ensaio foi realizado apenas nas frações cimentícias 250-500 µm, obtidas da separação dos constituintes de betão, bem como no material resultante da PO com a/c de 0,35. Os ensaios foram realizados nos produtos moídos antes e após a sua termoativação.



Figura 27 - Equipamento para análises de termogravimetria.

Para estimativa da quantidade de pasta na amostra, determinou-se a perda de massa entre 150°C e 350°C, visto que esta região está associada à desidratação de aluminatos e silicatos de cálcio hidratados do cimento (C-S-H), (Bogas et al., 2020; Angulo et al., 2015). Por sua vez, numa amostra com apenas agregado, a perda de massa nesta região de temperatura não é significativa. Assim, por comparação é possível estimar a quantidade de pasta e o grau de contaminação de uma dada amostra.

A partir deste ensaio é também possível determinar o grau de hidratação do cimento, α_H , tendo em conta a expressão (3.1). Em que W_B é a quantidade de água combinada, estimada pelo valor de perda de massa entre 105°C e 550°C (desidratação de CSH e desidroxilação do CH) adicionado de uma parcela correspondente a $0,41 \times (L_{dc} - L_{dca})$, onde L_{dc} é a perda de massa por descarbonatação (entre 550°C e 950°C) e L_{dca} é a perda de massa por descarbonatação do cimento anidro (inclui filer calcário,

que não resultou da carbonatação ao longo do tempo do CH (Real et al., 2020). Para L_{dca} admite-se um valor de 2.7% de acordo com a Tabela 1. O fator de 0,41 corresponde ao quociente entre os pesos molares (g/mol) da água ($P_{H_2O}=18,015$) e do CO_2 ($P_{CO_2}=44,01$). W_N é a máxima quantidade água de hidratação do cimento, assumindo-se de forma simplificada como sendo equivalente a 0,23 da massa de ligante (Tamàs & L. Balázs, 1996).

$$\alpha = \frac{W_B}{W_N} [\%] \quad (3.1)$$

3.6.2 Ensaio de perda de massa em mufla

O ensaio de perda de massa em mufla (PMM) foi utilizado como uma alternativa à análise termogravimétrica, devido ao elevado número de amostras e à limitada disponibilidade do equipamento de TG. Esta técnica permite de forma mais expedita, mas menos rigorosa, estimar a perda de massa entre 150 °C e 350 °C, sendo possível quantificar o teor de material cimentício em cada fração resultante da separação, conforme explicado em 3.6.1.

O equipamento necessário para a realização deste ensaio é formada por uma mufla, cadinhos cerâmicos, um exsiccador e uma balança de alta precisão (até 3 casas decimais). O procedimento consistiu em submeter uma amostra de cerca de 10 g de material a diferentes temperaturas e monitorizar de forma descontínua a sua perda de massa. As amostras, colocadas em cadinhos cerâmicos, foram inicialmente submetidas a 150 °C durante 1h, com uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min. De seguida o cadinho foi colocado num exsiccador com uma atmosfera de baixa humidade relativa durante 15 min para arrefecer até à temperatura ambiente, tendo-se posteriormente procedido à sua pesagem. Em seguida, os cadinhos foram colocados novamente na mufla e submetidos a uma temperatura de até 350 °C, para uma velocidade de aquecimento de 10°C/min e um tempo de residência de 1 hora e 15 minutos. Neste caso, o material arrefeceu primeiro na mufla durante 15 min e depois no exsiccador, onde esteve cerca de 25 min antes de se realizar a pesagem. A percentagem de pasta de cimento contida na amostra foi calculada através da expressão (3.2):

$$\%pasta = \frac{L_M - L_A}{L_p - L_A} \quad (3.2)$$

Em que:

L_M – Perda de massa em cada amostra (% de massa)

L_p – Valor de referência da perda de massa da pasta de cimento de igual composição à da amostra a ser analisada (% de massa)

L_A – Valor de referência da perda de massa dos agregados, em % de massa, considerado de 0.15% (Hu, 2020).

No capítulo 4, os valores obtidos por este método são confrontados com os que se obtêm através da termogravimetria convencional, de acordo com 3.6.1. De agora em diante este ensaio será designado apenas de PMM, de modo a ser diferenciado da análise corrente de TG.

3.6.3 Ataque ácido

Um dos ensaios que nos permite determinar a percentagem de areia siliciosa na amostra é o ataque ácido, visto que ao contrário da pasta cimentícia e do agregado calcário, esta fração é praticamente inerte ao ataque ácido. No presente trabalho foi utilizado ácido muriático ou clorídrico que, como referido, ataca os agregados calcários e o cimento hidratado deixando assim a areia presente na mistura.

O procedimento inicia-se pela secagem de uma amostra de 2 g em estufa a 50°C. Em seguida, retira-se a amostra da amostra, deixa-se arrefecer cerca de 10 min e divide-se a mesma em duas frações para a realização de dois ensaios. Num globé, mistura-se cerca de 1 g da amostra com 50 ml de água destilada e 3 ml de ácido muriático. No agitador magnético deixa-se o ácido atacar a amostra durante alguns minutos (Figura 28) e em seguida são realizadas decantações sucessivas com a adição de água destilada até a amostra atingir um valor de pH superior a 6. Finalmente, o resíduo que resulta do ensaio é seco em estufa a 50 °C e pesado, determinando-se a fração em massa de areia na amostra.



Figura 28 - Ataque ácido - Pesagem inicial da amostra (esquerda), ataque ácido e mistura em agitador magnético (centro) e obtenção de resíduo de areia após o ensaio (direita).

3.6.4 Análise visual em microscópio digital

Com o objetivo de analisar de forma expedita a qualidade da libertação e separação, foram realizadas análises visuais das amostras recorrendo a um microscópio digital, modelo AM7915 MZt da Dino Lite, com resolução de 5MP e ampliação de até 220x (Figura 29). Na Figura 30 apresenta-se um exemplo de uma imagem obtida da fração 250-500 μm do G55, em que se distingue claramente a fração cimentícia de tonalidade cinzenta, a areia de tonalidade creme/amarelada e o agregado granítico marcado pela presença de mica, com cor preta. No caso dos agregados calcários a tonalidade é branca/creme. Os agregados britados (calcário, granito) são ainda caracterizados por apresentarem forma angular que se distingue das partículas de areia de forma mais arredondada e superfície lisa. De modo a melhorar a qualidade da imagem, em alguns casos a amostra foi previamente pulverizada com

álcool etílico. As partículas porosas de pasta cimentícia, quando húmidas, exibem uma tonalidade mais escura.



Figura 29 - Microscópio digital utilizado na análise visual das amostras



Figura 30 - Exemplo de imagem recolhida do microscópio digital - amostra de G55

3.7 Composição e produção de argamassas

Neste subcapítulo apresentam-se os materiais, as composições e a forma como se procedeu à produção das argamassas com incorporação dos materiais estudados e separados ao longo do trabalho.

3.7.1 Materiais

Na produção das argamassas foi utilizado o cimento reciclado produzido de acordo com o referido nas seções anteriores, provindo tanto de BO como da PO, bem como o cimento CEM I 42,5R indicado em 3.2.1, para misturas de referência. Os agregados utilizados foram a areia fina de origem siliciosa da Herdade de Mesquita, Sesimbra, e a areia grossa de origem siliciosa de Pinha do Conde, Seixal. A areia grossa foi previamente peneirada no peneiro 4 mm para não conter partículas demasiado grosseiras. As características destas areias foram apresentadas no ponto 3.2.1.

3.7.2 Composição das argamassas

Neste trabalho foram utilizados diferentes cimentos reciclados, os provenientes de pasta de origem (PO_0.35) e os provenientes de betão de origem (BOC_0.35, BOC_0.55, BOG_0.55), após o procedimento de separação realizado na fração 250-500 μm . Os vários tipos de argamassas foram produzidos com o mesmo a/l de modo que este fator não influenciasse a comparação relativa do desempenho mecânico entre elas. No entanto, como é reportado por vários autores (Bogas et al., 2020; Carvalho, 2021; Shui et al., 2009) o cimento reciclado apresenta uma exigência de água muito superior ao cimento Portland normal, o que obriga a corrigir as misturas com grandes teores de adjuvante para idêntica trabalhabilidade, ou à produção de argamassas de consistência muito distinta. No presente trabalho optou-se pela primeira hipótese, visto que a gama de consistências é muito ampla, conduzindo para o mesmo a/l, a misturas secas com CR e argamassas demasiado fluidas e suscetíveis de exsudar com CEM I. A elevada exigência de água do CR resulta essencialmente da natureza porosa e elevada área superficial do CR (Real et al., 2021).

As argamassas foram produzidas com uma relação a/l de 0,65 e um traço ponderal de 1:3 (ligante:areia), em que a areia era constituída por 35% de areia fina e 65% areia grossa. As areias foram previamente secas em estufa de modo a permitir um melhor controlo da água de mistura. Na Tabela 6 apresentam-se as composições das argamassas produzidas no trabalho. A relação a/l foi definida de modo a se garantir misturas de referência não excessivamente fluídas e argamassas de CR com adequada aplicabilidade após adição de 3-3.5% de superplastificante (SP). O SP utilizado foi o MasterEase 3530, gentilmente fornecido pela empresa BASF.

Tabela 6 - Composição das argamassas estudadas

Argamassa	a/l	SP (%)	M_{cimento} (kg/m³)	M_{água} (kg/m³)	M_{areia grossa} (kg/m³)	M_{areia fina} (kg/m³)
MCPN	0,65	-	447	291	873	470
MP35	0,65	3,5	446	290	871	469
MB35	0,65	3	578	289	867	335
MB55SL	0,65	3	609	289	867	303
MB55CL	0,65	3	594	289	867	319
MG55	0,65	3,5	578	289	867	335

Nas argamassas produzidas com cimento recuperado de betão produzido no laboratório, aumentou-se a dosagem de ligante em detrimento do teor de areia fina, de modo a ter em consideração o facto de este estar contaminado por agregado. Desse modo, garantiu-se que a quantidade de fração cimentícia e relação a/c eram idênticas à das misturas com cimento obtido de PO. No presente trabalho adotou-se uma estratégia diferente, optando-se por aumentar a dosagem de ligante das argamassas com CR provindo de betão, de modo que a relação água/fração cimentícia fosse igual a 0.65, ou seja, dividindo a massa de CP da mistura de referência pela percentagem estimada de pureza do CR.

3.7.3 Produção de argamassas

As argamassas foram produzidas numa misturadora de eixo vertical planetário (Figura 31), conforme a norma EN 1015-2 (1998). Inicialmente, procedeu-se ao humedecimento da cuba da misturadora e adicionou-se a água e o ligante (CEM I ou CR). Na produção de argamassas foi adicionado primeiro a água e de seguida o cimento. Iniciou-se a mistura em modo lento durante 30 segundos e depois adicionaram-se os agregados, primeiro a areia grossa seguindo-se a areia fina. Depois a mistura foi continuada em modo rápido durante 30 segundos, seguido de um período de repouso de 60 segundos. Durante o tempo de repouso raspam-se 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. Nas argamassas com cimento reciclado foi utilizado SP.



Figura 31 - Misturadora de argamassas de eixo vertical.



Figura 32 - Moldagem e compactação das argamassas.

Após a caracterização das argamassas no estado fresco, de acordo com 3.8.1, foram moldados vários provetes prismáticos de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ por cada composição. A moldagem dos provetes foi realizada em duas camadas com recurso a mesa de compactação (Figura 32), tendo sido executadas 60 pancadas em cada camada, conforme especificado na norma NP EN 196-1 (2006). Em seguida os provetes foram cobertos com película aderente e mantidos durante 24h no ambiente de laboratório. Após este período de cura, os provetes foram desmoldados e conduzidos para uma câmara de humidade relativa superior a 95%, onde permaneceram até à idade de ensaio.

Para cada material foram produzidos 6 provetes prismáticos, que foram ensaiados em termos de resistência à compressão e flexão aos 3 e 28 dias de idade. Foi ainda possível produzir 3 provetes prismáticos dos materiais MB35, MB55SL e MB55CL para ensaios à resistência à compressão aos 90 dias de idade. Nas misturas com os cimentos CPN, CRP35 e CRB35 foram ainda produzidos 3 provetes de cada para ensaios de absorção capilar aos 28 dias.

3.8 Caracterização de argamassas

Neste subcapítulo são apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.

3.8.1 Ensaios no estado fresco

No estado fresco as argamassas foram analisadas em termos de espalhamento e massa volúmica.

- Para a determinação da trabalhabilidade das argamassas produzidas, foi realizado o ensaio de espalhamento segundo a norma NP EN 1015-3 (2006), resumindo-se os principais passos em seguida (Figura 33):
 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 33).

O valor final do espalhamento é então determinado pela expressão (3.3).

$$\text{Espalhamento}(mm) = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \quad (3.3)$$



Figura 33 - Ensaio de espalhamento. Após remoção do molde troncocónico (à esquerda) e medição do diâmetro de espalhamento (à direita)

- A massa volúmica fresca foi determinada 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 34).

A massa volúmica pode ser então calculada a partir da expressão (3.4).

$$MV_{fresca} = \left(\frac{m_2 - m_1}{V} \right) \quad (3.4)$$

Em que,

MV_{fresca} - Massa volúmica fresca da argamassa (kg/m^3);

m_1 - Massa do recipiente (kg);

m_2 - Massa do conjunto argamassa+recipiente (kg);

V - Volume do recipiente (1 litro).



Figura 34 - Ensaio de massa volúmica fresca da argamassa

- Tendo em consideração a determinação do valor de massa volúmica fresca da argamassa conforme 3.8.1.2, é possível estimar o volume de vazios de acordo com a expressão (3.5).

$$V_v = 1 - \frac{MV_f}{(1 + T + \frac{a}{l})} \times \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{T}{\rho_{AGR}} + \frac{a/l}{\rho_{\acute{A}GUA}} \right) \quad (3.5)$$

Em que:

V_v – Volume de vazios da argamassa (m^3/m^3)

MV_f – Massa volúmica fresca da argamassa (Kg/m^3)

ρ_L – Massa volúmica do ligante, CEM I ou CR (Kg/m^3)

T – Traço da argamassa (no presente estudo foi de 3)

ρ_{AGR} – Massa volúmica dos agregados (Kg/m^3)

$\rho_{\acute{A}GUA}$ – Massa volúmica da água (Kg/m^3)

3.8.2 Resistência mecânica

Neste subcapítulo descrevem-se os ensaios de caracterização realizados no estado endurecido, nomeadamente de resistência mecânica (flexão e compressão), de absorção capilar e porosidade aparente. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Construção.

O ensaio de resistência à flexão foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11, no equipamento de *Seidner Form+Test D-7950 Riendingen*, modelo 505/200/10 DM1, da Figura 35.



Figura 35 - Prensa Form+Test Seidner 505/200/10 DM1 utilizada nos ensaios de compressão e flexão

Os provetes foram colocados sobre dois apoios cilíndricos afastados um do outro de $100 \pm 0,5$ mm, onde um terceiro cilindro, localizado no topo do provete e equidistante dos cilindros de apoio, exerceram gradualmente uma força até à rotura do mesmo (Figura 36). Os provetes utilizados tinham dimensões de $160 \times 40 \times 40$ mm³. A tensão de rotura à flexão foi calculada segundo a expressão (3.6):

$$f_{ct} = 1,5 \times \frac{F_{ct} \times l}{b \times d^2} \quad (3.6)$$

Em que:

- f_{ct} – Tensão de rotura à flexão [MPa];
- F_{ct} – Carga aplicada a meio vão do provete [N];
- b – Largura da aresta do provete [40 mm];
- d – Espessura da aresta do provete [40 mm];
- l – Distância entre os apoios do equipamento [100 mm].



Figura 36 - Ensaio à flexão



Figura 37 - Rotura à flexão

A seguir ao ensaio da resistência à flexão, cada uma das metades foram utilizadas para a caracterização da resistência à compressão, de acordo com a norma EN 1015-11 (1999). Este ensaio realizou-se no mesmo equipamento que o ensaio da resistência à flexão, onde foi aplicada uma carga até à rotura (Figura 39). Realizou-se o ensaio para os provetes com 3 e 28 dias de idade. As tensões de rotura à compressão são calculadas com a seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F_c}{A} = 0,000625 \times F_c \quad (3.7)$$

Em que:

f_c – Tensão de rotura à compressão [MPa];

F_c – Carga de compressão máxima aplicada [N];

A – Área da secção comprimida [1600 mm²].



Figura 38 - Ensaio à compressão



Figura 39 - Rotura à compressão

3.8.3 Absorção capilar

Na análise da absorção capilar os provetes utilizados estiveram 24 dias em ambiente húmido e mais 3 dias estufa a 50 °C, 24h antes do ensaio foram colocados em ambiente de laboratório envolvidos em película aderente. O ensaio de absorção capilar foi realizado de acordo com a EN 1015-18 (2002), após o período de cura e pré-condicionamento indicado anteriormente. 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. (Figura 40). 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 (Figura 41);
4. Pesar 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 40);
6. Adicionar água ao tabuleiro de maneira que os provetes se mantenham submersos entre 5-10 mm (Figura 41);
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 (3.8).

$$Absorção(kg/m^2) = \frac{(m_i - m_o)}{A} \quad (3.8)$$

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) foi 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 $kg/(m^2min^{0.5})$.



Figura 40 - Provetes durante o ensaio

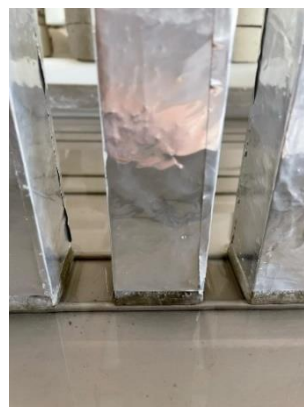


Figura 41- Nível da água no tabuleiro

3.8.4 Porosidade aparente

O ensaio da porosidade aparente foi feito para determinar o volume de poros de uma determinada amostra. Este ensaio foi baseado na norma NP EN 1936 (2008) que foi feita para métodos de ensaio para pedra natural. Neste ensaio foi seguido o seguinte procedimento:

1. Secagem dos provetes em estufa a 70°C durante 48h até atingirem massas constantes;
2. Colocar os provetes num exsiccador contendo sílica gel, de forma a arrefecer os provetes sem reabsorver humidade, durante 2h, para que eles possam atingir a temperatura ambiente (Figura 42);
3. Pesagem dos provetes M_1 ;
4. Colocar os provetes num exsiccador ligado a uma bomba de vácuo durante 24h. O valor máximo atingido pela bomba foi -0.7 bar (Figura 42);
5. Mantendo o vácuo, garantir a introdução lenta de água destilada no interior do exsiccador até completa imersão dos provetes, num período não inferior a 15 min. Ter cuidado de desviar do provete o fluxo de entrada de água e garantir que o nível de água sobe atrás do nível da franja capilar do provete (proвете molhado). Este processo demorou cerca de 4 horas;
6. Manter provetes em completa imersão e em vácuo durante 24h (Figura 42);
7. Desligar a bomba de vácuo para proceder ao restabelecimento da pressão atmosférica, mantendo os provetes submersos por 24h;
8. Pesagem hidrostática dos provetes - M_2 peso hidrostático (Figura 43 e Figura 44);
9. Retirar provetes da água e com o auxílio de um pano húmido, elimina-se a água em excesso;
10. Pesagem dos provetes - M_3 peso saturado.

Porosidade aberta é determinada pela expressão 3.9:

$$P_{ab} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100[\%] \quad (3.9)$$

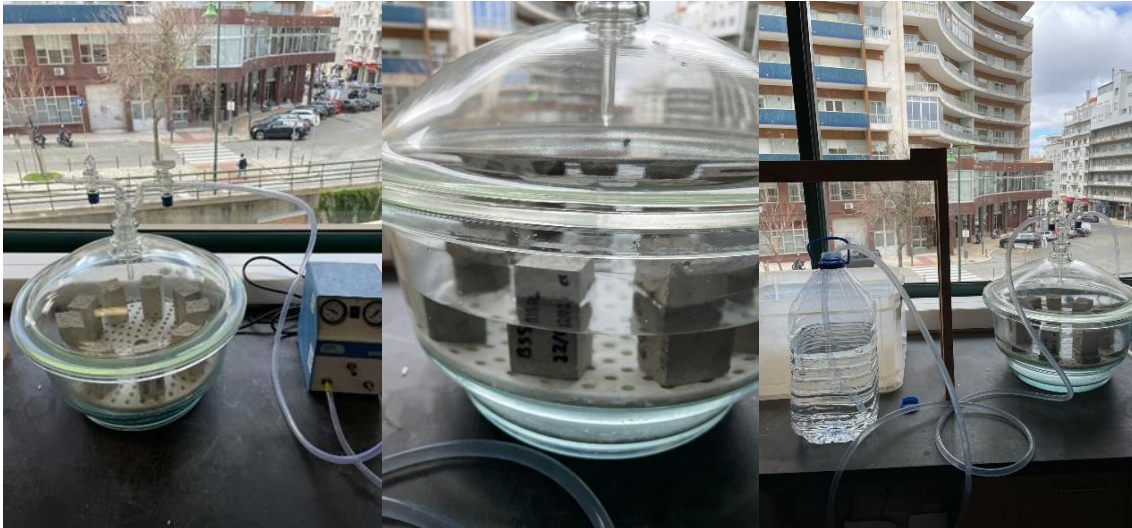


Figura 42 - Porosidade aparente - Exsicador ligado à bomba de vácuo (esquerda), provetes submersos em água(centro) e tubo ligado ao recipiente com água destilada (direita).



Figura 43 - Pesagem hidrostática



Figura 44 - Provetes submerso na pesagem

4. Análise de resultados

No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados referentes aos estudos de separação magnética descritos no capítulo 3, tendo em consideração a influência de diferentes fatores, nomeadamente a fração granulométrica dos resíduos, o número de passagens e parâmetros de separação (abertura, frequência, velocidade), condições de pré-tratamento, e tipo de betão de origem. Em seguida apresenta-se uma visão global do balanço de separação atingido no método proposto neste trabalho, tendo em consideração as diferentes variantes estudadas. Finalmente, a partir da fração de pasta purificada através do método de separação proposto, procedeu-se à termoativação e caracterização de cimento reciclado (CR), que foi posteriormente utilizado na produção de argamassas mais eco-eficientes. A caracterização no estado fresco (massa volúmica, espalhamento e teor de vazios) e endurecido (resistência mecânica, absorção e porosidade) dessas argamassas é discutida tendo em consideração a sua comparação com misturas de referência produzidas com cimento Portland (CPN) ou com CR proveniente de detritos abusivos de pasta cimentícia.

4.1 Influência de diferentes fatores no método da separação

4.1.1 Influência o número de passagens e parâmetros de separação

De acordo com o método de separação magnética descrito em 3.4, foi avaliada a influência de diferentes parâmetros no rendimento e eficiência da separação, nomeadamente a velocidade do rolo, posicionamento do divisor (abertura) e frequência do tabuleiro vibratório de alimentação (explicado em 3.4).

Naturalmente, um maior desvio do divisor no sentido do rolo magnético, associado a uma maior “abertura”, implica uma maior purificação da fração de material magnético, mas uma menor quantidade deste material, o que reduz o rendimento de separação. Dessa forma, importa atingir um bom compromisso entre rendimento e nível de pureza. Por outro lado, o número de passagens vai também aumentar o nível de purificação, visto que aumenta a probabilidade das várias partículas de resíduos entrarem em contacto com o rolo. Finalmente, a velocidade e a frequência têm igualmente um papel importante. O aumento da velocidade do rolo conduz a uma maior quantidade de material separado por hora (maior produtividade), mas a um menor tempo de contacto com o rolo de separação e uma maior força centrífuga que se opõe à força de atração magnética. Por outro lado, a frequência de vibração do tabuleiro alimentador tem de ser suficientemente alta para distribuir as partículas de resíduo em monocamada e aumentar o rendimento/hora de separação, mas deve ser limitada em função da velocidade definida para o tapete rolante, de modo que a distribuição se mantenha homogénea e em monocamada no tapete e na zona de contacto com o rolo magnético. Estes parâmetros, designados de abertura (a), frequência (f) e velocidade (v), definem-se em função da dimensão e tipo de resíduo, pois estas características do material afetam as forças de gravidade e de atrito durante a separação e, como tal, condicionam a trajetória preferida pelas partículas após o contacto com o rolo. Desse modo, para cada tipo de resíduo e fração granulométrica foram realizados testes preliminares para ajuste de “ a ”, “ f ” e “ v ”, que foram estabelecidos tendo por base o rendimento e a qualidade de separação atingida (baixa contaminação da fração magnética e não magnética).

Em geral a metodologia de separação seguida teve por objetivo uma primeira remoção do material não magnético ("Nmag"), privilegiando-se a obtenção de um agregado pouco contaminado, sem grandes exigências ao nível da pureza obtida na fração magnética. Essa opção resulta do facto dos resíduos de betão conterem uma quantidade significativamente maior de material não magnético (agregado, de propriedades diamagnéticas) do que magnético (pasta cimentícia, de propriedades paramagnéticas), podendo representar mais de 70% em volume. Assim, na primeira passagem opta-se por considerar menores aberturas, "a", e maiores velocidades, "v", de modo a extrair de forma rápida o material liberto, sem características magnéticas. Desse modo, o volume de material que será sujeito a uma segunda passagem de forma a aumentar a purificação da fração magnética será muito inferior, reduzindo o tempo afeto à metodologia de separação. Designa-se este tipo de estratégia de separação, de "metodologia inversa". Nas passagens subsequentes, a velocidade é diminuída e a abertura é aumentada, permitindo um melhor contacto das partículas com o rolo magnético e uma maior purificação da fração magnética, respetivamente.

Para a frequência do tabuleiro vibratório de alimentação, após vários testes preliminares, foram definidos valores entre 140-170 Hz. Como referido, o valor exato, dependeu das características geométricas do resíduo e da velocidade do rolo, de modo a se manter a condição de monocamada e uma transição contínua do tabuleiro para o tapete rolante.

Nas Tabelas 7 e 8, resumem-se os resultados de separação obtidos para as frações 250-500 μm e 150-250 μm que conforme discutido e abordado em 4.1.2, são as que estão associadas a níveis de libertação e dimensão de grão compatíveis com o método de separação magnética proposto. Nos respetivos quadros indicam-se os parâmetros de separação ("a", "v", "f") adotados em cada passagem, "1P" ou "2P", bem como a percentagem de rendimento, em massa, obtida na fração não magnética, "Nmag", e magnética, "Mmag". Finalmente, nas últimas colunas apresenta-se a percentagem de cimento estimada nas frações magnéticas e não magnéticas ("% cimento PMM"), tendo em conta o ensaio de perda de massa em mufla (PMM) descrito em 3.6.2. Os valores de "2P Mag" foram destacados nas tabelas, pois correspondem à pureza final da matéria-prima a termoativar para a produção de cimento reciclado (CR). Como exemplo, foi considerado os resíduos da fração 250-500 μm provenientes do betão com a/c de 0.55 não sujeitos a lavagem prévia (B55SL) e da fração 150-250 μm sujeitos a lavagem prévia (B55CL). No entanto, em geral, foram observadas as mesmas tendências para os restantes resíduos analisados no presente trabalho. Na leitura das tabelas, o material que migra da primeira passagem para a segunda passagem é o magnético, "Mag". A soma do material retido no Nmag da primeira passagem e no "Mag" e "Nmag" da segunda passagem corresponde a 100%.

Tabela 7 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55SL, na fração 250-500 µm

Material	Fração (µm)	Parâmetros equipamento						% rendimento massa				% cimento PMM			
		1 P			2 P			1 P		2 P		1 P		2 P	
		a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B55	250-500	2,3	60	160	2,85	50	160	50,98	49,02	29,06	21,92	35,34	0,20	64,02	7,44
		2,6	60	160	3,6	50	160	43,56	56,44	18,28	25,27	38,98	1,66	71,21	20,99
		2,8	60	160	4	50	160	41,80	58,20	17,21	24,59	43,87	2,10	74,16	28,20

Por análise da Tabela 7, confirma-se que à medida que aumenta a abertura, para um dado v e f, diminui o rendimento de material retido na fração magnética, mas aumenta o seu teor de cimento. Por outro lado, como seria de esperar, o nível de contaminação do material não magnético aumenta significativamente com o aumento da abertura. O aumento de abertura da primeira para a segunda passagem, aliado a um maior tempo de contacto com o rolo, aumentou de forma significativa a pureza do material magnético. De acordo com os resultados obtidos, cerca de 17%, nas condições mais favoráveis do material inicial contribui para a fração cimentícia pouco contaminada (Tabela 7). Por sua vez, cerca de 25% de material é composto por partículas cuja libertação não foi efetiva, apresentando na sua constituição mistura de cimento e agregado aderidos (ver Figura 1 no capítulo 2). Recorde-se que o BOC_0.55 foi produzido com 360 kg/m³ de cimento, a que corresponde cerca de 17% da massa de betão. Admitindo um grau de hidratação de 80% e uma hidratação potencial de 0,23 a/l (Tamàs & L. Balázs, 1996) o máximo de fração de pasta hidratada que poderia ser potencialmente separada corresponderia a cerca de 20% da massa de betão. No entanto, o teor de cimento e de pasta tende a aumentar com a diminuição da fração granulométrica, conforme discutido em 4.1.2. Ainda assim, um rendimento de 17% na fração 250-500 µm, apesar de contaminado em 25%, é um valor bastante razoável.

Para a fração 150-250 µm analisaram-se frações com lavagem, visto que conforme discutido no subcapítulo 4.1.3, obtém-se uma separação mais eficiente. Mais uma vez confirma-se que o aumento de abertura na segunda passagem promove uma diminuição do rendimento, e por consequência a obtenção de um cimento reciclado mais puro. Neste caso, foi possível obter uma fração cimentícia com pureza de até 86% em massa nas condições mais favoráveis. No entanto, salienta-se o facto de poder ser benéfico optar por maiores rendimentos de passagem (27%), visto que o teor de cimento atingido, de cerca de 77%, é do nível do obtido na fração 250-500 µm. Conforme discutido em 4.1.2, isso deverá estar relacionado com o aumento da eficiência de libertação com a redução do diâmetro dos resíduos.

Tabela 8 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55CL, na fração 150-250 µm

Material	Fração (µm)	Parâmetros equipamento						% rendimento massa				% cimento PMM			
		1 P			2 P			1 P		2 P		1 P		2 P	
		a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B55	150-250	3,5	50	150	3,6	40	150	34,07	65,93	27,36	6,71	-	0,63	77,24	-
		3,5	50	150	4,5	40	150	30,44	69,56	19,84	10,60	66,21	1,85	86,41	39,32

Outro parâmetro analisado foi o número de passagens necessário para se obterem níveis aceitáveis de rendimento e purificação, sem aumentar de forma significativa o tempo de separação. Na Tabela 9 exemplifica-se o estudo realizado para a fração 250-500 µm do B35SL.

Tabela 9 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B35SL, na fração 250-500

Material	Fração (µm)	SL	Parâmetros equipamento									% rendimento massa						% cimento PMM					
			1 P			2 P			3P			1 P		2 P		3P		1 P		2 P		3P	
			a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B35	250-500	SL	2,2	60	170	2,7	50	165	2,9	40	160	30,50	69,50	22,22	8,30	7,48	20,27	62,39	4,28	76,00	43,63	80,48	52,61

Embora, como seria de esperar, a terceira passagem permita purificar mais a fração cimentícia, o rendimento é significativamente reduzido de 22% para apenas 7.5%. Assim, a ligeira melhoria atingida na pureza da fração cimentícia ($\approx 6\%$) não justifica a elevada perda de rendimento, bem como o prolongamento excessivo do método de separação. Conforme é observado na Figura 45, a tendência de evolução do rendimento e da pureza da fração cimentícia atinge um melhor compromisso na segunda passagem.

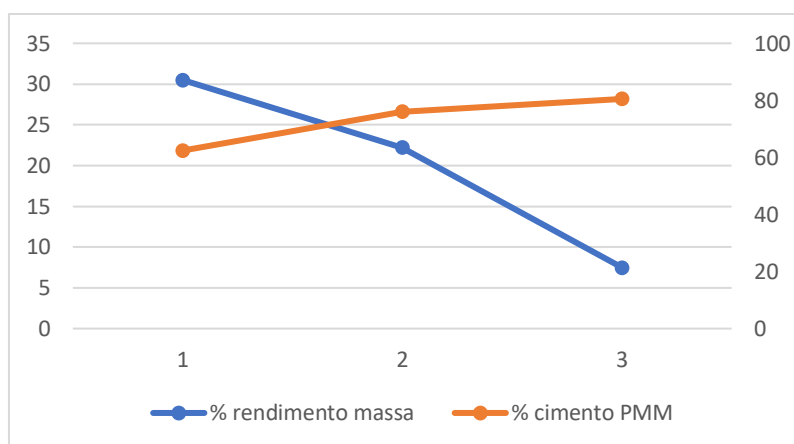


Figura 45 - Evolução do rendimento e pureza da fração cimentícia em função do número de passagens (B35SL, fração 250-500 µm)

Visto que, conforme analisado em 4.1.2, o nível de libertação e o teor de fração cimentícia aumenta com a diminuição da dimensão do resíduo, apresenta-se também um exemplo dos resultados obtidos para a fração extrema de 125-150 µm do B55CL (Tabela 10). Conforme observado em 4.1.2, e reportado por Hu (2019), para partículas de dimensão inferior a 125 µm, o método de separação não é viável.

Tabela 10 - Parâmetros e rendimentos da separação dos resíduos de B55CL, na fração 125-150 µm

Material	Fração (µm)	CL	Parâmetros equipamento									% rendimento massa						% cimento PMM					
			1 P			2 P			3P			1 P		2 P		3P		1 P		2 P		3P	
			a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B55	125-150	CL	4	40	140	5,5	40	140	6	40	140	60,19	39,80	31,01	29,18	19,63	11,38	-	0,50	79,76	24,84	92,72	-

Neste caso, observa-se um aumento importante na pureza da fração cimentícia da segunda para a terceira passagem (16%), mas que mais uma vez é acompanhado por uma perda significativa de rendimento. Ainda assim, os resultados sugerem que a realização de uma terceira passagem para frações granulométricas reduzidas tem uma maior influência na qualidade do produto do que para granulometrias superiores, na medida em que o método de separação é menos eficaz, obrigando à utilização de aberturas muito elevadas, que compensem as maiores forças de adesão entre partículas e a menor ação da gravidade na força centrífuga.

Em suma, em face dos resultados obtidos nesta fase preliminar do trabalho, optou-se por considerar um máximo de 2 passagens nos vários materiais analisados, visto que os rendimentos obtidos após uma terceira passagem não justificam o tempo adicional afeto ao processo. No entanto, fica demonstrado a maior capacidade do método para implementação industrial, caso se utilize um equipamento com 3 rolos em série, conforme se encontra disponível a nível comercial.

4.1.2 Influência da granulometria

Conforme reportado na literatura (Hu, 2019; Svoboda, 2004), a separação magnética por rolos permanentes é afetada pela granulometria do material. A dimensão do material deve ser reduzida e o espectro granulométrico encurtado, de modo que a diferente forma e dimensão das partículas não afete o critério de separação baseado na distinta suscetibilidade magnética dos materiais constituintes. Por um lado, partículas muito finas são afetadas por efeitos de corrente de ar, adesão interpartículas e adesão das partículas ao rolo (Bogas et al., 2021). Por outro lado, para partículas de grande dimensão com fraca suscetibilidade magnética, como é o caso, a força magnética pode não ser suficiente para contrariar as restantes forças no sistema. Acrescente-se ainda, que conforme analisado por (Hu, 2019), para partículas de dimensão superior a cerca de 1 mm, os tratamentos mecânicos não são suficientemente eficazes para libertarem os diferentes constituintes do betão, inviabilizando a etapa de separação subsequente.

(Hu, 2019), no trabalho inicial de lançamento da patente verificou que a separação era mais efetiva nas frações 125-500 μm , embora não se tenha conseguido abordar em detalhe a extensão do método a outras frações e outros tipos de betões de origem. No presente trabalho a análise foi realizada para diferentes frações e tipos de betão, enquadradas na gama até 1 mm.

Inicialmente analisou-se as características das várias frações de resíduos, obtidas após o tratamento mecânico de redução granulométrica, e antes de se proceder à separação. Na Figura 46 apresenta-se as percentagens de material retido em cada fração. Esta percentagem é estabelecida em relação ao material passado no peneiro de 1 mm, com a sua soma a totalizar 100%. Para o betão B55 e B35, durante o processo de moagem e crivagem, verificou-se que cerca de 8% e 12.3% do material moído ficou retido neste peneiro, respetivamente. Ou seja, a moagem não foi capaz de levar todo o material a uma dimensão inferior a 1 mm. Conforme seria de esperar, o betão de menor compacidade apresentou um maior rendimento de moagem, conduzindo a uma menor percentagem de desperdícios. O maior nível de desperdício foi observado no betão G55, de igual compacidade ao betão B55, mas produzido com agregados graníticos. Neste betão, os desperdícios foram de 16%, visto que os agregados possuem maior dureza (natureza siliciosa), dificultando a sua moagem. Tendo em consideração o material que passa no peneiro de 1 mm, verifica-se também a mesma tendência dos betões de maior compacidade ou maior dureza apresentarem menor percentagem de material passado no peneiro de 150 μm . Destaca-se a elevada percentagem de material passado neste peneiro que foi obtida no presente trabalho (17-26%), contrastando com o menor valor reportados por (Carricho et al., 2021) ($\cong 10\%$). Como se discute mais à frente, o material passado neste peneiro assume importância na eficiência e rendimento do método.

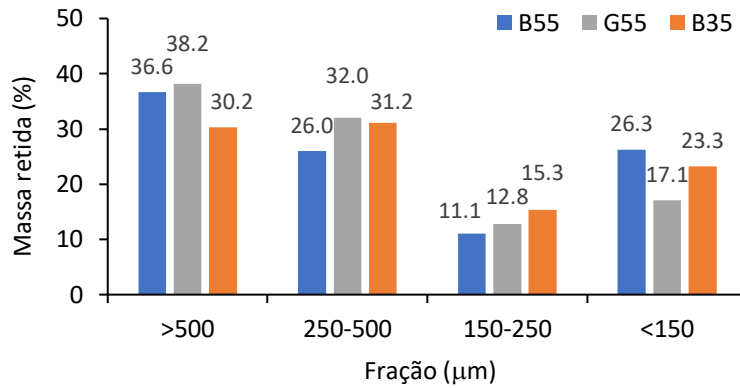


Figura 46 - Percentagem de material retido na mistura de resíduo antes da separação, em função da fração granulométrica (B55, B35 e G55)

Na Figura 47, apresenta-se o teor de cimento estimado pelo método do PMM (3.6.2) obtido em cada fração da mistura não separada. Conforme é possível observar, em geral, o teor de cimento em cada fração aumentou com a redução da dimensão máxima das partículas. Tendências semelhantes foram reportadas por outros autores (Hu, 2019; Gomes et al., 2021). Em particular regista-se uma concentração elevada de material cimentício na fração abaixo de 150 μm, atingindo valores na ordem de 40 a 45%. Estes valores foram mais altos do que os reportados por (Cariço et al., 2021) (18%), significando que o processo de libertação (moagem) utilizado neste trabalho foi distinto. Apesar do betão B35 ter sido produzido com maior teor de cimento, não se verificou um maior teor de ligante hidratado nestes betões, podendo estar contido na fração inferior a 150 μm (resultados não apresentados por invalidez da amostra).

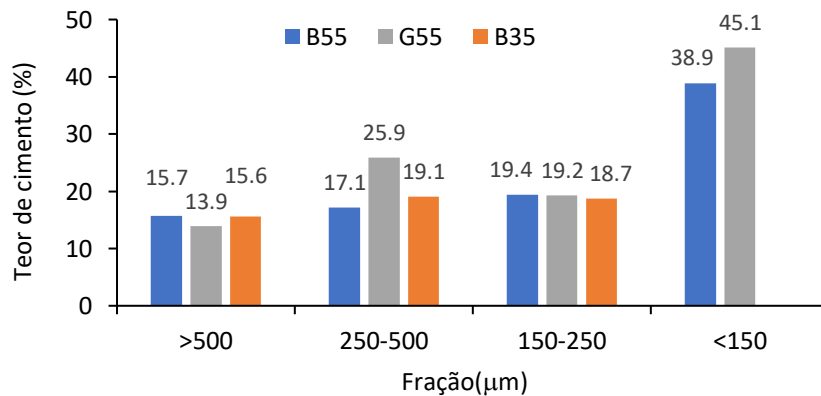


Figura 47 - Teor de cimento hidratado na mistura de resíduo antes da separação, em função da fração granulométrica (B55, B35 e G55)

Tendo em conta a percentagem de cimento e teor de material retido em cada fração, é possível estimar o teor de pasta de cimento hidratado em cada betão, entre 0 e 1 mm. Esse teor foi de 20.8% e 19.9% da massa total de betão inicial, para o B55 e G55, respetivamente. Estes valores são próximos do potencial estimado em 4.1.1 (20%), sugerindo que a fração de cimento retida no desperdício de material superior a 1 mm foi pouco importante. Para o B35 não foi possível fazer a estimativa, devido à não obtenção do valor para a fração inferior a 150 μm.

Por sua vez, na Figura 48 apresenta-se a percentagem estimada de areia e agregado calcário em cada uma das frações referidas do betão B35 e B55. Esta percentagem foi estimada pelo método do ataque ácido referido em 3.6.3. Dado que o betão com granito é composto por apenas materiais siliciosos, esta estimativa não é válida. Não se verificou uma tendência clara da predominância de um dado tipo de agregado nas frações entre 150 μm e 1 mm, embora pareça ocorrer um aumento do teor de calcário na menor fração granulométrica. É possível que na fração abaixo de 150 μm essa tendência se inverta.

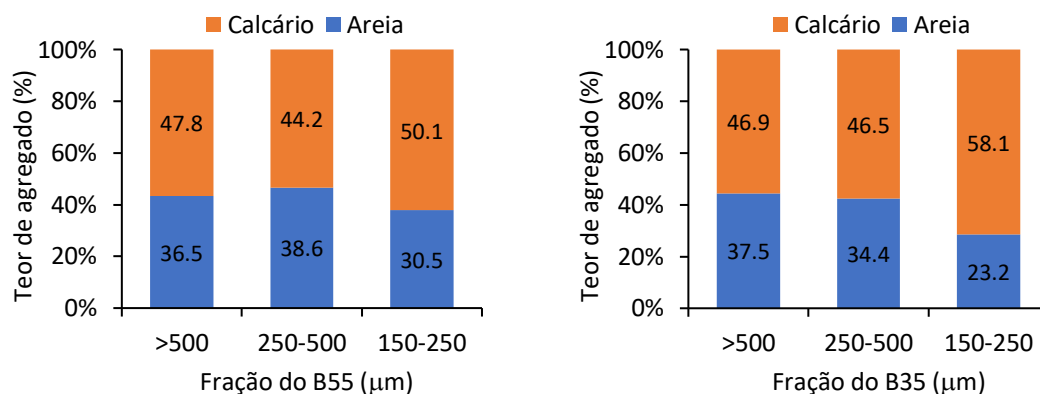


Figura 48 - Teor de areia siliciosa e agregado calcário na mistura de resíduo antes da separação em função da fração granulométrica: esquerda – B55; direita - B35

A eficiência do método de separação foi analisada para as frações <75 μm , 75-125 μm , 125-150 μm , 150-250 μm , 250-500 μm , 500-710 μm , 710-1000 μm e 500-1000 μm dos resíduos obtidos do betão de referência B55. Na Tabela 11 apresentam-se os resultados do rendimento e percentagem de cimento obtido após uma e duas passagens, respetivamente. Para partículas de dimensão superior a 150 μm , os resultados são apresentados com ou sem pré-tratamento de lavagem. Para partículas de menor dimensão, o método exige lavagem prévia, conforme abordado em 4.1.3. A separação do material da fração inferior a 75 μm foi desde logo inviável, pelo que não se apresentam os resultados na Tabela 11. Este material era muito fino, prevalecendo as forças de adesão ao tapete sobre as restantes forças intervenientes no processo de separação.

Tabela 11 - Parâmetros e rendimentos da separação das várias frações de B55

Material	Fração (μm)	Parâmetros equipamento						% rendimento massa				% cimento PMM			
		1 P			2 P			1 P		2 P		1 P		2 P	
		a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B55	75-125 CL	5	40	140	6	40	140	66,45	33,55	46,42	20,03	-	10,74	53,14	25,14
	125-150 CL	4	40	140	5,5	40	140	60,19	39,81	31,01	29,18	-	0,50	79,76	24,84
	150-250 CL	3,5	50	150	4,5	40	150	30,44	69,56	19,84	10,60	66,21	1,85	86,41	39,32
	150-250 SL	3,5	50	150	4,5	40	150	46,73	53,46	22,55	24,18	44,71	1,91	80,05	19,32
	250-500 CL	2,8	60	160	4	50	160	26,72	73,28	14,98	11,74	57,49	0,65	75,13	32,40
	250-500 SL	2,8	60	160	4	50	160	41,80	58,20	17,21	24,59	43,87	2,10	74,16	28,20
	500-710 CL	2,4	70	170	3,4	60	170	35,02	64,98	16,62	18,40	-	1,60	58,25	31,80
	710-1000 CL	2,4	70	170	3,4	60	170	33,96	66,04	16,59	17,38	-	1,48	50,96	35,56
	500-1000 SL	3	50	160	4	50	160	34,79	65,21	8,67	26,13	36,17	0,90	56,85	33,53

A fração 75-125 μm apresentou uma percentagem de rendimento elevada, de 46%, mas associada a uma modesta percentagem de cimento (53%). Neste caso, apesar de nas frações finas o teor total de pasta ser superior (Figura 47) e a eficiência de libertação poder ser mais elevada (Carriço et al., 2021),

a separação é dificultada pelos motivos anteriormente referidos, nomeadamente devido às forças de adesão entre partículas e com o tapete. Desse modo, considera-se que o método de separação não é adequado para esta fração. Ainda assim, face à quantidade de cimento inicial na mistura ($\cong 39\%$, Figura 47), conseguiu-se aumentar o grau de purificação em 36%.

Porém, importa referir que para a fração 125-150 μm já foi possível obter uma percentagem de cimento elevada (80%) para um nível de rendimento razoável (31%). Neste caso, foi possível aumentar em 2,1 vezes o grau de pureza da fração cimentícia face à mistura original. Assim, a separação foi eficaz, podendo-se balizar o diâmetro de 125 μm como o limite inferior de aplicação do método. A qualidade de separação obtida nesta fração pode ser observada na Figura 49. Infelizmente, não foi medido a representatividade da massa de material retida na fração 125-150 μm em relação ao total da amostra. Apenas se pode concluir que a percentagem de material não sujeito a separação vai ser inferior aos 26% determinados para $< 150 \mu\text{m}$.

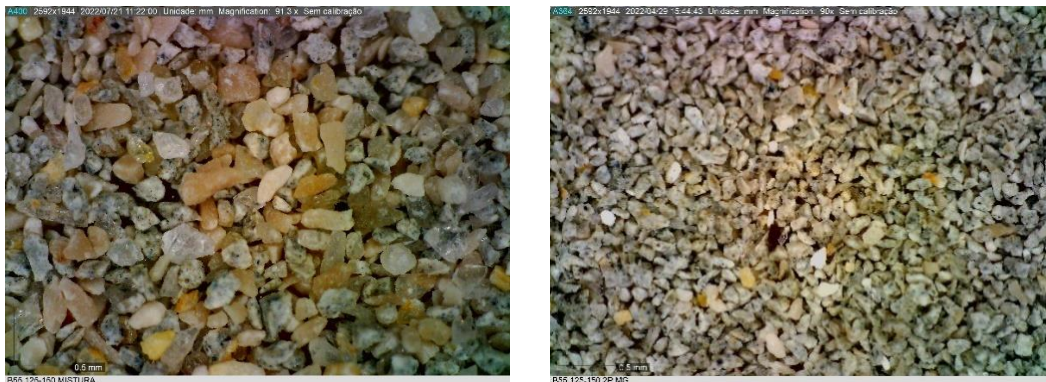


Figura 49 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 125-150 (B55CL) – análise em microscópio digital

Conforme observado na Figura 46, no resíduo inicial, a maior fração de cimento encontra-se abaixo de 150 μm , sendo uma desvantagem do método não conseguir promover uma separação efetiva abaixo de 125 μm . Ainda assim, este material pode ser utilizado como filer enriquecido em cimento, conforme sugerido na patente (Winfried & Kai-Uwe, 2008). De acordo com os valores indicados na Figura 47, o material abaixo de 150 μm corresponde a 24% do total dos resíduos iniciais e apresenta 39% de fração cimentícia. Desse modo, 9% de cimento hidratado existente no material inicial concentra-se nesta fração. Conforme estimado anteriormente, a fração de pasta hidratada no B55 era cerca de 21%, pelo que apenas 55% da fração total de pasta encontra-se acima desta dimensão e pode ser sujeita ao método de separação proposto. Estes valores são significativamente superiores aos reportados por Carriço et al (2021), envolvendo um trabalho anterior no nosso departamento, em que se conseguiu que essa percentagem fosse de cerca de 90%. Isso resultou pois nesse trabalho foi adotado um procedimento otimizado de moagem e crivagem, que permitiu diminuir a quantidade de material muito fino. Neste sentido, é importante que durante o tratamento mecânico se proceda à crivagem do material antes de cada etapa de moagem, de modo a reduzir o volume de finos produzidos. Em 4.3, apresenta-se em maior detalhe o balanço produtivo do método implementado no presente trabalho.

Nas frações 150-250 μm e 250-500 μm foram obtidas percentagem de cimento elevadas (>74%) para rendimentos semelhantes ($\approx 20\%$), após a segunda passagem. O ligeiro aumento na percentagem de cimento obtida na fração 150-250 μm pode ser atribuído à maior taxa de libertação dos constituintes do betão nas frações mais finas. Nas Figuras 50 e 51 é possível observar a separação efetiva da fração de cimento do agregado para a fração de 150-250 μm e 250-500 μm , respetivamente. Para a fração 150-250 μm e 250-500 μm foi possível passar de valores de 11% e 26% de pureza para 74% e 75%, respetivamente (3 a 7 vezes superiores), o que salienta a excelente eficiência do método de separação proposto. Estes resultados não corroboram a menor eficiência de separação observada por Hu (2019), na fração de 125-500 μm . Isso sugere, que o material retido na fração 125-150 μm não deve ser separado em conjunto com o da fração 150-250 μm .

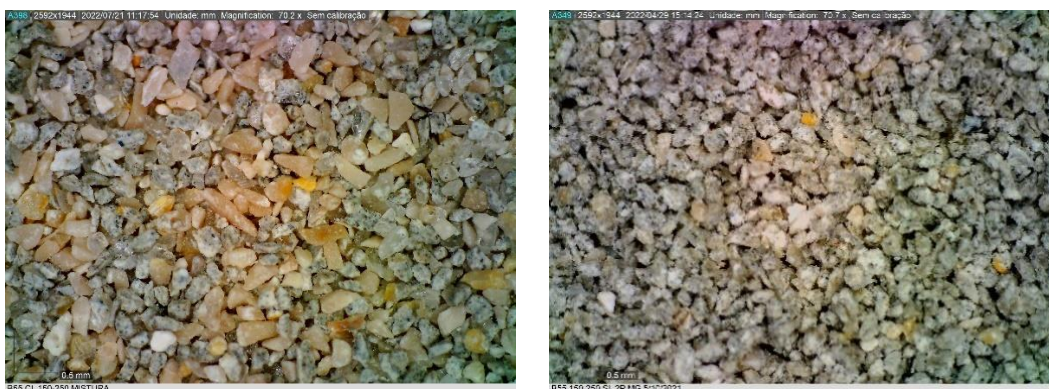


Figura 50 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 150-250 (B55CL) – análise em microscópio digital

A ausência de pré-lavagem nas frações 150-250 μm e 250-500 μm conduziu a valores de rendimento e percentagem de cimento próximos dos com pré-lavagem, especialmente na fração granulométrica 250-500 μm (Tabela 11). A influência da lavagem é discutida em 4.1.3.



Figura 51 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 250-500 (B55CL) – análise em microscópio digital

Por sua vez, nas frações superiores a 500 μm verificou-se uma queda significativa na percentagem de cimento da fração magnética, conduzindo a uma separação menos eficiente. Neste caso, a pureza foi

inferior a 60%, sugerindo a existência de várias partículas não suficientemente libertas, com presença simultânea de areia e cimento aderido. A pior qualidade atingida na separação pode ser observada na Figura 52. Conclui-se que a separação deve ser essencialmente realizada nas frações inferiores a 500 μm , para as quais o nível de libertação foi elevado. A importância da libertação nas frações de menor dimensão é confirmada pela menor pureza da fração de cimento atingida na fração 710-1000 μm face a 500-710 μm (Tabela 11). De acordo com a Figura 47, a percentagem de cimento na fração 500-100 μm é de cerca de 16%, para uma quantidade de material retido de 37%. Desse modo, a não consideração desta fração no método de separação, implica que cerca de 5% da pasta de cimento inicial não é aproveitada. Noutra perspetiva, apenas 6% de cimento hidratado, em massa do resíduo inicial de betão, pode ser recuperado quando se aplica o método apenas à fração 150-500 μm (cerca de 30% do cimento inicial).

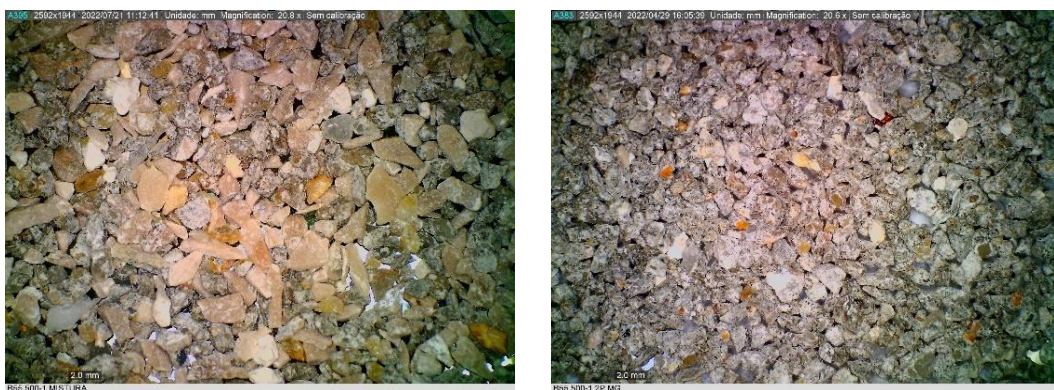


Figura 52 - Análise visual da mistura (esquerda) e fração magnética (direita) após a segunda passagem da fração 500-1000 μm (B55) – análise em microscópio digital

Noutra perspetiva, importa também perceber o rendimento e a qualidade da areia reciclada recuperada em cada fração (componente não magnética do material separado após a primeira passagem). Na fração inferior a 125 μm a contaminação da fração não magnética (areias) por cimento hidratado foi de 11%, que embora seja cerca de 3 vezes inferior à do material de origem (39%), ainda é bastante elevada (Tabela 11). De acordo com (Butler et al., 2012), os agregados reciclados de elevada qualidade devem possuir uma absorção de água inferior a 3%. Por sua vez, (Lotfi & Rem, 2016) indica que a areia pode ser classificada como sendo de “boa qualidade” quando apresenta níveis de absorção inferiores a 5%. A absorção vai depender do teor e tipo de pasta aderida ao agregado. Assumindo cerca de 45-50% (48%) de absorção para uma pasta corrente com a/c entre 0.5 e 0.6 (Krus et al., 1996) a absorções de 3% e 5% corresponde sensivelmente 6% e 10% de pasta aderida, respetivamente. Desse modo, a limpeza das areias não terá sido suficiente, embora se tenha passado de valores estimados de cerca de 18% de absorção para 6% de absorção, após a separação.

Para as restantes frações granulométricas, a percentagem de cimento hidratado foi, em geral inferior a 2%, e o rendimento superior a 60% (dependendo da lavagem ou não prévia do resíduo). A 2% de pasta hidratada estão associadas absorções inferiores a 1%, podendo-se classificar as areias recicladas obtidas como estando no domínio das areias naturais comerciais. Conclui-se assim que o método de

separação foi bastante efetivo na produção de areia reciclada (Figura 53). Não existiu uma relação clara entre a dimensão do material e a percentagem de cimento aderida ou o rendimento de material retido na componente não magnética. Nas frações lavadas de 150-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm foram obtidos rendimentos de 69.6%, 73.3% e 65%, respetivamente. Tendo em consideração a percentagem de material retido entre a fração 150-1000 μm (Figura 46), estima-se que o método de separação é capaz de recuperar cerca de 47% de areia reciclada de elevada qualidade, ou seja, 470 kg por cada tonelada de resíduos de betão produzidos (já tendo em consideração o desperdício de material acima de 1 mm). Este balanço será mais bem detalhado em 4.3.



Figura 53 - Análise visual da fração não magnética (areia reciclada) após a primeira passagem das frações: 125-250 μm (esquerda); 250-500 μm (centro); 500-1000 μm (direita) – análise em microscópio digital – B55CL

Outro aspeto importante na escolha de um método de separação é o rendimento do processo em termos de material separado por unidade de tempo (produtividade). Na Tabela 12 apresenta-se uma estimativa desses valores para as diferentes frações do betão B55, durante a primeira e a segunda passagem. Como referido em 3.4, o tapete rolante apresentava uma largura de 250 mm e uma espessura de 1.5 mm, para uma intensidade de campo medida na superfície do tapete junto ao rolo permanente de 1 T. A produtividade irá aumentar, reduzindo a espessura do tapete e aumentando a largura do mesmo e a intensidade de campo.

Tabela 12 - Produtividade do método de separação em função da fração granulométrica do betão B55

Material	Fração (μm)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)	Abertura (mm)	Productividade na 1ª passagem (kg/h)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)	Abertura (mm)	Productividade na 2ª passagem (kg/h)
B55	150-250	150	50	3,5	5,5	150	40	4,5	4,5
	250-500	160	60	2,8	12,9	160	50	4	6,6
	500-1000	170	70	2,4	15,0	160	60	3,4	8,8

Aos valores estimados na Tabela 12, correspondem quantidades de material obtido por hora e metro de largura de tapete após a segunda passagem de 18 kg/h.m, 26 kg/h.m e 35 kg/h.m, para as frações de 150-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , respetivamente. Estes valores não são muito otimistas, esperando-se atingir melhores produtividades em equipamentos industriais. Naturalmente, a produtividade diminui nas frações de menor dimensão, cuja separação exige maiores aberturas e menores velocidades do tapete. Os valores de produtividade apresentados são ligeiramente superiores aos referidos em (Bogas et al., 2021) de 16 kg/h.m, 24 kg/h.m e 32 kg/h.m, para as

fracções de 150-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , respetivamente. Importa referir que em (Bogas et al., 2021) foi considerado um rolo ligeiramente diferente, de menor diâmetro.

Em face dos resultados obtidos neste subcapítulo, considerou-se o material retido na fração 250-500 μm para o estudo de argamassas apresentado em 4.5. Poder-se-ia também ter considerado a fração 150-250 μm , que até está associada a maior pureza, porém as diferenças não são significativas e a velocidade de processamento é superior na fração 250-500 μm , obtendo-se maior volume de material em menos tempo.

4.1.3 Influência do tipo de pré-tratamento (sem lavagem, com lavagem, limpeza por ar)

A influência do tipo de pré-tratamento foi analisada para as frações de 150-500 μm e 250-500 μm do B55. Os pré-tratamentos consistiram em limpeza a húmido com lavagem (CL), sem lavagem (SL) e por limpeza em fluxo de ar (AR), sendo o primeiro realizado por via húmida e os restantes por via seca (como explicado no ponto 3.4), não exigindo a lavagem e secagem do material, cujo impacto ambiental e energia consumida são elevados (Sousa & Bogas, 2021).

Conforme indicado em 3.4, o procedimento menos exigente, sem lavagem, não permite a remoção de poeiras da superfície das partículas, podendo afetar a eficiência de separação. Desse modo, foram exploradas duas metodologias de limpeza do material: lavagem por água (CL) e limpeza a ar (AR), com a última a apresentar vantagens em termos de consumo energético. A lavagem foi a metodologia base considerada na conceção do método patenteado, e no estudo desenvolvido por (Hu, 2019), mas é desvantajosa em termos de consumo de energia e impacto ambiental. Na presente secção pretende-se avaliar o impacto em termos de rendimento e qualidade do material separado para cada um dos tratamentos referidos.

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados obtidos para as frações 150-250 μm e 250-500 μm , tendo em consideração a aplicação dos vários pré-tratamentos estudados (SL, CL, AR) aos resíduos do betão B55. De referir que os vários parâmetros de separação (a, v e f) foram mantidos constantes em cada fração, para as várias análises realizadas neste estudo.

Tabela 13 - Parâmetros e rendimentos de separação tendo em consideração diferentes tipos de pré-tratamento (SL, CL, AR) – frações 150-250 μm e 250-500 μm do B55

Material	Fração (μm)		Parâmetros equipamento						% rendimento massa				% cimento PMM			
			1 P			2 P			1 P		2 P		1 P		2 P	
			a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B55	150-250	SL	3,5	50	150	4,5	40	150	46,73	53,46	22,55	24,18	44,7147	1,91	80,05	19,32
		CL	3,5	50	150	4,5	40	150	30,44	69,56	19,84	10,60	66,2126	1,85	86,41	39,32
		AR	3,5	50	150	4,5	40	150	33,16	66,84	19,88	13,28	66,79	1,87	85,62	35,79
	250-500	SL	2,8	60	160	4	50	160	41,80	58,20	17,21	24,59	43,87	2,10	74,16	28,20
		CL	2,8	60	160	4	50	160	26,72	73,28	14,98	11,74	57,49	0,65	75,13	32,40
		AR	2,8	60	160	4	50	160	32,83	67,23	16,25	16,58	69,03	1,47	71,68	32,83

Para as duas frações analisadas, verifica-se que o procedimento com lavagem conduziu a um ligeiro aumento da pureza da fração cimentícia e da areia reciclada obtida após a segunda passagem, quando comparado com o material não sujeito a lavagem prévia. Porém, esse aumento não teve significado na fração 250-500 μm , e foi de apenas 6% para a fração 150-250 μm . A maior necessidade de lavagem já era esperada no material de granulometria mais fina. O rendimento foi ligeiramente superior no

material sem lavagem, justificado pelo seu maior nível de contaminação. A maior diferença foi observada na quantidade de material não magnético obtido na primeira passagem, constatando-se que a pré-lavagem permite incrementar a quantidade de areia reciclada de elevada qualidade em 30% e 25% para as frações 150-250 μm e 250-500 μm , respectivamente. Tendo em conta os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que o tratamento de pré-lavagem poderá ser dispensado, pelo menos quando se visa a produção de fração de cimento hidratado de elevada pureza. No entanto, importa referir que o procedimento de crivagem realizado em laboratório deverá ser mais efetivo do que o realizado em termos industriais, afetando o rendimento do método SL.

O tratamento que envolveu a limpeza por fluxo de ar não terá sido eficaz na fração 250-500 μm , conduzindo a menor pureza do que os restantes tratamentos. Uma razão poderá estar relacionada com a remoção de parte das partículas de cimento de menor dimensão retidas por adesão nesta fração. Porém, na fração 150-250 μm , de menor dimensão, isso não foi observado, constatando-se que a limpeza por ar foi tão eficaz como o procedimento com lavagem, obtendo-se resultados muito semelhantes em termos de rendimento e pureza da fração magnética e não magnética.

Em face dos resultados obtidos, considera-se que é importante confirmar em ambiente industrial se os métodos de limpeza podem ser dispensados, especialmente na fração 150-250 μm , que é mais afetada pela existência de outras poeiras. Caso a fração 150-250 μm exija limpeza prévia, o método por fluxo de ar afigura-se como sendo uma solução promissora. Note-se ainda que, para ser efetiva a separação, os resíduos não devem apresentar água superficial, podendo exigir a sua secagem prévia, natural ou artificial, caso em alguma das etapas do processo os resíduos sejam sujeitos a molhagem.

4.1.4 Influência da compactidade do betão de origem

Na Tabela 14 confrontam-se os resultados de separação obtidos nas frações entre 150 e 1000 μm dos resíduos provenientes do betão B55 e B35. Este estudo tem como objetivo analisar a influência da compactidade do betão de origem (relação a/c e teor de cimento) no rendimento e qualidade da separação. Os resultados foram comparados na fração 150-250 μm com lavagem e nas restantes frações sem lavagem.

Tabela 14 - Parâmetros e rendimentos da separação das várias frações de B35 e B55

Material	Fração (μm)		Parâmetros equipamento						% rendimento massa				% cimento PMM			
			1 P			2 P			1 P		2 P		1 P		2 P	
			a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
B35	150-250	CL	3,5	50	150	4,5	40	150	35,65	64,35	20,79	14,85	70,41	3,13	89,88	42,17
	250-500	SL	3	60	160	4,2	50	160	39,58	60,42	15,97	23,61	40,5996	0,85	80,22	43,97
	500-1000	SL	2,9	50	160	3,5	50	160	39,41	60,59	15,92	23,50	48,56	1,02	66,97	28,21
B55	150-250	CL	3,5	50	150	4,5	40	150	30,44	69,56	19,84	10,60	66,21	1,85	86,41	39,32
	250-500	SL	2,8	60	160	4	50	160	41,80	58,20	17,21	24,59	43,87	2,10	74,16	28,20
	500-1000	SL	3	50	160	4	50	160	34,79	65,21	8,67	26,13	36,17	0,90	56,85	33,53

Verifica-se que em todas as frações analisadas, a percentagem de cimento na fração magnética foi superior nos resíduos provenientes do B35 do que do B55, tendo em consideração a aplicação do método de PMM referido em 3.6.2. A maior quantidade de cimento inicial no betão B35 poderia contribuir para esta diferença, mas isso não foi confirmado em 4.1.2 (Figura 47). Desse modo, os resultados sugerem que a libertação ou a própria separação poderá ser mais efetiva nos betões de maior compactidade. Em termos de libertação, seria de esperar uma maior eficiência no B55, para o

qual existe uma maior incompatibilidade elástica entre o agregado e a pasta envolvente. Porém, essa maior libertação traduz-se no aumento das partículas de dimensão inferior a 150 μm , conforme observado na Figura 47. Destaca-se o facto de a pureza da fração 500-1000 μm ter sido 17% superior no B35, apesar de ser ter considerado uma abertura menor na segunda passagem do que no B55. Isso sugere um maior nível de libertação atingida nestes resíduos.

Uma razão para a maior eficiência de separação no B35, poderá estar relacionada com a maior compacidade e menor taxa de hidratação da pasta de cimento no B35. Por um lado, isso faz com que a massa volúmica da pasta seja superior, conduzindo a maiores percentagens em massa de material cimentício face à massa da mistura agregado-cimento. Por outro lado, no cimento anidro os teores de materiais metálicos estão menos diluídos, aumentando as suas propriedades paramagnéticas.

Ainda assim, em termos globais, as diferenças não foram muito significativas entre betões, obtendo-se diferenças de pureza inferiores a 7% entre betões, na gama 150-500 μm . Para frações de granulometria superior, tal como concluído para o B55 (4.1.2), o nível de pureza obtido (67%) não justifica a aplicação do método de separação. Acrescente-se que, exceto na fração 500-1000 μm , os rendimentos foram semelhantes para os dois tipos de betão, tanto na quantidade de material magnético como não magnético. Assim, demonstra-se que o método de separação é aplicável para a gama de betões mais correntes, de relações a/c inferiores a 0,55.

4.1.5 Influência do tipo de agregado (calcário; granítico)

Neste trabalho, o método de separação foi pela primeira vez avaliado em betões produzidos com agregados grossos de natureza siliciosa (granito), que a par do calcário, são os agregados mais comumente utilizados em Portugal para o fabrico de betão.

Conforme referido em 3.4, a metodologia de separação dos betões com granito exige uma abordagem diferente, pois estes agregados possuem elementos ferromagnesianos na sua constituição (micas) cuja suscetibilidade magnética é positiva. Tal como a calcite no agregado calcário, o quartzo e o feldspato presentes no granito apresentam características diamagnéticas. Suscetibilidades magnéticas negativas de $-6.0 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ e $-4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, são referidas para o quartzo e calcite, respetivamente (Svoboda, 2004). Para o feldspato, dependendo do tipo e nível de inclusões, são referidas fracas suscetibilidades entre $-3.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ e $3.7 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (Biedermann et al., 2016). Como referido em 2.6 no cimento a suscetibilidade magnética é positiva devido à presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) no ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF) (Hu, 2019). Gopalakrishnam et al. (2012) reportam valores de $11,4 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ para a suscetibilidade mássica do cimento Portland anidro, confirmando as suas características paramagnéticas. Assim, a separação entre o cimento e os minerais referidos é possível, ficando o primeiro na fração magnética e os restantes na não magnética.

Porém, como referido, o granito possui também mica, cuja suscetibilidade magnética é positiva. Para a biotite, presente nos agregados graníticos utilizados no betão G55, são reportados valores de $87.34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ (Brno, 2009), superiores aos obtidos no cimento. Assim, a metodologia de separação tem de ser ajustada por forma a se fazer uma remoção prévia da mica face aos restantes constituintes do betão. Como tal, na Tabela 15 apresenta-se os resultados obtidos para o betão G55, considerando três

passagens, sendo a primeira destinada à remoção de mica. Na mesma tabela resumem-se os resultados obtidos no betão de igual compactidade produzido com agregados calcários, para efeitos de comparação (B55).

Tabela 15 - Parâmetros e rendimentos obtidos da separação do G55

Material	Fração (µm)		Parâmetros equipamento									% rendimento massa						% cimento PMM					
			1 P			2 P			3P			1 P		2 P		3P		1 P		2 P		3P	
			a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	a (mm)	v (m/s)	f (Hz)	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
G55	150-250	CL	6	100	140	3,5	50	150	4,5	40	150	22,73	77,27	24,54	52,73	11,78	12,76	39,03	-	51,00	1,41	77,80	24,75
	250-500	SL	6	80	140	2,9	60	160	4,1	50	160	11,69	88,3	41,92	46,39	20,22	21,71	27,35	-	61,27	5,47	75,64	49,15
	500-1000		6	70	160	2,5	70	160	3,7	60	160	15,67	84,33	42,53	41,79	17,76	27,77	4,90	19,28	31,24	3,08	44,96	29,17
B55	150-250	CL	-	-	-	3,5	50	150	4,5	40	150	-	-	30,44	69,56	19,84	10,60	-	-	66,21	1,85	86,41	39,32
	250-500	SL	-	-	-	2,8	60	160	4	50	160	-	-	41,80	58,20	17,21	24,59	-	-	43,87	2,10	74,16	28,20
	500-1000		-	-	-	3	50	160	4	50	160	-	-	34,79	65,21	8,67	26,13	-	-	36,17	0,90	56,85	33,53

Desde logo, foi considerada uma elevada abertura de modo a se tentar remover o teor de mica na mistura. Como se observa na Tabela 15, o método não foi eficiente a separar a mica do cimento na fração 150-500 µm, pois obtiveram-se rendimentos demasiado elevados com grande contaminação do material magnético por elevados teores de cimento (27-39%). Para estas frações seria indicado a aplicação de uma maior abertura no divisor, embora para o equipamento utilizado isso não tenha sido viável, pois foi aberto ao máximo. Apenas na fração 500-1000 µm foi possível atingir uma separação razoável destes materiais.

No entanto, após se ultrapassar a fase de remoção de mica, nas frações 150-250 µm e 250-500 µm foi possível atingir elevados rendimentos e níveis de pureza, tanto no agregado reciclado como na fração de cimento da componente magnética da 3ª passagem. Na menor fração granulométrica foi possível aumentar o grau de pureza da fração de cimento de 19% para 78%, e na maior fração de 26% para 76%, muito semelhante ao observado no B55 (Tabela 15). Conclui-se assim que o método de separação magnética também é válido para betões com agregado granítico. No entanto, na fração de 500-1000 µm foi mais marcante a reduzida eficiência de separação do que no B55, atingindo-se valores inferiores a 50% de pureza.

Em relação às areias recicladas, a contaminação máxima (5,5%) ocorreu na fração 250-500 µm, tendo sido cerca de duas vezes maior do que no B55. Ainda assim, esta percentagem de pasta corresponde a uma absorção inferior a 3%, permitindo classificar as areias obtidas como de elevada qualidade.

Como referido, o ensaio de ataque ácido (3.6.3) nos betões com granito não permite dar uma estimativa do teor de areia, visto que o agregado grosso de areia também é insolúvel em água. Porém, este ensaio pode dar uma ideia aproximada do teor de cimento hidratado, visto que este é o único atacado durante o ensaio. Na Tabela 16 apresentam-se os resultados do ataque ácido, indicando-se os valores estimados da percentagem de cimento hidratado.

Tabela 16 - Resultados obtidos do ataque ácido para o betão G55, definidos em termos de percentagem de cimento hidratado em cada passagem

Material	Fração (µm)		1 P		2 P		3P	
			Mag	Nmag	Mag	Nmag	Mag	Nmag
G55	150-250	CL	37,68	21,77	47,1	5,17	71,55	22,75
	250-500	SL	34,24	-	63,16	8,25	76,58	52,37
	500-1000		10,36	22,48	44,89	5,13	41,46	34,34

Comparando os resultados indicados na Tabela 16, com os valores estimados por PMM na Tabela 15, verifica-se que em geral as estimativas foram semelhantes. As pequenas diferenças podem ser justificadas pela variabilidade das amostras, sendo usualmente inferiores a $\pm 5\%$ (em termos absolutos). A maior diferença ocorreu nos magnéticos da primeira e segunda passagem da fração 500-1000 µm. Isso pode ser explicado pelo facto de ser mais difícil recolher amostras homogêneas pequenas em resíduos de granulometria superior. Ainda assim, os resultados obtidos no ataque ácido permitem validar a capacidade do método simplificado de PMM estimar o teor de cimento hidratado nas amostras.

4.2 Caracterização dos cimentos reciclados

Como referido em 4.1.2, apenas o cimento hidratado recuperado das frações 250-500 µm foi escolhido para termoativar e produzir cimento reciclado de acordo com o processo descrito em 3.5. Este processo foi realizado para os vários tipos de betão analisados, obtendo-se os respetivos cimentos reciclados designados por CRB35, CRB55SL, CRB55CL e CRG55. Para efeitos de comparação foi também produzida uma pasta pura com a/c de 0.35 (CRP35), de composição semelhante à matriz cimentícia do betão B35. Desse modo, é possível ter uma referência para avaliar a qualidade do produto obtido após separação face a um material ideal com 100% de pureza.

Os 4 tipos de cimento reciclado foram caracterizados por termogravimetria (TG), de modo a avaliar o seu potencial de desidratação e reidratação. Os cimentos foram analisados no estado hidratado, não tratado, e após termoativação, já na forma de cimento reciclado.

Na Figura 54 apresentam-se as curvas de TG e derivada da TG para os cimentos analisados, no estado hidratado, não tratado. Tal como é usualmente observado nos materiais cimentícios correntes, as curvas de termogravimetria são caracterizadas por três regiões principais de perda de massa, associadas à presença de picos respetivos no diagrama de DTG: desidratação; desidroxilação; descarbonatação (Carvalho, 2020) (Cariço et al., 2020b) (Bogas et al., 2020) (Alarcon-Ruiz et al., 2005)(Scrivener et al., 2016). Até cerca de 105°C, a perda de massa está associada à perda de água livre por evaporação, e posteriormente, até cerca de 400°C, à desidratação dos produtos de hidratação, nomeadamente C-S-H e sulfoaluminosilicatos ou carboaluminatos hidratados (fases AFm ou AFt - etringite). Esta primeira fase entre 105°C e cerca de 400 °C corresponde à fase de desidratação (Ldh). Nesta fase, até cerca de 130°C, ocorre a desidratação das fases AFt, e até 200°C, a decomposição das fases AFm (Scrivener et al., 2016). Nesta gama ocorre ainda a decomposição do gesso, mas este não deverá estar presente nas amostras analisadas, visto que já se encontra pré-combinado nas fases AFm e AFt (Bogas et al., 2020). Entre cerca de 400°C e 500°C ocorre a fase de desidroxilação do hidróxido de cálcio (CH), com formação de óxido de cálcio livre (CaO), designada de Ldx. Finalmente

a partir destas temperaturas, especialmente acima de 600°C, ocorre a fase de descarbonatação dos carbonatos, nomeadamente da calcite (CaCO_3), a que corresponde a designação Ldc (Carriço et al., 2020; Bogas et al., 2020). Em todos os produtos analisados no presente trabalho foi possível distinguir estas fases, conforme evidenciado na Figura 55.

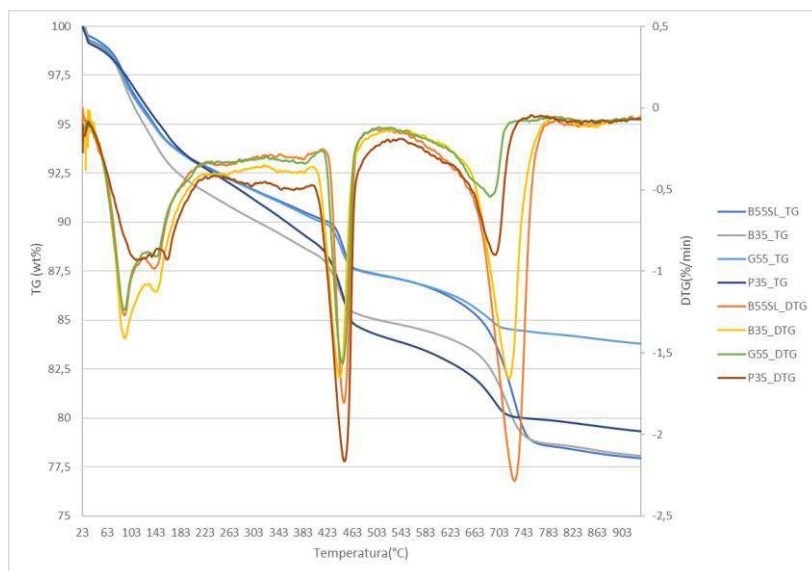


Figura 54 - Análises TG e DTG do cimento hidratado não tratado resultante da separação dos betões B35, B55 e G55, bem como da pasta P35

Na Tabela 17 apresentam-se os valores de Ldh, Ldx e Ldc calculados para cada um dos resíduos de cimento analisados (P35, B35, B55 e G55). Na mesma tabela apresenta-se ainda o valor global da quantidade de água combinada (W_B) e respetivo grau de hidratação (α_H) que foram calculados conforme descrito em 3.6.1.

Tabela 17 - Perdas de massa por desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), água combinada (W_B) e respetivo grau de hidratação (α_H) para os resíduos de P35, B35, B55 e G55, no estado hidratado não termoativado

Material	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc (%)	W_B (%)	α_H (%)
P35	9,1	3,1	5,5	13,4	58,2
B35	8,1	2,0	8,0	10,7	58,2
B55	6,9	2,2	9,6	9,8	57,7
G55	6,8	2,3	3,7	9,8	56,6

O maior valor de Ldh no P35 (pasta pura), face aos restantes resíduos de cimento obtidos da separação de betões, justifica-se pelo facto deste, não estar contaminado por agregado. No caso do B55, B35 e G55, a presença de agregado, que não possui perdas de massa relevantes nesta fase (Ldh), vai fazer com que o Ldh seja inferior. Ao contrário do que poderia ser expectável, o B35 apresentou maior Ldh do que o B55. De facto, dado que o B35 apresenta menor relação a/c do que o B55, o seu nível de hidratação não deveria ser superior. De acordo com o valor de α_H o nível de hidratação atingido nos dois betões foi semelhante. Assim, os resultados sugerem uma menor contaminação e uma maior presença de cimento no B35, corroborando os resultados obtidos em 4.1.4, para a fração 250-500 μm .

O G55 apresentou perdas de massa semelhantes ao B55 de igual relação a/c e nível de pureza idêntica na fração 250-500 μm (4.1.5).

O valor de L_{dx} foi semelhante nos vários resíduos de betão, sendo que este valor depende do grau de hidratação, pureza da amostra e grau de carbonatação atingido durante a fase de cura, moagem e separação dos resíduos. Como seria de esperar, o P35 associado a maior pureza e menor nível de carbonatação, manifestou maiores valores de L_{dx} .

Finalmente, os valores de L_{dc} entre amostras devem ser cuidadosamente analisados, sabendo que os resíduos de betão com agregado calcário possuem calcite na sua constituição e, como tal, vão contribuir para o aumento deste valor. Por outro lado, nos betões com granito, G55, os agregados não são descarbonatáveis. Assim, visto que o G55 possui ainda menos quantidade de pasta do que o P35, os menores valores de L_{dc} foram obtidos neste resíduo. Uma eventual maior carbonatação ocorrida na pasta do G55 face ao P35, não terá sido suficiente para compensar o seu menor volume de pasta.

Conforme referido em 3.6.1, W_B no P35 foi determinado adicionando os valores de L_{dh} e L_{dx} a $0.41 \times (L_{dc} - L_{dca})$. Porém, no B35 e B55, parte do L_{dc} é atribuído à presença de agregado calcário na mistura, que não resultou da carbonatação prévia de CH anteriormente formado no ligante. Assim, por simplificação, nestes betões optou-se por utilizar o valor de L_{dc} determinado para o G55. Naturalmente, esta é uma suposição grosseira, visto que L_{dc} é afetado pelo tipo e idade do betão. Note-se ainda que o valor de W_B nos resíduos separados de betão apenas reflete a quantidade de água combinada na fração cimentícia, sendo naturalmente inferior à obtida na pasta pura do P35.

Em relação ao grau de hidratação, importa referir que a expressão 3.1 em 3.6.1 é apenas válida para o P35, composto apenas por pasta. Nos restantes resíduos, o valor de W_N (máximo teórico da quantidade de água de hidratação) deve ser multiplicado por um coeficiente que traduz o grau de pureza da amostra. De acordo com 4.1, foi estimado por PMM que o grau de pureza de B55, B35 e G55 na fração 250-500 μm era de 74%, 80% e 75%, respetivamente. Desse modo, na determinação de α_H optou-se por considerar coeficientes de 0.74, 0.8 e 0.75 para estes resíduos, respetivamente. Na Tabela 18 apresentam-se os valores já corrigidos de α_H . Em geral, os valores de α_H foram na ordem de 60%, sendo inferior ao obtido noutros estudos realizados no nosso departamento (Carvalho, 2020; Carriço, et al., 2020; Bogas et al., 2020). Ainda assim, pode-se considerar que as amostras se encontravam suficientemente hidratadas, podendo ser representativas de materiais cimentícios antigos. Todos os betões apresentaram níveis de hidratação semelhante, pois foram produzidos em idades semelhantes. No entanto, pelo anteriormente referido, seria esperado um menor grau de hidratação nos resíduos produzidos com menor a/c (P35 e B35). Destaca-se o facto do B35 e a pasta de referência de igual composição à matriz deste betão (P35), terem apresentado o mesmo nível de hidratação.

Na Figura 55 apresentam-se as análises de TG para os mesmos resíduos, mas agora termoativados na forma de ligantes reciclados (CRB55SL, CRB35, CRG55, CRP35). Conforme seria esperado, a termoativação realizada a 650°C provocou a desidratação dos produtos de hidratação, tornando desprezável a perda de massa até cerca de 350-400°C. Porém, conforme identificado por (Real et al.,

2020), continuou-se a verificar uma perda de massa não expectável na região de desidroxilação (Ldx). Esta perda de massa poderá ser atribuída a fenómenos de reidratação das amostras após a termoativação (durante o arrefecimento e/ou manuseamento). A perda por reidratação ocorreu para um menor intervalo de temperaturas, entre 350 e 450°C, iniciando a neoformação de CH com menor energia de ligação (Real et al., 2020). Acima de 650°C as perdas de massa foram elevadas, visto que a temperatura de termoativação na produção dos ligantes reciclados foi limitada por este valor.

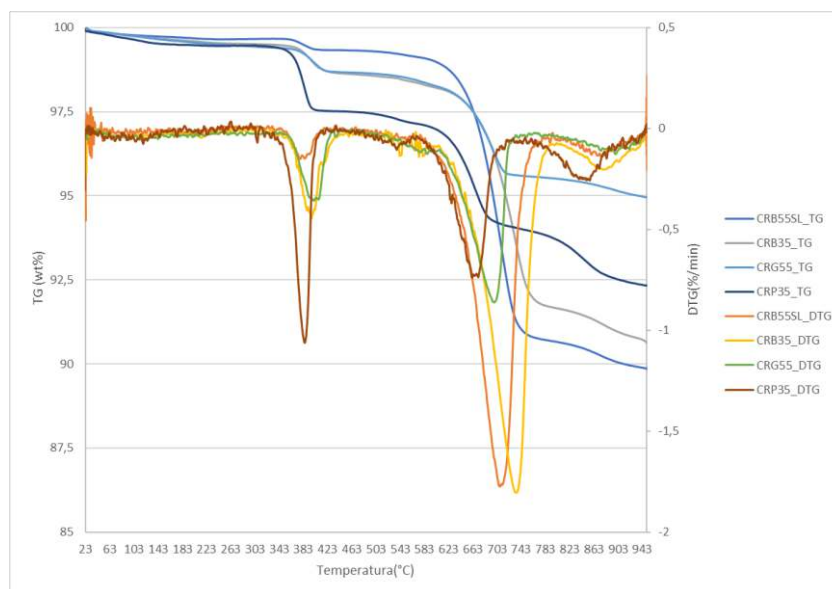


Figura 55 - Análises TG e DTG do ligante reciclado, resultante da separação dos betões B55, B35 e G55 (CRB55SL, CRB35, CRG55), bem como da pasta P35 (CRP35)

Na Tabela 18 resumem-se os valores de Ldh, Ldx e Ldc calculados para cada um dos ligantes reciclados analisados (CRP35, CRB35, CRB55 e CRG55). Na mesma tabela apresenta-se ainda o valor global da quantidade de água combinada (W_B) e respetivo grau de hidratação (α_H), que foram calculados conforme descrito em 3.6.1, mas admitindo apenas a contribuição de Ldx e Ldh, e ainda tendo em consideração os coeficientes de correção para o α_H indicados anteriormente.

Tabela 18 – Perdas de massa por desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), água combinada (W_B) e respetivo grau de hidratação (α_H) para os ligantes reciclados

Material	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc (%)	W_B (%)	α_H (%)
CRP35	0,3	1,8	5,2	2,1	9,0
CRB35	0,3	0,7	8,1	1,0	5,6
CRB55	0,1	0,2	9,5	0,4	2,2
CRG55	0,4	0,6	3,7	1,0	6,0

Confirmam-se os valores desprezáveis de Ldh nos vários CR, bem como a presença de valores residuais de Ldx associados à reidratação de algum do CaO formado após a termoativação. Por comparação com a Tabela 18, pode-se verificar que a quantidade de CH que se voltou a formar foi cerca de 57% no P35 e 11-37% nos restantes CR. Pelas razões referidas anteriormente, nomeadamente no que se refere ao grau de pureza, o P35 esteve associado a maiores valores de Ldx. Os valores de Ldc mantiveram-se praticamente constantes, o que sugere a ausência de fenómenos de pré-carbonatação após a termoativação e manuseamento dos vários CR. O grau de hidratação

estimado para os vários resíduos não foi desprezável e resultou da sua elevada sensibilidade a fenómenos de pré-hidratação, principalmente ao nível do CaO (Real et al., 2020). Porém, apesar deste fenómeno contribuir para a menor efetivação da reidratação dos ligantes reciclados nos materiais de base cimentícia, promove o apagamento da elevada quantidade de cal livre neste ligante, tal como é desejável, por exemplo, em cais hidráulicas.

Tendo por base o ensaio de ataque ácido descrito em 3.6.3, foi ainda possível estimar a composição completa dos CR provenientes de B55CL, B55SL e B35, em termos de fração de cimento, areia e agregado calcário. Na Figura 56 apresenta-se a constituição final destes ligantes, para percentagens máximas de contaminação de cerca de 25%.

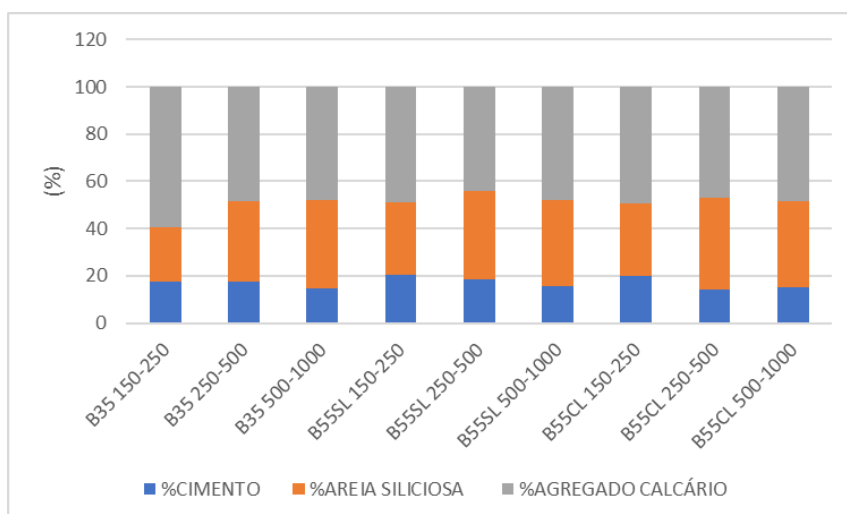


Figura 56 - Composição dos CR provindos de B55CL, B55SL e B35, em termos de percentagem de fração de cimento, areia silicosa e agregado calcário (proporções relativas ao resíduo não tratado)

4.3 Análise de TG versus PMM

Aproveitando a realização de análises de TG para os ligantes a utilizar na produção de argamassas, foi possível utilizar também esta técnica para estimar a quantidade de cimento nos materiais separados de betão da fração 250-500 μm , conforme explicado em 3.6.1 e 3.6.2. Essa avaliação foi realizada para os resíduos não tratados provenientes da separação do betão, antes de se proceder à sua termoativação. Dessa forma, utilizando esta técnica mais rigorosa, mas menos expedita, é possível aferir a qualidade das análises realizadas por PMM.

Como referido, na análise PMM foi determinada a perda de massa entre 150°C e 350°C, de modo a abranger a perda por desidratação dos produtos hidratados (3.6.1 e 3.6.2). Assim, apenas este intervalo de temperaturas foi também considerado na análise de TG. Basicamente, tanto no TG como na PMM, a estimativa do teor de pasta nos resíduos separados foi determinada por comparação da perda entre 150-350 °C no resíduo e na pasta de referência de igual composição.

Na Tabela 19 resumem-se os resultados de perda de massa obtidos por TG e PMM na fração 250-500 μm , separadas do B35, B55SL e G55. Dado que apenas a pasta de referência P35 foi analisada por TG, a estimativa do teor de cimento por esta técnica nas amostras de B55 e G55 não é correta. De

facto, em paralelo seria necessário fazer essa análise também para uma pasta de referência P55, de igual composição à das matrizes dos betões B55 e G55. Ainda assim, na Tabela 19 apresentam-se os valores estimados tendo como referência P35. A perda de massa entre 150-350°C no P35 foi de 5.26%.

Como é possível observar na Tabela 19, com recurso ao TG foi estimado um valor de 81% de pureza para o B35, que foi bastante próximo do calculado por PMM. Estes resultados, a par da análise por ataque ácido realizada em 4.1.5, sugerem que o ensaio simplificado de PMM foi adequado para estimar o teor de cimento hidratado nas amostras separadas em 4.1. Em relação aos betões B55 e G55, a análise de TG considerando P35 como referência, conduziu a estimativas inferiores do teor de pasta (erro de 5-7%). Como referido, a análise correta exigia a comparação com uma pasta de referência P55, de igual idade e composição.

Tabela 19 - Estimativa do teor de pasta pelo ensaio de TG e PMM nos resíduos separados de B55SL, B35 e G55

	TG (%)	PMM (%)
B35	81,28	80,22
B55SL	70,37	74,16
G55	70,49	75,64

4.4 Balanço do processo de separação

Tendo por base os rendimentos e os valores de pureza determinados em 4.1 para os resíduos provenientes dos diferentes tipos de betão (B55, B35 e G55), neste subcapítulo apresenta-se um balanço geral da eficiência do método e da quantidade e tipos de produtos gerados durante o processo de separação, bem como os respetivos desperdícios.

Nas Figuras 57 e 58 resumem-se os fluxos do processo de separação após a etapa de libertação relativa à britagem, moagem e crivagem dos resíduos. A Figura 57 faz uma comparação dos fluxos gerados tendo em conta os diferentes tipos de pré-tratamento (SL, CL, AR; 4.1.3). A Figura 58 faz a comparação tendo em conta a separação dos vários tipos de betões. Por sua vez, o material de dimensão inferior a 150 µm não é sujeito à separação magnética, constituindo uma mistura final composta por 40 a 45% de cimento hidratado na sua constituição. Esta fração pode ser aproveitada como fíler na produção de betão, tal como será previsto na futura pré-norma EN 197-6, a lançar brevemente (designado por “fíler” nas Figuras 57 e 58).

Nos diagramas de fluxo, os produtos estão divididos por não magnético da primeira passagem (NM1P; agregado mais puro), magnético da segunda passagem (M2P, resíduos de fração de cimento mais puros) e não magnético de segunda passagem (NM2P, solução mista de baixa pureza). Considera-se que para todos os casos estudados a fração NM1P corresponde a uma areia de elevada qualidade (*High quality sand*, HQS), visto que a percentagem de pasta aderida foi sempre inferior a 5% (ver 4.1.2). Por outro lado, considera-se que os resíduos resultantes de M2P têm qualidade para a produção de cimento reciclado se a pureza for superior a 70%. Isso sucedeu em todos os casos, na gama 150-500 µm. Assim, nesta situação, o produto resultante de M2P é designado de “Cem”, visto que é adequado

Na Figura 58 comparam-se os fluxos tendo em conta diferentes tipos de betão de origem. Neste caso, apenas o material da fração 150-250 μm é sujeito a lavagem. De referir ainda que no fluxo da separação do G55, existe um desperdício adicional resultante de uma primeira etapa de separação que tem por objetivo a eliminação prévia da mica dos agregados de natureza granítica (4.1.5).

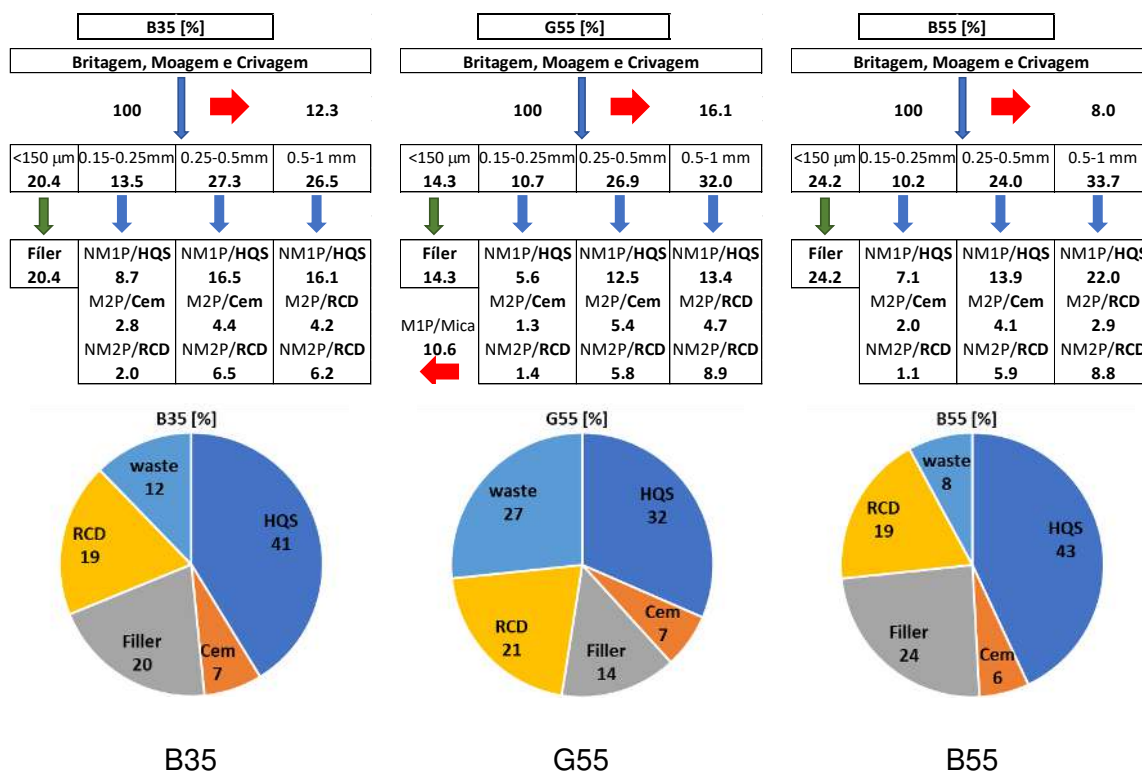


Figura 58 - Esquema do fluxo do processo de separação após moagem e crivagem em diferentes frações granulométricas. Resíduos dos diferentes tipos de betão B55, B35 e G55

Em geral pode-se concluir que o rendimento do método de separação não é muito influenciado pela compacidade do betão de origem. Verifica-se que os fluxos de separação de resíduos provenientes de betões de maior compacidade (B35) conduzem a uma ligeira redução, de 4%, na quantidade de HQS, mas a um aumento em 17% no volume de fração de pasta (Figura 58). Apesar dos betões de maior compacidade terem gerado maior quantidade de “waste”, devido à maior dificuldade de moagem, os rendimentos de passagem e a pureza da fração de pasta foram ligeiramente superiores ao do B55, não existindo grandes diferenças no balanço final dos dois tipos de betões.

No entanto, o betão com granito conduziu a quantidades de HQS significativamente mais baixas (menos 27%) do que o B55. Isso resulta sobretudo da primeira etapa de moagem ter conduzido a maiores desperdícios (16% face a 8%, Figura 58) e de uma parte do resíduo ter sido descartado durante a separação da mica. Assim, conclui-se que o processo precisa de ser otimizado para betões com agregados graníticos, tanto na fase de libertação como de separação. De qualquer forma, a separação deverá ser sempre menos eficiente nestes betões do que em betões produzidos com agregados de natureza diamagnética, como o calcário. Ainda assim, a fração de cimento atingida foi ligeiramente superior (mais 9%), sem grande prejuízo da sua pureza (ver 4.1.5).

Em termos globais, os resultados obtidos neste estudo mostram que a aplicação do método de separação proposto a detritos de betão de diferente origem permite produzir até cerca de 47% de HQS e 7% de fração de cimento. Esta fração de cimento após termoativação perde cerca de 25% do seu peso, concluindo-se que a separação permite a produção de cerca de 5% de cimento reciclado. Assim, garante-se a valorização de mais de 50% dos resíduos de betão, reconvertendo-os em produtos de qualidade para a indústria dos materiais de base cimentícia. Obtém-se ainda como subproduto, 20-24% de fíler de betão e cerca de 20% de RCD. O primeiro produto pode ser utilizável para pequenas substituições parciais de cimento (até cerca de 15%), conforme demonstrado nos estudos de caracterização mecânica de betões com incorporação de CR e fíler de betão realizado por (Real et al., 2021; Carvalho, 2021). O RCD gerado é adequado para soluções de enchimento ou para materiais de base cimentícia não estruturais ou de baixo desempenho, conforme prática atual. Finalmente, o nível de desperdícios pode atingir cerca de 8-12%. Na realidade o nível de desperdícios tende a ser superior, visto que durante as fases de libertação e separação ocorrem perdas adicionais na ordem de 5% (Hu 2020). Como referido, para resíduos de betões com agregados graníticos, o balanço final foi menos positivo.

Em suma, por cada tonelada de resíduos de betão foi possível gerar mais de **450 kg** de areia de elevada qualidade, comparável em termos de absorção às areias comerciais (<1% de absorção), **50 kg** de cimento reciclado e cerca de **200 kg** de fíler de betão. De referir que esta produtividade pode ser melhorada caso se opte, por exemplo, em reconduzir o material acima de 500 μm para o processo de moagem, garantindo-se maior quantidade de material na fração 150-500 μm , mais adequado ao método de separação proposto.

4.5 Caracterização das argamassas no estado fresco

Tal como descrito em 3.7, os materiais analisados e caracterizados em 4.2 foram utilizados na produção de argamassas (MP35, MB35, MB55SL e MG55). Para além destes materiais, foram ainda considerados para efeitos de comparação, resíduos provenientes da separação do B55 com tratamento de pré-lavagem (MB55CL), bem como cimento Portland normal (MCPN) para as argamassas de referência (REF). O CPN foi o mesmo do utilizado na produção das pastas e betões de origem. Na Tabela 20 resumem-se as argamassas consideradas neste estudo (tal como indicado em 3.7), bem como as principais propriedades analisadas no estado fresco, nomeadamente o espalhamento e a massa volúmica (MV_i). Todas as argamassas foram produzidas com a mesma relação a/l de 0,65, sendo necessário adicionar elevadas dosagens de superplastificante nas misturas com CR, de modo a garantir condições adequadas de aplicabilidade.

Tabela 20 - Espalhamento, massa volúmica fresca (MV_f) e teor de vazios (V_v)

Argamassas	a/l	SP (%)	Espalhamento(mm)	MV_f (kg/m ³)	V_v (%)
MCPN	0,65	-	289	2258	2
MP35	0,65	3.5	191	2151	4
MB35	0,65	3	206	2109	6
MB55SL	0,65	3	193	2108	6
MB55CL	0,65	3	188	-	6
MG55	0,65	3.5	151	1982	12

4.5.1 Espalhamento

Os valores obtidos no ensaio de espalhamento para cada uma das composições estudadas são resumidos na Tabela 20 e Figura 59. Dependente do tipo de composição, o espalhamento variou numa extensa gama, entre 150 mm e 290 mm, o que salienta a variação significativa de exigência de água entre os ligantes utilizados.

Conforme caracterizado em estudos anteriores (Real et al., 2020; Bogas et al., 2022; Carriço et al., 2022) o cimento reciclado apresenta estrutura porosa e uma elevada superfície específica, que pode atingir até cerca de 10 vezes a do CPN. Por outro lado, contem ainda na sua constituição cal livre que vai querer prontamente reagir com parte da água da mistura. Por estes motivos, o CR está associado a uma elevada libertação de calor de hidratação inicial e a um elevado consumo de água da mistura (Bogas et al., 2022; Shui et al., 2009; Serpell & Lopez, 2013; Wang et al., 2018). Assim, para uma dada trabalhabilidade, as argamassas com CR vão exigir um a/l significativamente mais elevado do que as de CPN, ou, como é o caso, para um dado a/l, vão apresentar consistência mais seca do que as de CPN. Neste estudo, de modo a se fazer uma comparação válida entre o desempenho de cada um dos ligantes, houve necessidade de manter o mesmo a/l entre misturas, o que só foi possível adicionando elevados teores de SP às argamassas com CR. Ainda para se garantir condições adequadas de aplicabilidade definiu-se como valor desejável de espalhamento, um valor superior a 180 mm, determinado de acordo com 3.8.1.

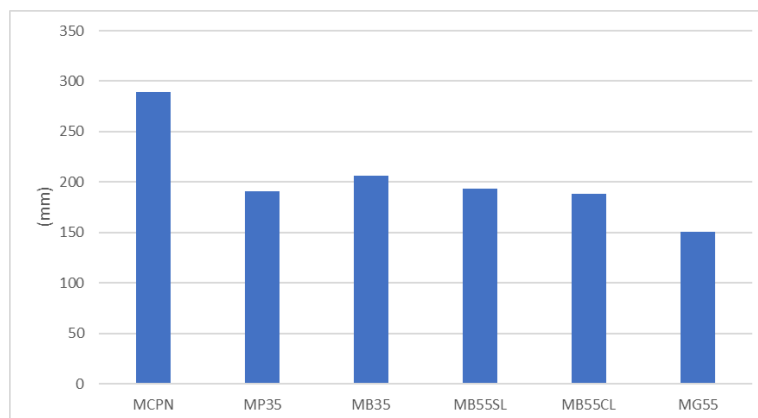


Figura 59 - Resultados dos ensaios de espalhamento das misturas produzidas

Como se observa na Figura 59 e Tabela 20, para se atingirem os valores mínimos de espalhamento nas argamassas com CR foi necessário recorrer a teores de SP superiores a 3%, mesmo partindo de argamassas com a/l de 0.65. Para este a/l, as argamassas de referência apresentaram consistência fluída, sem necessidade de adição de SP. Apesar de as argamassas apresentarem igual a/l, as diferenças de consistência da mistura com CP e com CR, faz com que as condições de compactação sejam diferentes. Neste caso, as misturas menos fluídas com CR deverão introduzir maior volume de vazios, reduzindo a sua compacidade, conforme será abordado em 4.3.2.

Em geral, as várias argamassas produzidas com CR provindo da separação de betão com agregado calcário apresentaram igual consistência, para o mesmo teor de SP utilizado. O espalhamento obtido foi adequado a uma boa aplicabilidade da argamassa, manifestando elevada coesão e ausência de segregação ou exsudação (Figura 60 à esquerda). A diferença foi pouco significativa para o B55 com diferentes tipos de pré-tratamento. O ligeiro aumento do espalhamento no B55SL pode ser justificado pela tendência deste CR ter uma pureza ligeiramente inferior ao do B55CL (4.1.3). De facto, é a fração cimentícia que é responsável por elevadas exigências de água, sendo de esperar que quanto mais contaminado se encontrar o ligante por agregado não poroso de idêntica granulometria, menor vai ser a sua exigência de água. Por sua vez, verifica-se que a argamassa com CR provindo do B35 apresentou maior fluidez, mesmo sabendo que a pureza do CR foi superior à do B55. Isso pode ser atribuído à menor porosidade intrínseca e menor área superficial deste CR (proveniente de uma pasta de maior compacidade), o que faz reduzir a sua exigência de água. A mesma tendência foi reportada por (Carriço et al., 2022) em argamassas produzidas com CR proveniente de pastas puras com a/l de 0.35 e 0.55. Ainda assim, pode-se considerar que a compacidade do betão de origem não teve grande influência na trabalhabilidade das argamassas com CR.



Figura 60 - Espalhamento das argamassas MB35 (esquerda) e MG55 (direita)

No entanto, o mesmo não sucedeu com a argamassa produzida com CR provindo da separação do betão G55. Apesar de se terem verificado níveis idênticos de pureza neste ligante face ao B55, a sua exigência de água foi bastante mais elevada. Inclusivamente, a argamassa MG55 não foi capaz de atingir as condições mínimas de espalhamento inicialmente estabelecidas, tendo apresentado uma consistência demasiado seca e falta de coesão com 151 mm de espalhamento (Figura 60 à direita), que não pôde ser corrigida por adição de mais SP (atingiu o seu ponto de saturação). Esta argamassa apresentou-se bastante arenosa e de grão grosseiro, o que se justifica pela menor eficiência ocorrida durante a moagem da fração separada de cimento para a produção do CR. A contaminação por agregado duro de natureza siliciosa dificulta a obtenção de CR mais fino, com consequências ao nível da lubrificação da mistura e do desenvolvimento da sua hidratação. Infelizmente, no presente trabalho não foi possível determinar as curvas granulométricas dos vários CR por difração de raio laser, conforme seria desejável. Naturalmente, a consistência seca e pobre trabalhabilidade da argamassa MG55 vai-se refletir na sua compacidade, conforme discutido em 4.1.4.

Finalmente, pelo motivo referido anteriormente, nomeadamente no que se refere ao nível de pureza, a argamassa com CR proveniente da pasta pura P35 apresentou menor fluidez para um maior teor de SP do que o betão produzido com uma matriz de igual composição (B35).

4.5.2 Massa volúmica fresca e teor de vazios

Os resultados da medição da massa volúmica fresca, MV_f , apresentam-se na Tabela 20 e Figura 61. Na mesma tabela apresentam-se também os valores da massa volúmica fresca, MV_T , bem como do volume estimado de vazios, V_v .

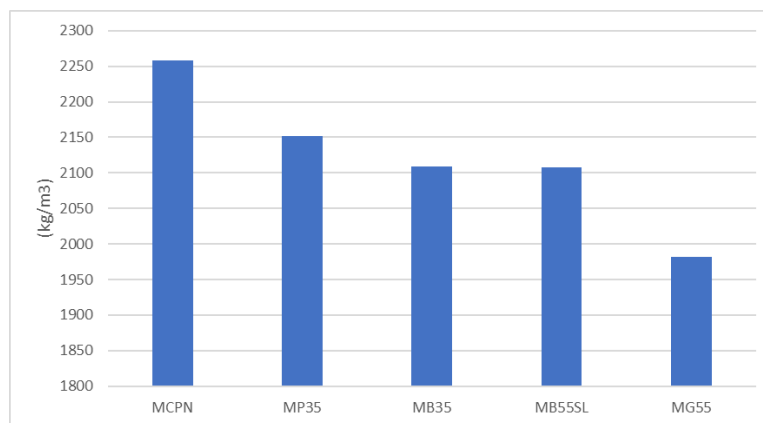


Figura 61 - Resultados dos ensaios de massa volúmica fresca de cada mistura produzida

Conforme seria esperado, a massa volúmica fresca foi menor nas misturas com CR do que com CPN, pois a massa volúmica do CPN é superior à do CR (Carriço et al., 2022). Essa redução deverá ser superior nos CR provenientes da separação do betão, pois estes encontram-se contaminados por agregado, que possui menor massa volúmica do que a fração de cimento anidro. Isso é confirmado quando se compara a argamassa MP35 com a MB35, de menor massa volúmica. No entanto, este motivo não é suficiente para justificar a diferença tão significativa de MV_f da MCPN face às restantes argamassas, nem permite explicar a menor massa volúmica atingida em MG55.

Para se perceber melhor estas diferenças, deve-se ter também em atenção a compacidade atingida pelas argamassas após compactação (V_v , Tabela 20). Como referido, visto que a argamassa de referência com CPN apresentava maior fluidez, conduziu a menores volumes de vazios. Exceto na argamassa MG55, o volume de vazios atingido nas misturas com CR foi cerca de 2 a 3 vezes superior ao de MCPN. A diferença foi ainda mais notória na argamassa MG55, cujo V_v atingiu o valor de 12%, cerca de 6 vezes superior ao de MCPN. Como para cada 1% de vazios adicional pode estar associado uma quebra de 5% na resistência (Bogas 2011), este fenómeno vai ter bastante relevância no desempenho de MG55. Assim, a redução observada na MV_f é essencialmente atribuída à menor consistência das argamassas que afetou a sua compactação.

Na Figura 62 observa-se o aspeto de provetes de argamassa produzidos com MB35 e MG55, após a sua desmoldagem a 1 dia. Analisando com atenção, percebe-se a natureza mais friável e o aspeto mais arenoso e grosseiro das argamassas MG55, apresentando fraca resistência nos cantos e arestas dos provetes.



Figura 62 - Provetes de argamassa das composições MB35 (esquerda) e MG55 (direita)

4.6 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Neste subcapítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica (compressão e flexão), absorção capilar e porosidade aparente. Devido à limitação da quantidade de cimento reciclado que se pode produzir em laboratório, só foi possível realizar ensaios de resistência mecânica aos 3 e 28 dias de idade. Em alguns casos foram realizados ensaios aos 90 dias, mas envolvendo apenas ensaios de compressão sobre 2 provetes, existindo uma fraca representatividade da amostra. Neste capítulo apresentam-se os resultados médios obtidos em cada ensaio, podendo-se consultar no Anexo I os resultados obtidos em cada provete.

4.6.1 Resistência mecânica

Na Tabela 21 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão e à flexão para as diferentes idades de ensaio. Os valores do coeficiente de variação, CV, obtido aos 3 e 28 dias de idade apresentam-se no Anexo I. Em geral este coeficiente foi inferior a 5%, indicando uma baixa variabilidade dos resultados obtidos. Nas Figura 63 e 64 resumem-se os valores médios de resistência à compressão e flexão. Os resultados serão discutidos apenas para a resistência à compressão, visto que a resistência à flexão segue a mesma tendência.

Tabela 21 - Valores médios de resistência à compressão, f_{cm} , e flexão, f_{ctm} , das argamassas (MPa)

Cimento	a/l	3 dias		28 dias		90 dias
		f_{cm}	f_{ctm}	f_{cm}	f_{ctm}	f_{cm}
MCPN	0,65	14,5	3,5	35,2	7,4	-
MP35	0,65	5,8	1,4	15,5	4,3	-
MB35	0,65	4,4	1,4	13,7	3,9	17,2
MB55SL	0,65	6,0	2,1	15,1	4,2	16,9

MB55CL	0,65	7,0	2,3	16,1	4,0	18,0
MG55	0,65	2,8	0,9	10,5	3,3	10,8

Tendo em conta argamassas de igual a/l, verificou-se que a resistência à compressão das argamassas com cimento reciclado foi cerca de 40-48% da argamassa de referência, aos 3 e 28 dias de idade. Num trabalho anterior de (Bandeira, 2020) verificaram-se diferenças menores, com as argamassas de cimento reciclado a atingirem 77% da argamassa de CPN de igual composição. De facto, o autor constatou que argamassas de maior a/l (0.72) produzidas com 100% CR foram capazes de atingir 28 MPa aos 28 dias de idade. A razão pode estar ligada ao facto das argamassas terem sido produzido com CR proveniente de pastas puras de baixa compacidade, P55. O mesmo autor também produziu argamassas com CR proveniente de P35, tendo atingido apenas 18 MPa aos 28 dias, mais próximo do obtido no presente trabalho para a argamassa MP35. No entanto, o a/l considerado nessa argamassa foi de 0.8, superior ao 0.65 do presente estudo. A maior perda de resistência na argamassa com CR de P35 face ao de P55, foi atribuída a uma menor capacidade de reidratação deste ligante devido à sua menor área superficial (Bandeira, 2020). A mesma tendência é observada na Tabela 21, por comparação de MB55 com MB35. Apesar da MB35 ter sido produzida com um CR de maior pureza, a resistência foi inferior.

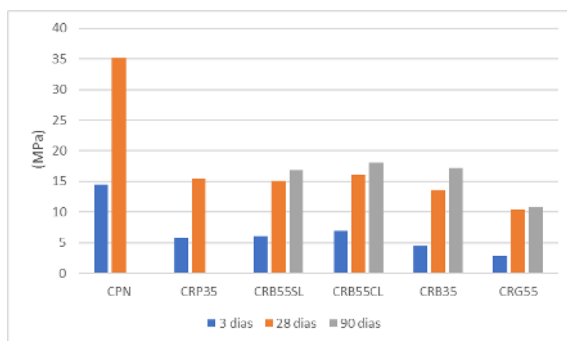


Figura 63 - Resistência à compressão média das argamassas produzidas aos 3, 28 e 90 dias de idade

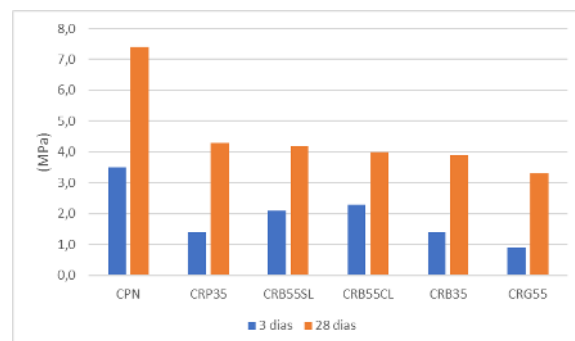


Figura 64 - Resistência à flexão média das argamassas produzidas aos 3 e 28 dias de idade

Noutro trabalho de (Real et al., 2021) foi também verificado que betões com a/c de 0.65 produzidos com 100% CR de pastas puras com a/l de 0.55, atingiram resistências de cerca de 83% das obtidas em betões de referência com CPN de igual a/l (33 MPa aos 28 dias). Assim, independentemente do tipo de CR, é possível concluir que foram produzidos CR de menor eficiência do que o reportado em outros trabalhos. Tal como avançado por (Real et al., 2020), isso pode estar relacionado com os eventuais fenómenos de pré-hidratação discutidos em 4.3. De facto, aos 3 dias de idade, em que é frequentemente reportado uma maior capacidade de hidratação do CR face ao CPN (Bogas et al., 2022; Shui et al., 2009; Serpell & Lopez, 2013) foram verificadas perdas de resistência semelhantes e valores reduzidos de resistência. No entanto, o fenómeno de pré-hidratação foi igualmente verificado por (Real et al., 2021), sem ter causado perda significativa de resistência e capacidade de hidratação. Uma razão mais importante, que terá contribuído para a queda elevada de resistência, deverá estar relacionada com a fraca compacidade atingida nos provetes de argamassa com CR, conforme discutido em 4.5.2 (com um aumento em mais do dobro do teor de V_v). Naturalmente, a maior quebra de resistência foi verificada na argamassa MG55, cujo teor de vazios atingiu cerca de 12%.

O tipo de pré-tratamento (secagem ou lavagem) teve pouca influência na resistência mecânica, visto que o CRB55SL apresentou apenas ligeiramente menos pureza do que o CRB55CL. Neste caso, a dispensa do processo de lavagem, que implica um consumo energético muito representativo no processo (Sousa & Bogas, 2021), conduziu a uma redução de apenas 6% na resistência à compressão aos 28 dias.

Por sua vez, conforme referido, a compacidade do betão de origem afetou ligeiramente a resistência mecânica. Quando os resíduos apresentaram maior compacidade (B35), a resistência à compressão aos 28 dias foi penalizada em 15% face à argamassa MB55. Isto devido à dificuldade de moagem do betão de maior compacidade.

Finalmente, importa destacar o facto da argamassa MP35 e da argamassa MB35 terem conduzido a resistências semelhantes aos 3 e 28 dias, embora ligeiramente inferiores quando se utilizou CR separado de resíduos de betão (12%). Maiores diferenças foram verificadas em outros trabalhos realizados no nosso grupo de investigação (Leal, 2021; Carriço et al., 2022), tendo-se atribuído essa redução à diluição do teor de clínquer no CR proveniente de betão, devido à contaminação por agregado. No entanto, conforme referido em 3.7.2, no presente trabalho adotou-se uma estratégia diferente, optando-se por aumentar a dosagem de ligante das argamassas com CR provindo de betão. Esta alteração, em que parte da areia fina foi substituída pela fração contaminada de agregado fino no CR, contribuiu para a redução de trabalhabilidade de MB55 e MB35, que se traduziu numa diminuição de compacidade (aumento de V_v , Tabela 21) e na conseqüente redução ligeira da resistência à compressão. Ainda assim, pode-se concluir que o método de separação seguido no presente trabalho foi eficaz e permitiu conduzir à produção de cimentos reciclados de desempenho mecânico similar ao proveniente de pastas puras artificiais.

Dos escassos resultados obtidos aos 90 dias, verifica-se que a resistência mecânica continuou a evoluir até esta idade, em parte contrariando a tendência reportada por outros autores na literatura, que sugerem a existência de um patamar de resistência em idades jovens (Carriço et al., 2020b). De acordo com (Zhang et al., 2018), o aumento de resistência a partir de 28 dias tende a ser limitado pela menor capacidade resistente das partículas porosa do CR. No presente trabalho verificou-se sobretudo uma evolução mais importante no B35 (26%), tendo atingido uma resistência inclusivamente superior à do B55, ao contrário do observado aos 28 dias. Por um lado, dado que o CRB35 apresenta menor superfície específica e eventualmente menor finura (por analogia com os resultados da Figura 47) do que o CRB55, a evolução da hidratação tende a ser mais lenta no CRB35. Por outro lado, seguindo a ideia de (Zhang et al., 2018), dado que o CR proveniente de betões de maior compacidade apresenta menor porosidade, a sua capacidade resistente tende a ser mais elevada, incrementando o patamar limite de resistência da argamassa.

4.6.2 Porosidade aparente

A porosidade aparente das argamassas foi avaliada através do ensaio descrito em 3.8.4, dando uma medida do seu volume de poros acessíveis à água. Na Tabela 22 resumem-se os resultados estimados

da porosidade aparente, P_{ab} , e das massas volúmicas real, MV_{real} , e aparente, MV_{ap} (seca), das argamassas.

Tabela 22 - Valores médios da porosidade aparente, P_{ab} , e das massas volúmicas real, MV_{real} , e aparente, MV_{ap} das argamassas

Argamassa	MV_{real} (kg/m³)	MV_{ap} (kg/m³)	P_{ab} (%)
MCPN	2563,7	2085,7	18,7
MP35	2532,8	1961,6	22,6
MB35	2526,5	1932,1	23,5
MB55SL	2451,6	1858,9	24,2
MB55CL	2458,2	1853,1	24,6

Seguindo a lógica observada para a resistência à compressão, a argamassa que apresentou menor porosidade global foi a MCPN de referência. Por sua vez, as argamassas com CR provenientes de resíduos de betão apresentaram porosidades cerca de 30% superiores face a MCPN. De acordo com (Bogas et al., 2020), que realizou um estudo detalhado de caracterização da microestrutura de pastas produzidas com CR, verifica-se que a porosidade global aos 28 dias tende a ser apenas ligeiramente superior à de matrizes com CPN de igual a/l. O ligeiro aumento de porosidade na argamassa com CR é atribuído ao menor desenvolvimento de produtos de hidratação a longo prazo, visto que a quantidade de compostos que pode ser desidratada e novamente reidratada é menor. Assim, confirma-se que no presente trabalho ocorreu um menor desempenho do CR do que o verificado em estudos anteriores. Mais uma vez, isso deverá estar relacionado com a menor trabalhabilidade das argamassas com CR, que promoveram um aumento do volume de vazios após compactação, conforme observado em 4.5.2. De facto, sabendo que as argamassas foram produzidas com a mesma relação a/l, e admitindo níveis de hidratação semelhantes no CR e no CPN, conforme demonstrado no trabalho de (Bogas et al., 2022), a porosidade global passa a ser essencialmente afetada pela compacidade atingida nas argamassas após compactação. Na Figura 65 confirma-se uma elevada correlação entre a porosidade global e o teor de vazios das argamassas analisadas neste trabalho. Tal como também seria de esperar, a argamassa com CR proveniente de P35 apresentou porosidade intermédia (21% maior do que a de MCPN), estando de acordo com os resultados de V_v e resistência à compressão em 4.5.2 e 4.6.1, respetivamente. O valor ligeiramente maior de porosidade na argamassa MB55 face à MB35, pode ser explicado pela maior porosidade e menor massa volúmica das partículas de CRB55.

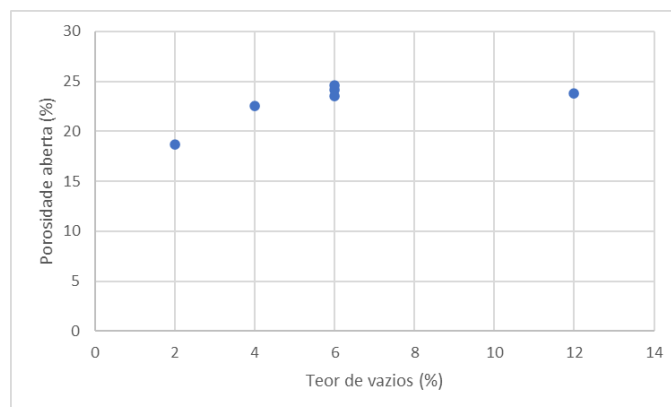


Figura 65 - Relação entre a porosidade aparente, P_{ab} , e o valor estimado do volume de vazios, V_v , das argamassas

Em suma, os resultados obtidos neste capítulo confirmam que a elevada redução de resistência mecânica observada em 4.6.1 resultou do menor grau de compactação atingido nas argamassas com CR.

4.6.3 Absorção capilar

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção capilar, realizados de acordo com 3.8.3. Nesta tabela apresentam-se os valores médios de absorção aos 20 minutos, 6 horas e 72 horas (a longo prazo), bem como os coeficientes de absorção, determinados por regressão linear entre $\sqrt{20}$ minutos e $\sqrt{360}$ minutos (6 horas). Note-se que para esta propriedade foram apenas analisadas as argamassas de referência (MCPN) e as produzidas com CR proveniente de pasta (MP35) ou de betão (MB35), de relação a/l de 0.35.

Tabela 23 - Absorção capilar média aos 20 minutos, 6 horas e 72 horas, e coeficiente de absorção (CA) das argamassas

Argamassa	abs _{20min} (kg/m ²)	abs _{6horas} (kg/m ²)	abs _{72horas} (kg/m ²)	CA (x 10 ⁻³ kg/m ² min ^{0,5})
MCPN	0,011	0,041	0,082	1,93
MP35	0,012	0,044	0,093	2,17
MB35	0,011	0,045	0,110	2,23

Ao contrário do observado nos ensaios anteriores, as argamassas de CR apresentaram um desempenho muito semelhante ao da argamassa de referência com CPN, quer em termos de absorção até às 6 horas, quer em termos de coeficiente de absorção. Apenas a longo prazo, se nota uma menor absorção final (às 72 horas) em MCPN, sendo 26% inferior face a MB35, mais de acordo com as diferenças de porosidade verificadas em 4.6.2.

Para se perceber a diferença de comportamento em termos de absorção capilar, importa primeiro ter em consideração a forma como se desenvolve a microestrutura das matrizes com CPN e com CR. De acordo com o trabalho de (Bogas et al., 2020), verifica-se que ao contrário das pastas com CPN, as pastas com CR desenvolvem uma microestrutura bifásica, composta pela porosidade interpartícula (entre partículas de CR) e intrapartícula (porosidade interior de CR). Assim, parte da água da mistura

é absorvida no espaço intrapartícula do CR, fazendo com que diminua o volume de água no espaço exterior interpartícula, aproximando as partículas umas das outras (Figura 66). Isso significa que para uma dada relação a/l, a distância entre partículas do CPN tende a ser maior, conduzindo a porosidades mais grosseiras entre partículas. Desse modo, a microestrutura das pastas com CR tende a ser mais refinada do que a das pastas com CPN de igual a/l. De facto, (Bogas et al., 2020), recorrendo a ensaios de porosimetria de mercúrio e de adsorção de nitrogénio, confirmaram o desenvolvimento de mais poros de menor dimensão nas matrizes com CR do que com CPN, apesar de ambas as pastas terem apresentado idêntica porosidade global (definida pelo valor igual de a/l nas duas argamassas).

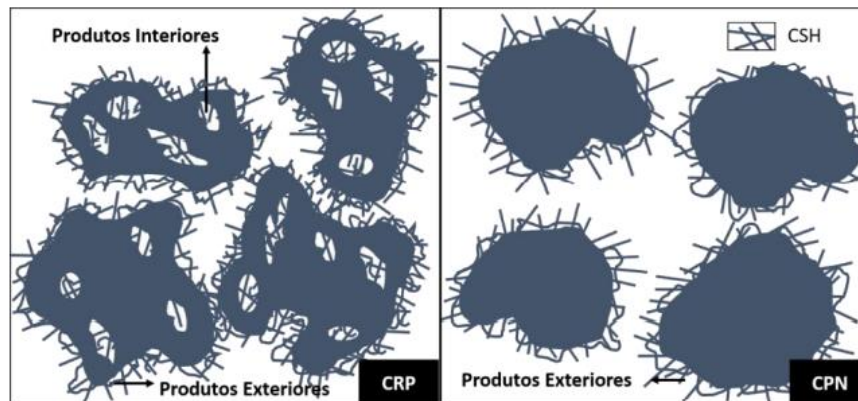


Figura 66 - Desenvolvimento de porosidade em pastas com CR proveniente de pastas puras (CRP, à esquerda) e em pastas com CPN (à direita). Esquema indicativo (Real et al. 2020)

Devido ao desenvolvimento de microestruturas mais refinadas, noutros trabalhos realizados no nosso grupo de investigação no IST, verificou-se que a absorção capilar de argamassas (Cariço et al., 2022) e betões (Cariço et al., 2021), tende a ser inferior quando se utiliza CR em substituição de CPN (para a mesma relação a/l).

No presente trabalho, a absorção capilar foi superior nas argamassas com CR, mas como referido, a diferença de desempenho foi bastante menor do que o observado na resistência à compressão e no ensaio de porosidade aparente. Isso sugere que o aumento de porosidade das argamassas com CR, resultante da maior dificuldade de compactação, foi parcialmente compensado pelo desenvolvimento de uma matriz de microestrutura mais refinada. Naturalmente, a longo prazo, quando toda a porosidade fica acessível, a absorção já tende a ser significativamente superior nas argamassas com CR.

Finalmente, tal como observado em outros ensaios, confirma-se um desempenho semelhante nas argamassas com CR proveniente de betão (B35) ou proveniente de pastas puras (P35), associado a uma pureza mais elevada. Logo, pode-se concluir que o método de separação considerado no presente trabalho é eficiente e permite caminhar com otimismo para a resolução de um dos principais problemas relacionados com a reutilização de RCD – a individualização prévia e efetiva dos vários resíduos de modo a valorizá-los como matéria-prima de elevada qualidade para a aplicação em novos produtos da construção, mais eco-eficientes.

(página intencionalmente deixada em branco)

5. Conclusões

No presente capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido de acordo com a campanha experimental apresentada no capítulo 3. Tendo em consideração os objetivos definidos no capítulo 1, pretendeu-se aplicar e avaliar um novo método de separação de resíduos de betão recentemente desenvolvido e patenteado no IST, visando a obtenção de areias recicladas de elevada qualidade (HQS) e a produção de cimento reciclado (CR) mais eco-eficiente. A eficiência do método de separação foi analisada para diferentes frações granulométricas, de modo a definir a gama ótima de aplicação do método, conduzindo a produtos separados de melhor qualidade e com rendimento mais elevado. O estudo foi realizado para diferentes tipos de pré-tratamento (sem lavagem – SL; com lavagem – CL; com limpeza por ar - AR) tendo em consideração a sua extensão a distintos tipos de betões, produzidos com diferente compactidade ($a/l=0.35$ ou 0.55) e tipo de agregado (calcário, granito). Nesta fase, procedeu-se também à análise e otimização de vários parâmetros do método de separação magnética, como é o caso do número de passagens, abertura do divisor, velocidade do tapete e frequência do alimentador. Finalmente, realizou-se um estudo de caracterização de argamassas produzidas com os diferentes tipos de CR, termoativados a partir da fração cimentícia dos vários tipos de resíduos de betão resultantes do método de separação proposto. Desse modo, o presente trabalho visou estender e complementar o estudo inicial de desenvolvimento do método, realizado por Hu (2020), contribuindo para a sua maior validação e implementação prática.

No final deste capítulo são ainda sugeridas algumas propostas de desenvolvimento futuro, tendo por base o aumento do TRL associado à técnica de separação proposta, bem como a sua extensão a um maior domínio de utilização.

5.1 Principais resultados

Inicialmente foi analisada a influência de diferentes parâmetros de separação magnética no rendimento e qualidade dos produtos obtidos, tendo-se procedido ao seu ajuste de modo a melhorar a eficiência do processo. O nível de purificação do produto final aumentou com o incremento da abertura, “a”, do divisor e do número de passagens no rolo. A velocidade do tapete, “v”, e a frequência do alimentador, “f”, foram limitadas superiormente, de modo a não comprometer a qualidade de separação. Conclui-se que quanto menor for a fração granulométrica do resíduo a separar, maior terá de ser a “a” e menores terão de ser “v” e “f”. Os valores de “a” devem ser aumentados e os valores de “v” diminuídos em segundas passagens em que se exijam frações de cimento separadas de maior pureza. Otimizando o ajuste destes parâmetros foi possível garantir níveis elevados de eficiência de separação em resíduos da fração 150-500 μm , para níveis de pureza superiores a 75% na fração cimentícia, e para contaminações inferiores a 2% na fração de areia reciclada de elevada qualidade (HQS). Concluiu-se ainda que a realização de apenas duas passagens no rolo de separação, conduziu ao melhor compromisso entre rendimento, purificação e duração do processo.

Conforme sugerido no trabalho de (Hu, 2019), confirma-se que a primeira fase de libertação dos constituintes de betão, com recurso a britagem, moagem e crivagem, deve ser implementada de modo

a que o resíduo apresente dimensão máxima inferior a 1 mm. O resíduo deve ainda ser dividido em frações granulométricas pouco extensas, de modo a não reduzir a eficiência do processo. Tendo em consideração diferentes tipos de resíduos de betão, no presente trabalho concluiu-se que a separação é apenas efetiva nas frações 125-150 μm , 150-250 μm e 250-500 μm , tendo estas que ser tratadas em separado durante a aplicação do método.

Os betões de maior compacidade ou produzidos com agregados mais duros (granito) apresentaram uma menor eficiência de moagem, conduzindo a maiores percentagens de desperdício acima de 1mm, e a menor fração de material não tratável, abaixo de 125-150 μm .

Em geral, o processo de libertação concentrou maior teor de material cimentício nas frações granulométricas de menor dimensão, em especial abaixo de 150 μm . Nesta fração foram obtidos teores de cimento de aproximadamente 40-45%, o que impossibilitou a recuperação de cerca de 45% do cimento hidratado originalmente existente nos resíduos de betão. O processo de libertação seguido neste trabalho foi menos eficiente do que o realizado em estudos anteriores, tendo em conta este fator. O teor de cimento retido e não aproveitado acima de 1 mm, foi pouco significativo. No total, tendo em conta a gama granulométrica de utilização do método, apenas 30% de cimento hidratado inicial foi utilizado. Finalmente, o processo de libertação não conduziu a diferenciações relevantes do teor de areia e agregado calcário retido em cada fração granulométrica.

Na fração 125-500 μm (gama preferencial de aplicação do método) a separação conduziu a frações de pasta de maior grau de pureza para partículas abaixo de 250 μm , mas maiores produtividades para partículas acima desta dimensão. No entanto, para qualquer das frações granulométricas enquadradas nesta gama foi possível obter níveis de eficiência muito elevados, para graus de pureza entre aproximadamente 75% e 85%, em massa, que corresponde a valores superiores a 90% de pureza, em volume. Acrescente-se que areia reciclada de elevada qualidade (HQS) pôde ser recuperada na fração entre 150 μm e 1 mm, atingindo-se níveis de pasta aderida geralmente inferiores a 2%, a que corresponde absorções inferiores a 1%. Esta HQS, comparável a areias naturais comerciais, representou mais de 60% do resíduo total entre 150 μm e 1 mm. Demonstra-se assim a validade e excelente eficiência do método de separação proposto.

A produtividade do método, estimado com base em análises laboratoriais, não foi elevada, tendo-se atingido valores inferiores a 35 kg por hora e metro de largura de tapete. As soluções industriais permitem melhores produtividades e beneficiam do facto de se poder incorporar rolos em série e linhas de produção em paralelo.

Em relação ao pré-tratamento dos resíduos de betão, o processo de lavagem prévia (CL) conduziu a maiores purezas da fração cimentícia e da areia reciclada. Em geral, a limpeza por fluxo de ar (AR) conduziu a resultados intermédios, mas próximos de CL. No entanto, o processo sem lavagem prévia (SL) é o mais vantajoso em termos de consumo de energia e impacto ambiental, justificando-se a sua utilização para frações superiores a 250 μm , para a qual foi registado uma perda de pureza da fração cimentícia face a CL inferior a 1%. Mesmo para a fração 150-250 μm a perda de pureza foi inferior a 8%. O método CL evidenciou-se mais no aumento do rendimento de HQS, tendo sido até 30% superior.

Em face dos resultados obtidos neste estudo, perspectiva-se que a pré-lavagem possa ser dispensada no processo industrial, pelo menos para partículas superiores a 250 μm .

A compacidade do betão de origem teve apenas ligeira influência no processo de separação. O aumento de compacidade dos resíduos de betão facilitou a obtenção de frações cimentícias mais puras, tendo sido até 7% superior em resíduos provenientes de betões com a/c de 0.35 do que em resíduos de betão com a/c de 0.55. A separação de betão com agregados graníticos introduz dificuldades adicionais, pois exige a separação prévia da componente magnética destes agregados. Isso levou à redução do rendimento de separação ao nível da quantidade de fração cimentícia e HQS recuperados. A separação de mica do agregado granítico não foi efetiva, obtendo-se um produto misto contaminado com fração cimentícia que não conseguiu ser recuperável. No entanto, embora em menor quantidade, nestes betões também foi possível obter frações cimentícias com pureza superior a 75% e HQS com menos de 5% de pasta aderida, associadas a absorções inferiores a 3%. Conclui-se assim que o estudo realizado neste trabalho permitiu demonstrar a validade e elevada eficiência do método de separação para diferentes tipos de betão, com relação a/c entre 0.35 e 0.55, e tendo em conta agregados de natureza calcária ou granítica.

Do balanço geral do processo de separação aplicado aos diferentes tipos de resíduos analisados, conclui-se que é possível obter cerca de 47% de HQS e 5% de CR, garantindo a recuperação e valorização de mais de 50% dos resíduos de betão. Para além destas matérias-primas de elevada qualidade para a indústria dos produtos de base cimentícia, o processo gerou ainda 20-25% de fíler e cerca de 20% de RCD, como subprodutos. A quantidade de desperdícios totais do processo foi inferior a 20%. Numa visão global, por cada tonelada de RCD de betão foi possível recuperar e valorizar mais de 450 kg de areia, 50 kg de CR e 200 kg de fíler.

Confirmou-se ainda que os processos de pré-tratamento tiveram pouca influência na qualidade e quantidade da fração cimentícia obtida no processo, mas a pré-lavagem permitiu incrementar o teor de HQS em cerca de 11%. Por outro lado, a separação de betões de maior compacidade implicou uma redução de 4% no teor de HQS face a betões correntes com a/c de 0.55, mas a qualidade e quantidade da fração cimentícia foi melhorada (17%). Em betões com granito, o rendimento final de HQS foi 27% mais baixo, mas o teor de fração cimentícia não foi prejudicado.

A validade do ensaio expedito de PMM utilizado para estimar o grau de pureza da fração cimentícia e de HQS foi aferido por ensaios de ataque ácido e de termogravimetria, tendo-se confirmado erros de estimativa pouco significativos.

No presente trabalho foram produzidos cimentos reciclados (CR) a partir da termoativação de resíduos recuperados dos betões B55, B35 e G55, na fração 250-500 μm , bem como da pasta pura P35. Por termogravimetria confirmou-se a desidratação efetiva dos resíduos separados e termo ativados, bem como a elevada pureza das frações cimentícias obtidas.

Os cimentos reciclados produzidos foram sensíveis à pré-hidratação da cal livre antes de serem aplicados nas argamassas. A reidratação precoce de qualquer dos CR estudados não ocorreu ao nível dos principais produtos de hidratação, pelo menos com significado, o que afetaria a sua capacidade de

hidratação nas argamassas. Também não foi verificada pré-carbonatação dos CR produzidos, conforme desejável. Os CR produzidos a partir de resíduos de betão com agregado calcário foram caracterizados por apresentarem cerca de 75-80% de fração cimentícia, 5-10 % de areia e 20-25% de agregado calcário (antes da termoativação).

Finalmente, foram caracterizados no estado fresco e endurecido argamassas produzidas com 100% de incorporação dos CR produzidos no trabalho, e comparados com argamassas de referência apenas com cimento Portland normal (CPN). As argamassas com CR apresentaram elevada exigência de água, afetando a sua trabalhabilidade, condições de aplicação e compactação. Isso exige a adição de elevados teores de SP e conduziu a menores compacidades do que as argamassas de CPN. Em particular, as argamassas com CR provindo de betões com agregado granítico, manifestaram baixa trabalhabilidade e compactação, afetando o seu desempenho no estado endurecido.

Devido à menor compactação das argamassas com CR, a resistência à compressão foi cerca de metade da observada nas argamassas com CPN, obtendo-se piores desempenhos do que em outros trabalhos realizados anteriormente no grupo de investigação. Corrigindo as composições, para igual relação água/fração cimentícia, conclui-se que o CR proveniente de resíduos de betão teve um desempenho semelhante ao proveniente de pastas puras artificiais.

Os resultados de porosidade global corroboraram a menor compactação verificada nas argamassas com CR. Porém, o coeficiente de absorção capilar foi apenas ligeiramente inferior nas argamassas com CR do que com CPN, contrariando o verificado nos restantes ensaios. A menor compactação e maior porosidade das argamassas com CR foi parcialmente compensado pelo desenvolvimento de matrizes de pasta com microestrutura mais refinada. A absorção capilar a longo prazo foi significativa superior nas argamassas com CR (26%), estando de acordo com os resultados de porosidade global.

O tipo de pré-tratamento e a compactação do betão de origem tiveram pouca influência nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

Em suma, conclui-se que o método de separação abordado neste trabalho foi eficiente, permitindo níveis de separação e purificação elevados, compatíveis com a produção de CR de desempenho semelhante ao obtido artificialmente de pastas puras. Neste trabalho foi possível obter dois produtos de excelência a partir de resíduos de betão, contribuindo para a importante valorização dos RCD.

5.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho, realizado na sequência do estudo inicial realizado por Hu (2020), permitiu evidenciar o enorme potencial do método de separação recentemente desenvolvido e patenteado no IST, no âmbito do projeto EcoHydb (cdwvalue.eu). Porém, apesar de se ter validado a extensão do método a diferentes tipos de resíduos de betão e distintas condições de pré-tratamento, é ainda necessário realizar investigação adicional, conforme se sugere nos seguintes pontos:

- Otimizar o processo mecânico de libertação de modo a permitir melhores eficiências do método de separação numa gama mais alargada de frações granulométricas;

- Modelação numérica do método de separação magnética, com vista a otimizar de forma mais racional os parâmetros de separação e a se atingirem níveis de rendimento e pureza superiores;
- Avaliar a influência da carbonatação nas várias etapas de libertação e separação, procurando definir estratégias para reduzir a importância desta ação;
- Estender o estudo de caracterização de materiais de base cimentícia com cimentos reciclados produzidos a partir da separação de resíduos de betão, a diferentes produtos de construção (betão, argamassas de reboco, elementos pré-fabricados, etc.).
- Caracterização e avaliação das areias recicladas produzidas e análise do seu desempenho em materiais de base cimentícia. Comparação com o desempenho de produtos de referência produzidos com areia natural;
- Análise económica e ambiental do processo de gestão e separação de resíduos, de modo a avaliar a sua viabilidade e competitividade face a produtos alternativos existentes no mercado, nomeadamente areias naturais e outras adições;
- Análise de alternativas que visem a redução dos aspetos negativos associados à elevada exigência de água dos CR.
- Colaboração com a indústria no sentido de aumentar o TRL do processo e tornar possível a sua implementação à escala industrial.

Referências bibliográficas

Publicações escritas

- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., & Ehlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 609–613. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>
- Angulo, S. C., Mário, J., Guilge, S., Quarcioni, V. A., Baldusco, R., & Cincotto, M. A. (2015). *Rehydration of Cement Fines: A TG /Calorimetry Study*.
- Bandeira, J. B. M. P. (2020). *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado*.
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). *Cement and carbon emissions*. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>
- Biedermann, A. R., Pettke, T., Angel, R. J., & Hirt, A. M. (2016). Anisotropy of magnetic susceptibility in alkali feldspar and plagioclase. *Geophysical Journal International*, 205(1), 479–489. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw042>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas, J. A., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104405. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104405>
- Bogas J, Pereira M, Guedes M, Carriço A, Hu S, & Sousa R. (2021). *Separation process of waste hardened concrete for obtaining recycled cement from waste concrete. International patent application WO 2021/173022*.
- Brno. (2009). *the-use-of-magnetic-susceptibility-of-rocks-in-geological-exploration-v1-1*.
- Butler, L., West, J., & Tighe, S. (2012). Effect of recycled concrete aggregate properties on mixture proportions of structural concrete. *Transportation Research Record*, 2290, 105–114. <https://doi.org/10.3141/2290-14>
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hu, S., Real, S., & Costa Pereira, M. F. (2021). Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127375. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127375>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- Carriço, A., Real, S., & Bogas, J. A. (2021). Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Costa Pereira, M. F. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, 256, 119502. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119502>
- Carvalho, B. G. G. P. de. (2021). *Caracterização mecânica de betões produzidos com cimento reciclado*.

- Carvalho, M. A. (2020). *Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação.*
- Deloitte. (2017). *Resource Efficient Use of Mixed Wastes Improving management of construction and demolition waste Final report.*
- European Aggregates Association. (2020). *Annual Review European Aggregates Association - A Sustainable industry for a sustainable Europe.*
- Gomes, R., Bastos, D., Brazão Farinha, C., Veiga, R., de Brito, J., Faria, P., Santos Silva, A., & Bogas, A. (2021). *Carbonation Potential of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Lab-Sustainable Construction Materials Association, Linda-a-Velha, Portugal 2 c 5 Lab-Sustainable Construction Materials Association, Linda-a-Velha, Portugal 3 c 5 Lab-Sustainable Construction Materials Association, Linda-a.*
- Gopalakrishnan, R., Barathan, S., & Govindarajan, D. (2012). Magnetic Susceptibility Measurements on Fly Ash Admixed Cement Hydrated with Groundwater and Seawater. *American Journal of Materials Science*, 2(1), 32–36. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20120201.06>
- Hu, S. (2019). *Dissertação - Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados.*
- Kendall, J. T., & Yeo, D. (1948). Magnetic Susceptibility of Mica. *Nature* 1948 161:4091, 161(4091), 476–477. <https://doi.org/10.1038/161476b0>
- Krus, M., Hansen, K. K., & Kiinzel, H. M. (1996). Porosity and liquid absorption of cement paste. In *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* (Vol. 30).
- Leal, D. F. F. (2021). *Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado.*
- Lotfi, S., & Rem, P. (2016). Recycling of End of Life Concrete Fines into Hardened Cement and Clean Sand. *Journal of Environmental Protection*, 07(06), 934–950. <https://doi.org/10.4236/jep.2016.76083>
- Margarida, A., de Oliveira Braga, G., Manuel, J., Lopes De Brito, C., Dinis, J., Júri, S., João, D., Ramôa, P., Correia, R., Guilherme, M., Altas, C., & Pinheiro, D. (2015). *Impacte ambiental comparado do ciclo de vida de betão com agregados grossos reciclados e naturais Engenharia Civil.*
- Martins, I., Salvado, F., & Falcão, M. J. (2022). *Economia circular e sustentabilidade na construção.*
- Neves, E., Soares, C., Cristina, D., Garcia, S., Yoshida, M. I., Teresa, M., Aguilar, P., & Figueiredo, R. B. (2017). *Avaliação da Pozolanidade das Cinzas do Capim Elefante Cameroon por Ensaios de Termogravimetria Evaluation of Pozolanic Activity of Cameroon Elephant Grass Ashes Using Termogravimetric Tests.* 26(2), 41–48.
- Real, S., Bogas, J. A., Carriço, A., & Hu, S. (2021). Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/ma13183937>
- Rosenblum, S., & Brownfield, I. K. (2000). *Magnetic Susceptibilities of Minerals.*
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials.*
- Serpell, R., & Lopez, M. (2013). Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cement and Concrete Composites*, 39, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>

- 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* (Vol. 112, pp. 466–472). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 531–537. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.10.016>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Svoboda, J. (2004). Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2107-0>
- Tamàs, F., & L. Balázs, G. (1996). Properties of concrete (fourth edition): A.M. Neville. Longman Scientific & Technical Ltd. 1995. ISBN 0-582-23070-5. *Cement and Concrete Research*, 26(8), 1290. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)82366-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)82366-0)
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 171). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- Winfried, M., & Kai-Uwe, N. (2008). *Recovery and use of hydraulic binders from demolition waste concrete comprises grinding waste, optionally enriching binder phase by sieving of sifting and heating product* .
- Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Li, J., & Hu, Y. (2018). Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>

Documentos normativos

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

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

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 1015-18 (2002) – Métodos de ensaio de argamassas – Parte 18: Determinação do coeficiente de absorção da água devido à absorção capilar das argamassas.

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

NP EN 1926 (2008) – Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades aberta e total.

Páginas Web

[1] <https://ellenmacarthurfoundation.org/about-us/ellens-story>

[2] <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative>

[3] <https://www.iea.org/>

[4] <https://unric.org/pt/objetivo-12-producao-e-consumo-sustentaveis/>

[5] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt

Anexos

(página intencionalmente deixada em branco)

Anexo I

Composição	a/l	3 dias							28 dias						
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fcm (MPa)	CV (%)
CPN	0,65	584,6	1,833	3,5	16,9	22,51	14,5	5,3	589,1	2,969	7,4	9,3	52,47	35,18	6,6
						23,35							62,07		
		575,7	1,227			23,86			580,5	2,908			54,19		
						25,11			59,98						
		575,7	1,424			21,09			581,6	3,555			55,4		
						23,65							62,02		
P35	0,65	547,4	0,696	1,6	6	7,67	5,8	2,7	576	1,608	4,3	9,6	20,57	15,5	5,5
						7,67							19,87		
		546,35	0,749			7,55			581,3	2,036			22,6		
						7,6							22,97		
		546,55	0,646			8,04			575,8	1,846			20,37		
						8,06							21,80		
B55SL	0,65	546,2	0,849	2,1	6	9,43	6,03	4,3	552,9	1,745	4,2	11	24,03	15,06	3,3
						9,7							23,78		
		546,2	0,954			9,5			554,8	1,561			25,03		
						10,44							24,23		
		545,5	0,957			10,51			550,9	2,039			24,89		
						9,76							26,24		
B55CL	0,65	550,6	0,82	2,3	12,1	11,71	6,98	5	550	1,693	4	1,6	26,79	16,06	3
						10,82							27,1		
		544,3	1,084			10,53			552,5	1,76			25,06		
						11,65							26,42		
		547,8	1,06			11,75			551,1	1,722			-		
						12,19							-		

Composição	a/l	3 dias							28 dias						
		Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fcm (MPa)	CV (%)	Massa (g)	Fi (kN)	fctm (MPa)	CV (%)	Fi (kN)	fcm (MPa)	CV (%)
B35	0,65	565,9	0,576	1,4	6,6	6,86	4,43	4,3	579,3	1,890	3,9	9,2	18,61	13,66	11
						6,99							19,98		
		558,6	0,599			7,26			566,7	1,649			25,37		
						7,39							23,77		
		562,9	0,671			7,27			566	1,514			21,93		
						7,83							24,75		
G55	0,65	534,6	0,39	0,9	1,7	4,71	2,83	2,8	534,8	1,409	3,3	6,3	17,02	10,45	4,1
						4,79							16,13		
		538,9	0,404			4,54			526,6	1,489			16,43		
						4,43							17,36		
		539,2	0,39			4,7			534,3	1,276			17,79		
													18,12		