

Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados

Susana Hu

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador(es):

Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Professor Doutor Manuel Francisco Costa Pereira

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Cristina De Oliveira Matos Silva

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Outubro 2019

(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)

“Anything that can go wrong, will go wrong”

- *Lei de Murphy*

(página intencionalmente deixada em branco)

Agradecimentos

A presente dissertação veio marcar o final do meu percurso académico e a sua elaboração apenas foi possível com o apoio de todos aqueles que me acompanharam ao longo deste processo. Deste modo gostaria de expor aqui os agradecimentos às pessoas que intervíram de forma direta ou indireta.

Primeiramente gostaria de expressar uma profunda gratidão ao Professor José Alexandre Bogas pelo apoio prestado, pelo tempo despendido, por me ter acompanhado nos trabalhos mais morosos, pelas suas ideias luminosas (de modo consequente, trabalho adicional), pela simpatia e boa disposição e, como não poderia esquecer, pelas idas ao Porto e pelas francesinhas. Agradeço igualmente ao Professor Manuel Franciso Costa Pereira (Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST e GEOLAB/IST) pela disponibilidade, pelo apoio e auxílio prestado durante a realização desta dissertação.

À Professora Ana Mafalda Saldanha Guedes pelo apoio facultado e pela disponibilidade.

Aos colegas de doutoramento: Ana Carriço, por me ter acompanhado sempre nos trabalhos mais fatigantes e exaustivos, pelas palavras carinhosas e por toda a disponibilidade; à Sofia Real, por garantir que nunca me faltasse nada durante o trabalho laboratorial e pelas soluções que tem sempre na manga, prontas para salvar o dia; ao Jorge Pontes, pelo apoio conferido e pela disponibilidade.

Aos meus colegas de laboratório, José Bandeira e Miguel Carvalho pela ajuda, disponibilidade demonstrada e favores de última hora prestados.

Ao Sr. Pedro Costa e Sr. Francisco Almeida, técnicos do Laboratório de Construção, pelo apoio facultado ao longo do trabalho experimental. Ao Sr. Rui Garcia, técnico do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes, pelo apoio e equipamentos cedidos.

Ao Engenheiro Mário Rui Machado Leite, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia do Porto, por ter disponibilizado o laboratório para os ensaios experimentais.

Ao colega de doutoramento, Rui Sousa, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia do Porto, pelo tempo dispendido e apoio prestado.

Aos meus pais e ao meu irmão, por me terem aberto esta porta e pelo apoio dado.

Aos amigos que fiz durante a jornada académica, por terem tornado este percurso num acidente feliz.

Ao meu namorado, por nunca me ter deixado desistir, por me ter apoiado sempre e pelas palmadinhas nas costas nos dias mais escuros.

À Rita e à Ding, que embora não compreendam o tema do meu trabalho, apoiaram e acreditaram em mim incondicionalmente.

Finalmente, gostaria da mesma forma agradecer a mim mesma por nunca ter desistido perante todas as dificuldades enfrentadas. Obrigada Susana do passado, fizeste um bom trabalho, apesar de tudo.

(página intencionalmente deixada em branco)

Resumo

O facto de o betão ser um material versátil e barato, tem conduzido a enormes consumos no sector da construção e conseqüente esgotamento de recursos naturais e problemas ambientais muito significativos (emissão de CO₂ e produção de resíduos). Desta forma, a necessidade de mitigar os problemas intrínsecos à produção deste material é crucial.

O presente trabalho experimental pretende contribuir para a resolução da situação problemática atual, com recurso a vários métodos de separação dos vários componentes do betão, visando à individualização da parcela cimentícia e, posteriormente, à reativação da mesma para obter cimento reciclado. No decorrer do trabalho recorreram-se a blocos de betão fabricados em laboratório, a fim de simular os resíduos de betão corrente. Os blocos foram submetidos a diversos métodos de fragmentação/libertação com auxílio de britadeiras de maxila e moinho de rolo. Na separação dos constituintes do betão implementaram-se diversos métodos (mesa *Wilfley* e mesa *Mozley*) correntemente empregues na indústria mineira e um método inovador (rolo magnético).

A efetividade dos métodos propostos foi comprovada através do uso de técnicas de TG, DRX, ataque ácido e análise microscópica. Nas frações mais favoráveis, os rendimentos do cimento recuperado atingiram os 16,5% na fração 250-500 µm, pelo método rolo magnético, com uma pureza de 79%, e 24,6% na fração 125-250 µm pelo método mesa *Wilfley*, com uma pureza de 88%. Para além disso, efetuou-se a reativação, produção e caracterização de pastas produzidas com esse cimento reciclado, tendo-se obtido resistências à compressão superiores a 13 MPa.

Palavras Chave:

cimento reciclado; reciclagem de betão; métodos de libertação; métodos de separação da matriz cimentícia; método magnético; resistência mecânica.

(página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

Having concrete as a versatile and inexpensive material, its consumption in the construction sector has led to a depletion of natural resources and to irreversible environmental damages (emission of CO₂ and waste generation). Thus, the need to mitigate the intrinsic problems in the production of this material is crucial.

In this context, the present experimental work falls within the scope of contributing to the present cause through the study of separation methods of the various concrete components, aiming to the individualization of the cementitious portion and, subsequently, its reactivation to obtain recycled cement. Throughout the course of this work, laboratory-made concrete blocks were used to simulate concrete waste. The blocks were subjected to various liberation methods using jaw crushers and roller mills. In the separation of concrete constituents, several methods (Wilfley table and Mozley table) currently employed in the mining industry and an innovative method (magnetic roller) were implemented.

The effectiveness of the proposed methods has been proven by using TG, XRD, acid attack and microscopic analysis techniques. In the most favorable fractions, the yields of recovered cement reached 16.5% in the 250-500 μm fraction by the magnetic roller method, with a purity of 79%, and 24.6% in the 125-250 μm fraction by the Wilfley table method, with a purity of 88%. In addition, the reactivation, production and characterization of the recycled cement pastes showed favorable results, with compressive strengths exceeding 13 MPa.

Keywords:

recycled cement; concrete recycling; separation methods for cementitious matrix; magnetic method; mechanical strength.

(página intencionalmente deixada em branco)

Índice

Agradecimentos.....	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xxi
Introdução.....	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia e organização da dissertação.....	2
Estado de Arte	3
2.1 Enquadramento	3
2.2 Estratégias para a redução do impacte do betão.....	5
2.3 Processamento dos resíduos de construção e demolição.....	6
2.4 Separação dos constituintes do betão	7
2.4.1 Separação mecânica.....	9
2.4.2 Separação térmica.....	13
2.4.3 Separação termomecânica.....	15
2.4.4 Separação química.....	15
2.4.5 Separação elétrica.....	16
2.4.6 Considerações finais	16
Campanha Experimental	17
3.1 Introdução.....	17
3.2 Produção do betão de origem	18
3.2.1 Agregados	18
3.2.2 Cimento	19
3.2.3 Composição, produção e cura do betão de origem	20
3.3 Metodologias de ensaio.....	22
3.3.1 Análise termogravimétrica	22
3.3.2 Difração de raios X	23
3.3.3 Ataque ácido.....	24
3.3.4 Análise visual em câmara digital	24
3.3.5 Caracterização das pastas no estado endurecido	25
3.3.6 Outras técnicas.....	26
3.4 Métodos de Libertação	27
3.4.1 Processo mecânico	28
3.4.2 Processo térmico.....	36

Métodos de Separação	41
4.1 Rolo magnético permanente	42
4.1.1 Descrição do procedimento	42
4.1.2 Fundamentação do procedimento.....	43
4.1.3 Demonstração de resultados.....	46
4.2 Mesa Wilfley	57
4.2.1 Descrição do procedimento.....	57
4.2.2 Fundamentação do procedimento.....	58
4.2.3 Demonstração de resultados.....	59
4.3 Mesa Mozley.....	63
4.3.1 Descrição do procedimento.....	63
4.3.2 Fundamentação do procedimento.....	64
4.3.3 Demonstração de resultados.....	65
4.4 Comparação de resultados entre técnicas.....	68
4.5 Reativação e produção de provetes com cimento reciclado.....	72
4.6 Caracterização mecânica das pastas com cimento reciclado	74
Conclusão.....	77
5.1 Considerações finais	77
5.2 Propostas de desenvolvimento futuro	79
Referências Bibliográficas	81
Anexo.I.Ensaio de AMT e ataque ácido	C
Anexo.II.Difração de raios X (DRX).....	E
Anexo.III.Ensaio de resistência à compressão	G

Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema ilustrativo de uma britadeira de maxila (Gupta e Yan, 2016)	10
Figura 2.2. Esquema ilustrativo de uma britadeira de impacto (Zenith, 2019)	10
Figura 2.3. Esquema ilustrativo da britadeira de maxila patenteado por Schenk (Schenk, 2011)	11
Figura 2.4. Esquema ilustrativo de moinhos de tambor (Gupta e Yan, 2016)	12
Figura 2.5. Esquema ilustrativo de um moinho de rolos (Gupta e Yan, 2016)	12
Figura 3.1. Amostras de Bago de Arroz, Brita 1, Brita 2, Areia Fina e Areia Grossa, da esquerda para a direita, respetivamente.	18
Figura 3.2. Exemplo de blocos de betão utilizados no estudo e corte transversal de um bloco	21
Figura 3.3. Mufla, cadinhos cerâmicos e balança utilizados no ensaio de AMT	23
Figura 3.4. Equipamento de DRX utilizado no presente estudo	23
Figura 3.5. Ensaio de ataque ácido.....	24
Figura 3.6. Início (esquerda) e fim (direita) do ensaio de ataque ácido.....	24
Figura 3.7. Análise microscópica com recurso a uma câmara digital	25
Figura 3.8. Exemplo de imagem observada pela câmara digital	25
Figura 3.9. Ensaio de resistência à flexão (esquerda) e ensaio de resistência à compressão (direita).....	26
Figura 3.10. Crivagem seca	27
Figura 3.11. Crivagem húmida	27
Figura 3.12. Divisor de amostras	27
Figura 3.13. Britadeira de maxila do LC.....	28
Figura 3.14. Britadeira de maxila do GEOLAB	28
Figura 3.15. Moinho de rolos do GEOLAB.....	28
Figura 3.16. Equipamento de Los Angeles do LC	28
Figura 3.17. Crivagem no peneiro de 1 mm.....	28
Figura 3.18. Betão britado proveniente da britadeira de maxila do LC.....	29
Figura 3.19. Curvas granulométricas das principais combinações da 1ª fase	29
Figura 3.20. Curvas granulométricas de todas as combinações da 1ª fase	30
Figura 3.21. Tipos de partículas resultantes dos métodos de libertação: a) >90% cimento; b) 60-90% cimento; c) 40-60% cimento; d) 10-40% cimento; e) <10% cimento; f) agregado revestido com cimento (< 20% de cimento).	33
Figura 3.22. Rendimentos da porção fina e grossa face à totalidade do material.....	34
Figura 3.23. Forno rotativo do LC	36
Figura 3.24. Curvas granulométricas dos métodos de libertação térmica.....	37
Figura 3.25. Amostras do material proveniente do tratamento térmico a 300, 400 e 500 °C, da esquerda para a direita, respetivamente.....	39
Figura 3.26. Material proveniente do tratamento a 400 °C: frações entre 2-4, 4-6,3 e 6,3-8 mm com superfície limpa, respetivamente.....	39
Figura 4.1. Equipamento de rolo magnético utilizado no presente trabalho do LNEG (Porto)	42

Figura 4.2. Trajetória de partículas magnéticas e não magnéticas separadas pelo divisor	42
Figura 4.3. Fluxograma do processo de libertação e separação (M1-método magnético; M2- método gravítico)	43
Figura 4.4. Imagem ilustrativa do equipamento de separação magnética utilizada no estudo	45
Figura 4.5. Influência da carbonatação no ensaio de TG (Scrivener et al., 2016)	48
Figura 4.6. Análise termogravimétrica (TG e DTG) do CR/REF e do CR/Bet – fração 250-500 μm	49
Figura 4.7. Percentagem de material existente nos produtos, após a separação magnética (Agregados de natureza calcária e siliciosa e matriz cimentícia)	50
Figura 4.8. Rendimentos do método de separação do rolo magnético (cima) e as respetivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (NMAG-não magnético; MAG1-magnético 1ªpassagem; MAG2-magnético 2ªpassagem; MAG3-magnético 3ªpassagem)	51
Figura 4.9. Distribuição de rendimentos (em massa) dos processos de libertação e separação do método do rolo magnético	52
Figura 4.10. Resultados de DRX de: CR/REF (100% pasta hidratada); CR/Bet (produto magnético) da fração de 250-500 μm ; c) material não magnético complementar do CR/Bet magnético (Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite; \diamond - etringite; \square - silicatos cálcicos hidratados).	53
Figura 4.11. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes do rolo magnético	54
Figura 4.12. Separação magnética do material resultante do processo de libertação térmico a 400 $^{\circ}\text{C}$, na fração de 250-500 μm : material magnético (esquerda) e material não magnético (direita)	56
Figura 4.13. RC&D simulado (à esquerda), detrito de betão (no meio) e material cerâmico (à direita) resultante da separação magnética (fração menos eficiente de 6,3-12 mm, após uma passagem) ...	56
Figura 4.14. Mesa Wilfley utilizada no presente trabalho do LNEG (Porto)	57
Figura 4.15. Produtos obtidos através da separação pelo método Wilfley	58
Figura 4.16. Detalhe da separação na mesa Wilfley	58
Figura 4.17. Esquema ilustrativo da estratificação entre régua (adaptado de Wills e Munn, 2006) ...	59
Figura 4.18. Esquema ilustrativo da mesa Wilfley em planta (adaptado de Wills e Munn, 2006)	59
Figura 4.19. Rendimento do método de separação pela mesa Wilfley (cima) e as respetivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (Agregado; AC (maioritariamente agregado); CA (maioritariamente cimento); Cimento)	61
Figura 4.20. Distribuição de rendimentos dos processos de libertação e separação do método da mesa Wilfley	62
Figura 4.21. Resultados de DRX do cimento obtido através do método de Mesa Wilfley da fração 125-250 μm : Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite.	62
Figura 4.22. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes da mesa Wilfley	63
Figura 4.23. Mesa Mozley recorrido no presente trabalho do LNEG (Porto)	64
Figura 4.24. Distribuição das partículas durante o funcionamento da mesa Mozley	64
Figura 4.25. Análise termogravimétrica (TG e DTG) da pasta de referência (CR/REF) e do cimento proveniente da mesa Mozley (MM) – fração 125-250 μm	66

Figura 4.26. Rendimento do método de separação pela mesa Mozley (cima) e as respectivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (Agregados de natureza calcária e siliciosa e matriz cimentícia)	67
Figura 4.27. Resultados de DRX do cimento obtido através do método de mesa Mozley da fração 125-250 µm: Δ-portlandite; ●- quartzo; ○- calcite;.....	67
Figura 4.28. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes da mesa Mozley	68
Figura 4.29. Percentagem de cimento dos produtos resultantes da separação.....	70
Figura 4.30. Resultados de DRX dos métodos de RM, MW e MM nas frações menos contaminadas (Δ-portlandite; ●- quartzo; ○- calcite; ◇- etringite; □- silicatos cálcicos hidratados)	71
Figura 4.31. Moinho de bolas de Denver do GEOLAB/IST.....	72
Figura 4.32. Almofariz mecânico do LAMPISIT	72
Figura 4.33. Forno horizontal do LC em funcionamento (com termopares)	72
Figura 4.34. Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade de: CR/REF; CR/Bet; MW; MM; 75/25REF.....	74
Figura 4.35. Comparação da resistência relativa com a percentagem de cimento existente no cimento reciclado dos provetes de CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF	75
Figura 4.36. Diferença visual dos provetes produzidos: CR/REF (cima) e CR/Bet (baixo)	76
Figura A.II.1. Resultado de DRX das amostras de mistura inicial e magnética do método de RM (Δ-portlandite; ●- quartzo; ○- calcite; ◇- etringite; □- silicatos cálcicos hidratados)	E
Figura A.II.2. Resultado de DRX das amostras de referência: Δ-portlandite; ●- quartzo; ○- calcite; ◇- etringite	F

(página intencionalmente deixada em branco)

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Massa volúmica e resistência à compressão dos agregados mais utilizados em Portugal (adaptado de Castelo Branco e Ferreira, 2009; Coutinho, 1999)	8
Tabela 2.2. Coeficiente de expansão térmica linear dos agregados mais utilizados em Portugal (adaptado de Sims e Brown, 1998)	8
Tabela 3.1. Ensaios de caracterização física dos agregados	19
Tabela 3.2. Propriedades geométricas dos agregados	19
Tabela 3.3. Características do cimento Portland	20
Tabela 3.4. Composição da mistura do BO e PO por m ³	20
Tabela 3.5. Resultados dos ensaios de abaixamento, massa volúmica fresca e resistência à compressão do betão e pasta de origem	21
Tabela 3.6. Análise granulométrica das principais combinações da 1 ^a fase	31
Tabela 3.7. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação mecânica da 1 ^a fase. ...	32
Tabela 3.8. Rendimento de finos resultantes das combinações da 2 ^a fase	34
Tabela 3.9. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação mecânica da 2 ^a fase. ...	35
Tabela 3.10. Análise granulométrica dos vários métodos de libertação térmica	37
Tabela 3.11. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação térmica	38
Tabela 4.1. Análise visual do material resultante do método do rolo magnético - material magnético composto por matriz cimentícia e material não magnético composto por agregados de natureza siliciosa e calcária	47
Tabela 4.2. Parcela magnética das frações 125-150 µm, 150-212 µm e 212-250 µm	50
Tabela 4.3. Análise visual do material resultante do método da mesa Wilfley - material composto por matriz cimentícia e material composto por agregados de natureza siliciosa e calcária	60
Tabela 4.4. Análise visual do material resultante do método da mesa Mozley - material composto por matriz cimentícia e material composto por agregados de natureza siliciosa e calcária	65
Tabela 4.5. Análise visual das frações granulométricas dos vários métodos de separação - mistura composta essencialmente por matriz cimentícia	69
Tabela 4.6. Descrição dos diversos provetes produzidos a partir de cimento reciclado	74
Tabela 4.7. Resistência à flexão e compressão dos provetes produzidos com o cimento reciclado ...	75
Tabela A.I.1. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras de referência (pasta hidratada e areia <250 mm)	C
Tabela A.I.2. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras provenientes do método de rolo magnético (com os respetivos parâmetros adotados durante a separação, velocidade do sistema de doseamento (v) e abertura do divisor (a)): mistura inicial, parcela magnética (Mag) e não magnética (NãoMag)	C
Tabela A.I.3. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras resultantes do método da mesa Wilfley: Cimento; Mistura com mais de 50% de cimento (CA); Mistura com mais de 50% de agregado (AC); Agregado (de natureza siliciosa e calcária)	D

Tabela A.I.4. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras resultantes do método da mesa Mozley: cimento	D
Tabela A.III.1. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 3 dias	G
Tabela A.III.2. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 7 dias	G
Tabela A.III.3. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 28 dias	H

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

AC	Mistura maioritariamente agregado
AMT	Análise por variação da massa em função da temperatura
BO	Betão de origem
BMC	Britadeira de maxilas do Laboratório de Construção do IST
BMM	Britadeira de maxilas do GEOLAB/IST
C	Crivagem no peneiro de 1 mm
CCS	Técnica de captura e armazenamento de CO ₂
CA	Mistura maioritariamente cimento
CP	Cimento Portland
CR/Bet	Cimento reciclado resultante de detritos de betão pelo método magnético
CR/REF	Cimento reciclado proveniente de pastas puras de cimento
DRX	Difração de raios X
DTG	Termografia diferencial
F300	Tratamento térmico a 300 °C
F400	Tratamento térmico a 400 °C
F500	Tratamento térmico a 500 °C
ITZ	Zona de transição entre a argamassa e o agregado
GEOLAB/IST	Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST
LA	Equipamento Los Angeles
LAMPIST	Laboratório de Mineralogia e Patologia
LC	Laboratório de Construção
LNEG	Laboratório Nacional de energia e Geologia
MAC	Moagem autogénea/autógena no equipamento de Los Angeles
MAG	Material magnético
MBC	Moagem com bolas de aço no equipamento de Los Angeles
MM	Método de mesa Mozley
MW	Método de mesa Wilfley
NMAG	Material não magnético
PO	Pasta de origem
R	Passagem no moinho de rolos do GEOLAB/IST
R _L	Passagem no moinho de rolos do GEOLAB/IST com uma velocidade de alimentação inferior que R
RC&D	Resíduos de Construção e Demolição
RM	Método de rolo magnético
TG	Análise termogravimétrica
UE	União Europeia
75/25 REF	Material simulado com 75% pasta hidratada e 25% areia (<250 µm)

Compostos Químicos

CO ₂	Dióxido de carbono
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado
HCl	Ácido clorídrico
Cu	Cobre

Simbologia

a/c	Relação água/cimento em massa
a/l	Relação água/ligante em massa
D _{máx}	Diâmetro máximo do agregado
d _{mín}	Diâmetro mínimo do agregado
MF	Módulo de finura
f _{cm}	Valor médio da resistência à compressão
f _{cm,28d}	Valor médio da resistência à compressão aos 28 dias
f _{ctm}	Valor médio da resistência à flexão
CV	Coefficiente de variação

Unidades

m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
h	Hora
s	Segundo
min	Minuto
ton	Tonelada
kg	Kilograma
g	Grama
MPa	Megapascal
N	Newton
°C	Grau Celcius
°	Grau
L	Litro
T	Tesla
V	Volt
A	Ampere

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Atualmente a indústria da construção é uma das principais fontes de preocupação ambiental, visto que envolve elevado consumo de recursos naturais não renováveis, custos energéticos relevantes, a criação e a gestão de grandes volumes de resíduos de construção e demolição e a emissão significativa de gases de estufa nocivos para o ambiente (Stafford et al., 2016; Letelier et al., 2017). Neste particular, o betão tem uma elevada repercussão associada, dado que é o produto de construção mais utilizado à escala mundial, devido à sua versatilidade, baixo custo e propriedades mecânicas interessantes. O seu elevado impacto é essencialmente atribuído à produção do cimento que representa cerca de 80-90% da totalidade de emissões envolvidas no fabrico do betão (Yang et al., 2014) e cerca de 5% das emissões de CO₂ geradas pelo Homem (WBCSD, 2009).

Motivadas pela procura de soluções que visem a mitigação dos problemas associados ao impacto ambiental do betão, e em particular do cimento, várias investigações têm sido desenvolvidas no sentido de encontrar alternativas que permitam a produção de cimentos mais ecoeficientes. Algumas estratégias, como o desenvolvimento de técnicas de captura e armazenamento de CO₂, o uso de adições minerais ou a utilização de combustíveis alternativos, são de difícil implementação ou de impacto limitado na redução do nível de emissões.

Muito recentemente têm sido desenvolvidos trabalhos de investigação que visam a reativação inovadora de cimento a partir de pasta cimentícia de cimento hidratado (Shui et al., 2009; Wang et al., 2018; He et al., 2019; Bogas et al., 2019). Esta via permite uma redução marcante do nível de emissões de gases de estufa, na medida em que se evita a importante fase de descarbonatação durante o fabrico do cimento. No departamento de engenharia civil do Instituto Superior Técnico foi recentemente iniciada uma linha de investigação neste domínio que visa exatamente este objetivo.

No entanto, para que este produto se torne atrativo, é necessário inicialmente ultrapassar uma barreira técnica importante, associada ao tratamento dos resíduos de construção e demolição e à conseqüente separação dos constituintes do betão, viabilizando a reutilização e reciclagem da matriz cimentícia. Este é um dos principais problemas realçados na literatura para que este produto tenha viabilização industrial (Bogas et al., 2019, Wang et al., 2018).

Atualmente ainda não existe nenhum método eficiente capaz de promover a separação dos vários constituintes do betão, sobretudo tendo em consideração a purificação da matriz cimentícia. Alguns métodos de separação existentes, que foram desenvolvidos a partir de processos utilizados na indústria mineira, estão essencialmente vocacionados para a recuperação de agregado reciclado, não se preocupando com a recuperação da fração cimentícia. Desse modo, urge desenvolver processos de separação que se foquem neste âmbito, conforme é o objetivo do presente trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do presente estudo consiste na idealização e avaliação de processos de separação baseados em técnicas utilizadas na indústria mineira, com vista à reciclagem de resíduos de construção e demolição, mais especificamente de detritos de betão, visando sobretudo individualizar a componente cimentícia, destinada à produção de cimentos reciclados.

Para tal, o trabalho é assente numa forte componente experimental que envolve a aplicação de metodologias de libertação e separação assentes em processos mecânicos, térmicos, físicos e magnéticos, de modo a atingir níveis de rendimento elevados de pasta cimentícia individualizada. Para além da efetividade dos métodos na separação dos constituintes, é ainda aferida a potencialidade do cimento reciclado produzido a partir das técnicas implementadas de individualização da matriz cimentícia e a sua conseqüente reativação térmica e aplicação em materiais de base cimentícia.

O presente trabalho experimental pretende dar seguimento a uma linha de investigação que se tem vindo a desenvolver no IST na área da reciclagem de resíduos de betão a fim de obter/reaproveitar materiais cimentícios. O respetivo estudo está integrado no projeto de investigação PTDC/EI-CON/28308/2017, financiado pela FCT e que se encontra atualmente em desenvolvimento.

1.3 Metodologia e organização da dissertação

Perante os objetivos definidos, a dissertação foi estruturada em 5 capítulos. Esta inicia-se com uma breve introdução e apresentação dos objetivos pretendidos com o presente trabalho. Em seguida, no segundo capítulo apresenta-se inicialmente um breve enquadramento relativo à importância da reutilização e reciclagem do betão, bem como as estratégias que têm sido desenvolvidas com esse objetivo. Posteriormente, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica referente ao estado atual de conhecimentos e de resultados obtidos em trabalhos de investigação no âmbito de separação dos constituintes do betão, em especial dos agregados reciclados. Tendo em conta o caráter inovador do presente tema, no Capítulo 3 são apresentadas as metodologias de ensaio adotadas no decorrer da campanha experimental, sendo ainda descritos os procedimentos e apresentados os principais resultados referentes aos métodos de libertação adotados no trabalho. Dada a importância conferida aos métodos de separação, no Capítulo 4 são abordadas, de forma separada, as metodologias adotadas e os principais resultados obtidos neste domínio. No mesmo capítulo são igualmente apresentadas a produção e caracterização mecânica das pastas produzidas com o material obtido pelos métodos de separação. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões alcançadas com o trabalho experimental e sugeridas algumas propostas de desenvolvimentos futuros. Para mais, estão apresentadas em duas seções diferenciadas as referências bibliográficas consultadas e os anexos mencionados na extensão do trabalho.

2 Estado de Arte

De acordo com os objetivos definidos para o presente trabalho, no presente capítulo abordam-se algumas das principais técnicas de separação atualmente consideradas no domínio do betão. Inicialmente, faz-se um enquadramento da importância do betão na indústria da construção e dos problemas atuais relacionados com o seu elevado impacto ambiental. Em seguida são abordadas, de forma resumida, algumas estratégias que se têm desenvolvido com o objetivo de tornar o betão mais sustentável, salientando-se a importância dos métodos de separação na reutilização e reciclagem deste material. Finalmente, são abordadas as principais técnicas de separação desenvolvidas neste domínio.

2.1 Enquadramento

O betão consiste num aglomerado artificial de agregados grossos e finos, água e ligante, podendo ter ou não, incorporação de aditivos e adições. Existem diversos tipos de betão, tais como betão betuminoso, betão de resinas e ainda betão de cimento Portland (CP). O betão corrente, que se utiliza geralmente nas construções, é o betão de cimento Portland. Este é normalmente caracterizado como um material de baixo custo, fácil de moldar, com boa durabilidade, resistente à compressão e à ação do fogo. A sua elevada versatilidade faz com que atualmente seja o material de construção mais utilizado no mundo (Scrivener e Kirkpatrick, 2008(a); Imbabi et al., 2012). Em 2009, foi estimado que a nível mundial é consumido aproximadamente 25 mil milhões de toneladas de betão anualmente (IEA e WBCSD, 2009).

No entanto, o betão apresenta um elevado impacto ambiental, visto que envolve a extração e esgotamento de recursos naturais não renováveis, a gestão de grandes volumes de resíduos de construção e demolição e a emissão significativa de gases de estufa.

No ano de 2012, a produção de betão envolveu o consumo de cerca de 3,8 mil milhões de toneladas de cimento, mais de 17,5 mil milhões de toneladas de agregados e 2 mil milhões de toneladas de água (Miller et al., 2018). Em 2017, estimou-se que a massa total de cimento produzido atingiu os 4,65 mil milhões de toneladas (Cembureau, 2017), o que equivale a 617 kg/per capita. Os países em vias de desenvolvimento são os que apresentam maior produção do cimento, nomeadamente a China e a Índia, representando respetivamente 52 e 6,2% da produção mundial. Além das elevadas quantidades de cimento necessárias, o gasto de água doce também não pode ser ignorado. Miller et al. (2018) afirmam que a água utilizada na produção de betão é responsável por 9% da água globalmente captada para fins industriais, sendo que esta representa 1,7% da água total captada à escala mundial. Por sua vez, por cada tonelada de cimento, a indústria da construção consome cerca de 6 a 7 vezes mais areia e brita para satisfazer as necessidades (Peduzzi, 2014). Desse modo, a produção de betão tem um impacto bastante relevante no consumo de recursos naturais não renováveis.

Salienta-se é expectável o aumento da produção de betão de uma forma acentuada nas próximas décadas, prevendo-se que em 2020 haja um aumento de 115-180% e em 2050 de cerca de 400%, relativamente a 1990 (Damtoft et al., 2008).

Com o rápido desenvolvimento das principais metrópoles do mundo, os resíduos criados pela indústria da construção, designados de resíduos de construção e demolição (RC&D), de onde se integra o betão, tem vindo a aumentar de forma preocupante. Estes têm-se tornado num problema público, instigando a degradação do meio ambiente. Estes resíduos constituem uma grande percentagem dos resíduos produzidos mundialmente, compondo quase 25-30% de todo o resíduo produzido na União Europeia (UE) (Pellegrino e Faleschini., 2016). Em 2016, o total de resíduos produzidos na UE, pela globalidade das atividades económicas e agregados familiares, excedeu os 2 533 milhões de toneladas. O setor da construção contribuiu para 36,4% (aproximadamente 922 milhões de toneladas) do total em 2016, seguido do setor das indústrias extrativas (25,0%) e indústrias transformadoras (10,3%) (Eurostat, 2018). Uma grande fração dos resíduos acaba por ser depositada em aterro, escasseando soluções para a sua reciclagem e reutilização. Akhtar e Sarmah (2018) estimaram que no ano de 2012 a produção de RC&D atingiu os 3 mil milhões de toneladas abrangendo 40 países dos 5 continentes: Nova Zelândia, Austrália, Estados Unidos da América, Canadá, Brasil, Áustria, Dinamarca, Reino Unido, Índia, China, Japão, África do Sul, entre outros.

Por outro lado, os impactes deste material não se restringem somente ao nível térreo (necessidades de grandes áreas destinadas ao aterro), afetando igualmente o nível aéreo, através da emissão de gases prejudiciais para a atmosfera durante a produção destes materiais, quer no fabrico do cimento como na extração dos minérios e captação de água.

A indústria cimenteira, nos dias de hoje, representa aproximadamente 5% das emissões de CO₂ geradas pelo Homem (Scrivener e Kirkpatrick, 2008(b); IEA e WBCSD, 2009), produzindo mais de 2 mil milhões de toneladas anualmente. A produção de CP utilizado no betão representa uma emissão em média de 842kg de CO₂/ton de clínquer (WBCSD, 2016), do qual o gasto energético pelo consumo de combustível fóssil representa menos de 40% da emissão de CO₂, sendo que a libertação durante a decomposição da calcite é responsável pela restante percentagem da emissão (Scrivener et al., 2018).

De facto, no processo de cozedura, a emissão de CO₂ está associada particularmente a dois intervalos distintos. O primeiro intervalo situa-se entre os 700-900 °C, devido à decomposição do CaCO₃ em CaO e CO₂ (processo designado como calcinação), cujas proporções são de cerca de 56 e 44%, da massa, respetivamente. O segundo intervalo situa-se entre os 1300-1450 °C (temperatura máxima necessária para completar a reação dos compostos), onde ocorre a formação do silicato tricálcico através da reação do silicato bicálcico com parte do CaO. Dado que esta reação é fortemente endotérmica, a necessidade de uma quantidade de energia significativa traduz-se em maiores gastos energéticos e consequentemente a uma maior emissão de gases prejudiciais para a atmosfera. Assim, urge encontrar alternativas para reduzir o elevado impacte ambiental criado pelo betão, de modo a tornar a sua utilização mais sustentável e viável.

Para além do betão, o cimento é ainda utilizado num vasto leque de aplicações, como é o caso de argamassas, por exemplo para alvenaria, rebocos e betonilhas, e em menor expressão em produtos como blocos, pavimentos e telhas. O presente trabalho dirige-se essencialmente para a recuperação de material cimentício a partir de resíduos de betão, mas pode-se estender a outros produtos adotando-se uma lógica de separação semelhante.

2.2 Estratégias para a redução do impacto do betão

Especialistas de diversas áreas e a própria indústria de construção têm-se unido para encontrar soluções para reduzir o impacto dos produtos da construção.

Os RC&D têm sido identificados como um dos problemas prioritários de resíduos gastos pela UE. É notável a importância que a comissão europeia confere ao presente tema, conforme o que foi estabelecido na Diretiva 2009/29/CE e transposto para a legislação nacional pelo decreto de lei nº73/201. O Conselho Europeu assumiu um compromisso firme na redução da emissão de gases com efeito de estufa em pelo menos 30% até 2020, e em 60 a 80% até 2050, relativamente aos níveis de 1990. Além do mais, a Diretiva 2008/98/CE, apela aos Estados-Membros para tomarem “medidas necessárias para promover a reutilização de produtos e atividades de preparação com vista à reutilização, encorajando nomeadamente o estabelecimento e o apoio de redes de reutilização e reparação, da utilização de instrumentos económicos, de critérios de adjudicação, de objetivos quantitativos ou de outras medidas”. Particularmente é referido que até 2020, a preparação para a reutilização, reciclagem e valorização de outros materiais, incluindo resíduos de construção e demolição, devem prover de uma base mínima de 70% em peso.

É de conhecimento geral que a reciclagem será uma das práticas indispensáveis face ao problema do RC&D e, somente com o estabelecimento de novas estratégias, é que um desenvolvimento mais sustentável será possível. No caso de vários países, incluindo Portugal, apesar da reciclagem dos resíduos ainda estar subaproveitada e subdesenvolvida, muitos já adotaram uma posição pró-ativa a fim de combater esta adversidade. Novos métodos deverão ser adotados, tanto a nível nacional como mundial, para além dos já existentes nas normativas nacionais, dado que os resíduos se tratam de um problema com forte repercussão ambiental.

Em casos internacionais, vários países já demonstraram fruto das soluções implementadas. Na Alemanha, em 2007, foram produzidos mais de 72,4 milhões de toneladas de resíduos de construção. Contudo, a taxa de reciclagem chegou a atingir os 68% (Vázquez, 2013). No caso do Reino Unido, mais de 60% dos agregados reciclados a partir dos RC&D são utilizados como agregado em preenchimentos gerais ou na recuperação de terras. Cerca de 17% das necessidades de agregados do Reino Unido são satisfeitas pelo uso do agregado reciclado (MPA, 2013). O Japão é um dos países onde a reciclagem dos RC&D se encontra mais avançada. Em 2000, 96% do betão demolido foi reciclado, ultrapassando a expectativa de 90% estabelecido pelo Ministério de Construção Japonês no “*Recycle 21*” em 1992. Porém, a maioria dos agregados reciclados foram utilizados como material de sub-base para pavimento rodoviário (Rao et al., 2018).

Para além da reciclagem, nas últimas décadas, a fim de reduzir custos e combater a pegada ecológica da produção de betão, diversas investigações foram efetuadas com o intuito de desenvolver alternativas viáveis de reduzir efetivamente a emissão de gases de efeito estufa. Destes estudos destacam-se técnicas de captura e armazenamento de CO₂ (*CO₂ capture and storage*, CCS) propostas pela *International Energy Agency* (IEA), o uso de substitutos de clínqueres, a utilização de combustíveis alternativos e reutilização de agregados reciclados. A fim de aperfeiçoar as técnicas de CCS, diversos

estudos e investigações foram levados a cabo por diferentes sectores incluindo o sector cimentício, porém, as tecnologias na presente fase ainda apresentam problemas como o elevado custo dos equipamentos e o gasto de energia associado, para além de ainda não terem sido encontradas formas potenciais de se utilizar o CO₂ capturado.

Diferentes autores como Ahn et al. (2006); Kim et al. (2012); Pepe et al. (2014); Gomes et al. (2015); Lofti et al. (2014) (não obstante outros autores) estudaram métodos de separação de agregados reciclados para a sua reincorporação em novos betões de forma a reduzir a produção de resíduos e o consumo de recursos naturais, dado que estes representam mais de 50% do volume do betão. Todavia, o problema das elevadas emissões de gases de estufa associadas à produção do betão dificilmente será respondido pelo reaproveitamento dos agregados, uma vez que a emissão de CO₂ está essencialmente ligada ao uso do cimento Portland. Este representa uma taxa de emissão sensivelmente entre os 80-90% da totalidade de emissões envolvidas no processo de fabrico do betão (Yang et al., 2015). Resumidamente, apesar das inúmeras estratégias/ideias sugeridas e existentes na literatura, as suas implementações ainda estão longe de serem possíveis ou satisfatórias para mitigar o referido problema do impacte ambiental do betão.

Recentemente, novas investigações têm vindo a ganhar lugar e vários autores têm proposto a reutilização de resíduos de materiais cimentícios como matéria-prima na produção de cimentos reciclados (Shui et al., 2008; Wang et al., 2018; He et al., 2019; Bogas et al., 2019;). Destaca-se a linha de investigação recentemente criada no IST, na qual se insere o presente trabalho e que visa exatamente a produção de cimentos de baixa emissão de CO₂ a partir de resíduos de betão.

No entanto, dos escassos trabalhos desenvolvidos, os autores recorrem predominantemente ao uso de pastas puras de cimento como matéria-prima, ao invés de resíduos de betão, devido à inexistência de métodos para individualizar o cimento hidratado presente no betão. De acordo com Wang et al. (2018), a separação de cimento dos restantes constituintes do betão é uma etapa essencial para o sucesso da produção de cimentos reciclados. Embora existam autores, como Bogas et al. (2019), que efetuaram estudos relativos à potencialidade de reativação do cimento proveniente de betão, através da moagem na integra do betão e posterior aquecimento, a existência de agregados no cimento reciclado desvalorizou consideravelmente os resultados obtidos. Desse modo, conforme referido anteriormente, o presente estudo enquadra-se no âmbito de dar resposta às dificuldades enfrentadas pela comunidade científica no que toca à separação do composto cimentício, visando a obtenção de cimento reciclado.

2.3 Processamento dos resíduos de construção e demolição

O tratamento dos resíduos de demolição e construção visa à obtenção de materiais que correspondam às exigências técnicas e ambientais para os fins a que estão destinados. Os agregados reciclados são obtidos através do processamento/tratamento de RC&D. Naturalmente, o uso destes materiais, ou parcela dos mesmos, está dependente das partículas indesejáveis ou da presença de poluentes que lhes estão inerentes, e será tanto maior quanto menor for a percentagem

destes resíduos. É implícito que uma demolição seletiva e criteriosa seja imprescindível e que seja avidamente incentivada. Apesar de se tratar de um processo mais moroso do que uma demolição tradicional, apresenta vantagens.

Segundo o LNEC E 471-2009, guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, de modo a obter os agregados reciclados dos RC&D, estes têm que passar por quatro fases principais: Triagem, redução primária, britagem e crivagem. Na fase de triagem, são descartados todos os componentes indesejáveis que comprometem a integridade do produto reciclado (por ex.: cerâmicos, plásticos, madeiras, metais e matérias orgânicas). Os resíduos leves, como o plástico, o papel e a madeira são facilmente removidos por classificadores de ar, métodos de aspiração, ou outros métodos de separação gravítica, e crivagem. Por sua vez, os metais, resultantes das armaduras utilizadas no betão armado, são separados por separadores magnéticos convencionais de baixa intensidade. Na operação adjacente, denominada por redução primária, os escombros são fragmentados, procedendo-se à remoção dos materiais metálicos ou de outros materiais indesejáveis ainda existentes. Posteriormente, a britagem pode desenvolver-se em diversas fases, com redução progressiva das dimensões dos resíduos. Por fim, com a crivagem, categorizam-se os materiais obtidos em diferentes granulometrias. Os resíduos são armazenados em separado, conforme a sua origem e constituintes principais.

O processamento do RC&D pode ser feito em centrais móveis ou em centrais fixas. As centrais fixas apesar de terem a desvantagem de estarem longe dos locais de demolição, geralmente dispõem de um sistema mais produtivo do que as centrais móveis.

A produção de betões com agregados reciclados tem sido alvo de diversos estudos de investigação, visando contribuir para a reutilização efetiva dos RC&D. No entanto, um dos problemas que tem dificultado a afirmação destes betões no mercado da construção, nomeadamente em soluções estruturais, está relacionado com a elevada quantidade de pasta aderida nos agregados reciclados, após os processos correntes de britagem dos detritos de betão. Na literatura é referido que os agregados finos reciclados podem conter até 65% do seu peso total de pasta cimentícia, e os agregados grossos reciclados cerca de 20 a 40% (Florea e Brouwers, 2013). Embora dependa das características do betão de origem, a pasta aderida, em geral, contribui para o aumento de absorção de água nos agregados, menor aderência agregado-pasta e betões de menor trabalhabilidade e resistência (Tam et al., 2007; Shi et al., 2016). Desse modo, os procedimentos que visem a redução de pasta aderente, contribuem para agregados e betões reciclados de melhor qualidade.

2.4 Separação dos constituintes do betão

O betão é um material heterogéneo cujos seus componentes apresentam características físicas, químicas e mecânicas distintas, nomeadamente no que se refere à matriz cimentícia e aos diferentes tipos de agregado que fazem parte da sua constituição. Nesse sentido, a aplicação de métodos de libertação e separação para a recuperação e reutilização deste material deverão explorar estas diferenças.

Em Portugal predominam os agregados graníticos, calcários e aluvionares. A presença dos agregados basálticos é dominante nas Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira e muito pouco expressiva em Portugal Continental (Castelo Branco e Ferreira, 2009). Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores médios da massa volúmica e da resistência à compressão dos agregados correntemente utilizados em Portugal.

Por sua vez, o cimento é um produto proveniente da mistura de clínquer moído com gesso e outras adições. Quando no estado anidro, apresenta uma massa volúmica na ordem dos 3100 kg/m³ (Pinto et al., 2006). Porém no estado hidratado, apresenta uma massa volúmica inferior, na ordem dos 2200 kg/m³ (Gomes et al., 2013). Nesse sentido, a diferença de massa volúmica dos constituintes do betão pode ser explorada em métodos de separação gravítica. No entanto, como se percebe as diferenças de massa volúmica são pequenas, o que dificulta a efetivação destes processos.

Tabela 2.1. Massa volúmica e resistência à compressão dos agregados mais utilizados em Portugal (adaptado de Castelo Branco e Ferreira, 2009; Coutinho, 1999)

Tipo petrográfico	Valor Médio da massa volúmica (g/cm ³)	Resistência à Compressão (MPa)
Granito	2,67	50 - 60
Calcário	2,70	40 - 70
Basalto	2,93	90 - 120

Em território nacional, para betões correntes, é comum o uso de rochas com resistências mecânicas superiores a 60 MPa. Deste modo a resistência do betão depende normalmente da resistência da pasta de cimento. Aproveitando a diferença de resistência destes materiais, podem ser explorados métodos de libertação baseados em ações mecânicas, como a britagem e a moagem.

Para além de diferenças na massa volúmica e resistência, os componentes do betão apresentam diferentes coeficientes de expansão térmica. Em geral, o coeficiente de expansão linear de uma pasta de cimento compreende-se entre os 11x10⁻⁶/°C, podendo exceder os 20x10⁻⁶/°C. Rochas naturais utilizadas como agregado exibem um coeficiente de expansão térmica variado, associado geralmente ao teor de sílica que raramente excede os 12x10⁻⁶/°C (Sims e Brown., 1998). Na Tabela 2.2 estão indicados os valores dos coeficientes de expansão térmica dos vários agregados referidos anteriormente. Desse modo, na presença de elevadas temperaturas, podem ser também exploradas as diferenças de coeficientes de expansão térmica dos constituintes com o objetivo de promover a sua libertação do betão.

Tabela 2.2. Coeficiente de expansão térmica linear dos agregados mais utilizados em Portugal (adaptado de Sims e Brown, 1998)

Tipo petrográfico	Coeficiente linear de expansão térmica (x 10 ⁻⁶ /°C)
Granito	1,8 - 11,9
Calcário	0,9 - 12,2
Areia	4,3 - 13,9
Basalto	3,6 - 9,7

Tendo por base os métodos de separação desenvolvidos pela indústria mineira, têm sido sugeridos vários processos de separação de detritos de betão, visando essencialmente a obtenção de agregados reciclados de melhor qualidade, por remoção da pasta de cimento aderida, e com isso a produção de betões reciclados de melhor desempenho. De facto, como referido, os agregados reciclados muitas vezes contêm uma grande quantidade de argamassa aderente. A percentagem de volume da antiga argamassa aderente pode rondar entre os 20% e 70% (De Juan e Gutierrez, 2009; Akbarnezhad et al., 2011) da massa do agregado, variando consoante a dimensão dos fragmentos, a resistência do betão inicial e o tipo de técnica de britagem aplicada.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos diferentes métodos de processamento de agregado reciclado, com o intuito de melhorar a separação da pasta dos agregados reciclados, com maior ou menor eficácia entre eles. São métodos que apesar de se focarem na obtenção de agregados limpos, permitem simultaneamente a obtenção do material cimentício, apesar de não se terem desenvolvido estratégias para a sua recuperação.

Os métodos de separação que têm sido propostos podem ser agrupados em técnicas de separação mecânica (britagem, impacto, moagem, crivagem), separação térmica, separação gravítica ou a combinação destas técnicas (Akbarnezhad e Ong, 2013). Nos seguintes subcapítulos, apresentam-se alguns dos métodos de separação que têm sido propostos na literatura, salientando-se que nenhum deles é ainda capaz de garantir uma separação verdadeiramente eficiente dos constituintes do betão.

2.4.1 Separação mecânica

No método da separação mecânica, forças mecânicas são exercidas nas amostras através de compressão, choques e desgaste, a fim de separar a matriz cimentícia dos agregados. Devido à maior rigidez dos agregados comparativamente com a pasta cimentícia do betão, aquando do processo de separação, a argamassa aderente tende a ser destruída primeiramente. As forças mecânicas podem ser introduzidas por variados equipamentos ou combinações destes, de onde vários autores desenvolveram diversas técnicas aplicando o mesmo princípio. A fragmentação do resíduo pode ser feita com recurso a diferentes metodologias que podem ou não envolver etapas de britagem, impacto, moagem e desgaste. Os diferentes tipos de equipamento conduzem a agregados com distintas propriedades físicas e mecânicas, e a sua eficácia é refletida pelas características do betão (Ex: classe de cimento e relação a/c).

2.4.1.1 Britagem

Conforme mencionado no Capítulo 2.3, os RC&D passam por uma fase preliminar, onde são retirados todos os componentes indesejados, e em seguida britados e categorizados por tamanho (é de esperar que durante esses processos, parte da matriz cimentícia já tenha sido perdida). A britagem inicial é comum a todas as outras técnicas de separação que serão discutidas de seguida, a fim de simular o processamento ocorrido durante a triagem. Esta primeira etapa é essencial, a fim de reduzir o material para dimensões mais fáceis de manusear.

As britadeiras de maxila são utilizadas frequentemente na britagem primária, por conseguirem reduzir blocos de betão de grandes dimensões para tamanhos apropriados para as consequentes intervenções (Behera et al., 2014). Sugere-se que a britagem é mais efetiva na reciclagem de agregados do que a ação de impacto, conduzindo a menores taxas de partículas partidas de agregado (Lotfi et al., 2014).

Conforme descrito por Gupta e Yan (2016), as britadeiras de maxila são concebidas de forma a esmagar o material colocado entre duas placas metálicas, sendo uma delas fixa e a outra móvel (maxila) (Figura 2.1). Estas placas estendem-se de forma convergente relativamente uma à outra, de cima para baixo, sendo confinadas lateralmente por paredes verticais estáticas. As placas e as paredes laterais formam um funil com uma grande abertura de entrada na face superior, onde este recebe o material a ser processado. Com a ajuda do motor integrado no equipamento, a placa móvel é acionada de forma ascendente e descendente, repetidamente em direção à placa fixa. Os aglomerados de betão são constantemente pressionados pelo movimento das maxilas em direção à outra, seguido do movimento na direção contrária, a qual permite que o material desça no “funil” e seja novamente esmagado pelas maxilas. O posicionamento e os movimentos das placas são desenhados para ter a maior taxa de esmagamento antes da saída do material, promovendo assim uma melhor separação do mesmo. A abertura inferior do equipamento define a dimensão máxima das partículas que são produzidas, pelo que este está também relacionado com a granulometria do produto obtido e a taxa de produtividade.

Por comparação com as britadeiras de maxila, que funcionam através de ações consecutivas e progressivas sobre as partículas, as britadeiras de impacto cominuem o material através de impactos intensos e momentâneos (Figura 2.2). Por meio do movimento do rotor, o material que é colocado na britadeira é atingido por dentes de aço ou barras ligadas ao rotor, sendo projetado contra as paredes do equipamento, levando à fragmentação das partículas (Dhir et al., 2019).

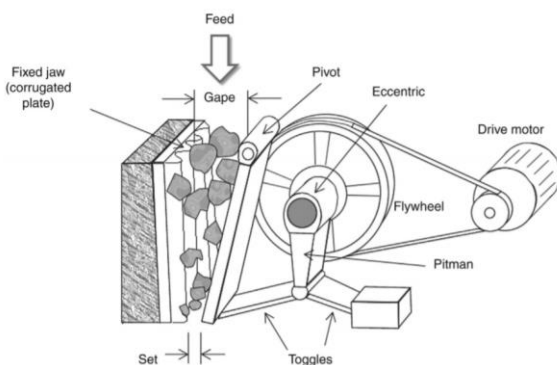


Figura 2.1. Esquema ilustrativo de uma britadeira de maxila (Gupta e Yan, 2016)

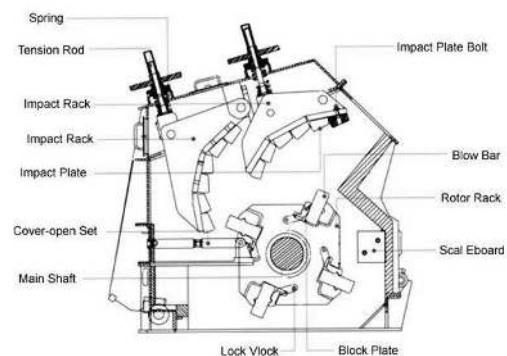


Figura 2.2. Esquema ilustrativo de uma britadeira de impacto (Zenith, 2019)

Em 2011, Schenk (WO2011/142663A1) patenteou uma inovação da britadeira de maxila, direcionada para fracionar e separar materiais compósitos (particularmente o betão) (Figura 2.3). É referido que este novo aparelho assegura uma melhor separação do betão comparativamente com a britadeira de maxila convencional, pela incorporação de um novo mecanismo na abertura de saída da britadeira. O autor incorporou um meio de restrição na abertura da saída, com a finalidade de retardar a saída do material pela base. O autor refere que, enquanto a saída do material é condicionada pela abertura da

saída e a distância entre maxilas for limitada, a ação atuada sobre as partículas não é tao favorável devido à elevada pressão exercida sobre as mesmas, podendo provocar fissuração indesejável. No entanto, quando a distância entre as placas da britadeira é alargada, como é o caso do novo equipamento proposto, as tensões exercidas nas partículas tendem a ser reduzidas e os fragmentos têm mais espaço para se moverem entre eles, permitindo uma maior separação do cimento e do agregado, resultante dos movimentos de desgaste entre o material.

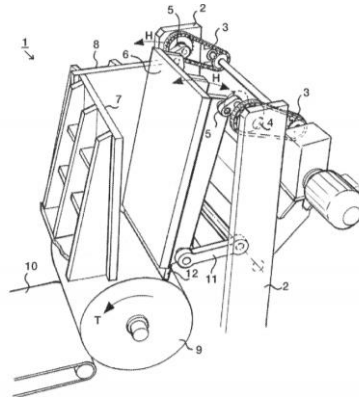


Figura 2.3. Esquema ilustrativo da britadeira de maxila patenteado por Schenk (Schenk, 2011)

O protótipo do dispositivo mencionado acima foi testado mais tarde por Florea et al., em 2013, em comparação com uma britadeira de maxila convencional. Numa primeira análise, os autores mencionaram que o protótipo produziu mais material fino relativamente à britadeira de maxila, assim como também houve uma maior afinidade entre a curva granulométrica obtida pela análise do material resultante do protótipo e a curva dos agregados inicialmente utilizados para produzir o betão. Os autores apontaram que houve um aumento de 50% na recuperação da massa cimentícia das partículas com a mesma dimensão. Ainda, na peneiração de ambos os materiais (obtidos dos dois equipamentos distintos) obteve-se uma maior percentagem de finos através do novo dispositivo (até cinco vezes em volume para as partículas com menos de 1 mm). Concluem que as partículas da pasta cimentícia recuperadas foram, em massa, 7,5 vezes superiores às obtidas em britadeira convencional.

Foram também realizadas variadas investigações com o intuito de combinar os equipamentos mencionados, a fim de avaliar a sua eficiência. Ulsen et al. (2018) concluíram, relativamente às diferenças do uso de britadeira de maxila e britadeira de impacto na britagem primária e/ou secundária, que ambos os equipamentos manifestavam resultados idênticos. A pequena diferença observada não foi o suficiente para justificar a ideia comum na indústria, de que a britadeira de impacto apresenta melhorias na qualidade dos agregados reciclados devido ao seu maior destacamento da pasta cimentícia dos agregados.

2.4.1.2 Britagem seguida de moagem

A separação da pasta cimentícia dos agregados pode também ser realizadas através da combinação de britagem e moagem. É uma das técnicas mais simples e populares, dada a sua versatilidade e facilidade de execução. No entanto, autores como Despotović (2016), reportaram que a moagem pode danificar os agregados ao originar micro fissuração nos mesmos.

A moagem do betão é frequentemente executada recorrendo a um moinho de tambor. Existem atualmente uma grande diversidade de moinhos de tambor, tais como o moinho de barras, de bolas e o autogéneo. O moinho de bolas utiliza como corpos moedores, bolas metálicas, enquanto que o moinho de barras recorre a barras metálicas (Figura 2.4). Ao contrário das moagens referidas, a moagem autogénea, consiste em usar o próprio material como agente fragmentador. Os três tipos de moinhos têm uma estrutura semelhante, sendo constituídos por um cilindro horizontal que consegue rodar sobre o seu eixo. O revestimento interno do moinho deve ser resistente ao desgaste e promover o movimento mais favorável do material (Silva, 2013). A quantidade de barras ou bolas a serem introduzidas deverá ser ajustada consoante as características do material introduzido. Quando o objetivo é a limpeza e recuperação de agregado reciclado, o moinho de bolas pode ainda conduzir a britagem excessiva, nomeadamente nos agregados de natureza mais branda.

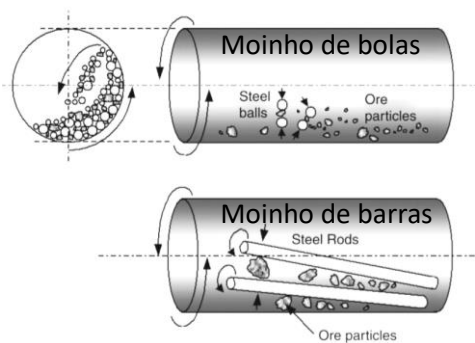


Figura 2.4. Esquema ilustrativo de moinhos de tambor (Gupta e Yan, 2016)

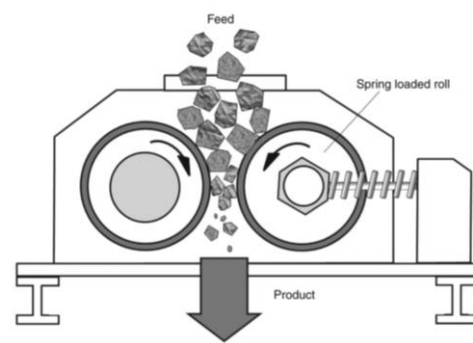


Figura 2.5. Esquema ilustrativo de um moinho de rolos (Gupta e Yan, 2016)

Outra técnica de moagem utilizada consiste na utilização de moinhos com cilindros rotativos concêntricos (Figura 2.5), em que as partículas de betão são friccionadas entre as paredes de ambos os cilindros, resultando na remoção dos elementos finos da pasta (Yoda et al., 2003). A eficiência dos métodos de moagem é condicionada pelo tipo de agregado, verificando-se que para agregados de natureza mais branda as frações finas podem ser significativamente contaminadas por agregado, que foi também sujeito a desgaste e impacto. Por outro lado, estas técnicas estão ainda associadas a consumos de energia elevados, quando se pretendem níveis de separação razoáveis (Akbarvezhad e Ong, 2013). Outra desvantagem destes métodos é o elevado nível de ruído que é gerado.

De acordo com Pepe et al. (2014) a moagem autogénea mostrou resultados satisfatórios, dado que foi possível reduzir a absorção de água dos agregados reciclados, de 50% para 20% e ainda a percentagem de argamassa aderente aos mesmos, de 30% para 15%. Nagataki et al. (2004) avaliaram as características do agregado reciclado recorrendo à microscopia de fluorescência e análise de imagem. Este estudo focou-se nas características de agregados reciclados produzidos através de métodos de separação que contribuem para a melhoria da qualidade do produto. A técnica de reciclagem relatada neste estudo consistiu em britar o betão de origem usando uma combinação de britadores de maxila e de impacto. Em seguida, o material britado foi sujeito a moagem, no sentido de minimizar a quantidade de argamassa aderente. Os resultados mostraram que a dupla moagem pode reduzir significativamente a quantidade de pasta aderente, constatando uma redução de quase 60% da percentagem inicial.

Á semelhança dos métodos propostos na literatura com base na separação recorrendo à britagem e moagem dos detritos de betão, também foram registadas várias patentes introduzindo sistemas inovadores de britagem e moagem através da modificação dos equipamentos convencionais. Entre outros, indica-se como exemplo as patentes JP2009000606A, KR101379913B1, CN107140903A e KR20020090354. Nenhuma das patentes prevê a recuperação da matriz cimentícia.

2.4.2 Separação térmica

Como referido em 2.4, a argamassa de cimento apresenta tipicamente um coeficiente de dilatação térmica superior aos agregados naturais. Assim, quando o betão é exposto a elevada temperatura, a pasta dilata mais acentuadamente do que os agregados (Sims et al., 1998). Os métodos de separação térmicos tiram partido deste fenómeno, para que durante a expansão diferencial dos diferentes constituintes do betão se desenvolvam tensões internas que provoquem o seu destacamento e separação (Akbarnezhad e Ong, 2013). Dependendo das características do agregado e da pasta, o material é aquecido durante um dado intervalo de tempo a uma dada temperatura pré-estabelecida, para efetuar a separação. É expectável que se formem elevadas tensões térmicas diferenciais, especialmente na zona de transição entre a argamassa e o agregado (*interfacial transition zone* (ITZ)). A formação de fissuras no elemento mais fraco, ou seja, na pasta, promove a delaminação dos fragmentos cimentícios aderentes, sem causar danos relevantes nos agregados.

2.4.2.1 Aquecimento em forno convencional

O recurso à separação térmica em forno convencional implica usualmente a consideração de detritos de betão provindos de um processo inicial de britagem. Em geral, consideram-se fornos rotativos, de forma a garantir um aquecimento uniforme das partículas. Dependendo das características dos agregados reciclados, do tipo de agregado e da resistência da argamassa aderente, o material é tipicamente submetido a temperaturas no intervalo 300-500 °C durante aproximadamente 2 horas (Shima et al., 2005; Akbarnezhad e Ong, 2013). A seguir ao aquecimento e arrefecimento do material, este é crivado, separando a matriz cimentícia dos agregados.

Autores distintos sugerem diferentes temperaturas e tempos de exposição. Por exemplo, Ahn et al. (2001) sugeriram temperaturas no intervalo de 200-500 °C durante 1 hora de aquecimento, contrariamente ao que foi considerado por Akbarnezhad e Ong (2013), em que empregaram temperaturas entre 300 e 600 °C durante um período de exposição de 2 horas.

De acordo com Akbarnezhad e Ong (2013), saturar o material antes do processo térmico pode aumentar a eficiência do método, pois este irá promover um maior desenvolvimento de tensões nos poros da argamassa, através da criação de vapor de água, acelerando assim a remoção da mesma. Por sua vez, De Juan e Gutierrez (2009) recomendaram a imersão dos agregados em água fria imediatamente após o aquecimento, de forma a aumentar a tensão diferencial térmica da argamassa. Denota-se que esta última técnica poderá apresentar complicações posteriores, dado que implica um processo posterior de secagem dos agregados.

No entanto, apesar dos vários aspetos positivos da separação térmica, tal como a facilidade de aplicação e a simplicidade dos dispositivos, esta possui vários fatores que a tornam pouco apelativa para a indústria, nomeadamente o elevado consumo de energia, tempos de processamento longos, a alteração parcial das características físicas e mecânicas dos seus constituintes e a baixa eficiência de remoção da argamassa (Al-Bayati et al., 2016; Niry et al., 2013). Naturalmente, este método é mais eficiente nos betões em que a diferença entre a qualidade da pasta e do agregado é elevada, podendo ser menos adequado para vários betões que hoje em dia são utilizados na construção (Akbarnezhad e Ong (2013).

2.4.2.2 Micro-ondas

A presente técnica consiste no aquecimento do betão com recurso a radiações de micro-ondas de alta potência. Devido às suas propriedades dielétricas, o betão quando exposto a ondas eletromagnéticas, consegue conservar a energia recebida (Jamil et al., 2013).

A micro-onda é uma radiação eletromagnética não ionizante que provoca a migração de iões e/ou rotações dos dipolos do material, causadas pelo elevado número de vezes em que o campo eletromagnético se alterna, ou seja, a aplicação de uma irradiação micro-ondas leva a que os dipolos ou os iões do material reacional se alinhem no campo elétrico aplicado. Quando existe uma variação do campo elétrico, os dipolos ou os iões tendem-se a realinhar no campo elétrico oscilante e, durante este processo, estes perdem energia sob a forma de calor, por ação dos choques moleculares e perdas dielétricas (Kappe, 2004). A água é dos principais componentes dipolares responsável pelo aquecimento dielétrico, sendo um material que absorve bem a energia das ondas eletromagnéticas do micro-ondas (Akbarnezhad, 2010).

Quando o betão é exposto a radiações de micro-ondas, aquece facilmente devido à presença de água no seu interior e aos efeitos supramencionados. Como resultado, a água presente no interior do betão evapora e origina vapor de água que criará tensões no interior dos poros, propiciando desta maneira a fissuração da argamassa e o destacamento da mesma. Face ao agregado natural, a pasta cimentícia do agregado reciclado tem uma porosidade consideravelmente superior. Desse modo, quando imersa em água, a pasta aderente absorve significativamente mais água do que o agregado, sugerindo-se que este método tenha maior eficiência em betão saturado. Ainda, comparativamente com a argamassa e o agregado, a ITZ é a que geralmente apresenta maior porosidade e absorção de água (Scrivener et al., 2004). Consequentemente, a maior percentagem de água na zona de transição levará a um aquecimento mais rápido da região quando exposto às micro-ondas. Desta forma é de esperar que ocorra um maior desenvolvimento de tensões térmicas na zona de transição, favorecendo assim a remoção da argamassa aderente do agregado reciclado.

Para além das propriedades eletromagnéticas da pasta e do agregado, as diferenças nas propriedades térmicas, tais como a condutividade térmica e o coeficiente de expansão, também contribuem para as tensões diferenciais na ITZ. Porém, os efeitos são consideravelmente menos significativos relativamente aos efeitos das diferentes propriedades eletromagnéticas (Akbarnezhad, 2010).

Tendo por base baixas energias de aquecimento, Bru et al. (2014) reportam que o tratamento dos agregados reciclados através do método de micro-ondas foi efetivo, independentemente do tipo de agregado utilizado no betão.

2.4.3 Separação termomecânica

Na técnica da separação termomecânica, a fim de reunir os vários aspetos benéficos dos diversos métodos, recorre-se a uma combinação do método de separação térmico e mecânico. Numa primeira fase, o material é britado de forma a exibir fragmentos mais reduzidos. De seguida, este é aquecido durante um tempo específico para uma determinada temperatura e, finalmente, após o arrefecimento do material, sujeito a uma ação mecânica de moagem autógena ou com recurso a agentes moedores.

Inúmeras investigações foram realizadas em torno do método em causa. Shima et al. (1999) propuseram um método conhecido como "*heating and rubbing*". A técnica consiste em aquecer o material primeiramente num forno vertical a 300 °C, de forma a fragilizar a massa cimentícia com a desidratação da mesma. Esta é encaminhada posteriormente para um moinho, onde é desgastada com o auxílio de bolas de aço. Ahn et al. em 2001, também utilizaram métodos termomecânicos, para temperaturas de 200-500 °C, seguido de moagem. Concluem que a quantidade de pasta cimentícia separada incrementava com o aumento da temperatura.

Kim et al. (2012) concluíram que a moagem autógena, após o aquecimento dos agregados reciclados, aparenta ser um método eficiente de libertar a argamassa cimentícia do agregado natural e, como resultado, produzir um agregado reciclado de alta qualidade. Analogamente, Al Bayati et al. (2016) analisaram diversos métodos de tratamento, concluindo que a combinação do método térmico a 350 °C e uma breve moagem autógena conduz aos melhores resultados. Com este procedimento foi possível reduzir em 27,4% a absorção de água, garantindo boas propriedades físicas do agregado reciclado.

Diversas patentes como a CN1857782A, US7258737B2, CN105271858A, também adotaram uma separação termomecânica, onde conjugam um tratamento térmico seguida de moagens mecânicas. A posterior separação é realizada através da crivagem, classificadores de ar ou lavagem, tendo como objetivo principal a recuperação dos agregados.

2.4.4 Separação química

O método de flotação é um dos processos mais versáteis e correntemente utilizados na indústria do minério. Este método fundamenta-se nas propriedades hidrofóbicas e hidrofílicas dos materiais. A separação é realizada através de criação/geração de bolhas de tamanhos apropriados que consigam carregar as partículas alvo, hidrofóbicas, para a superfície do líquido, enquanto que as restantes partículas hidrofílicas permanecem no fundo (Gupta e Yan, 2016; Wills, 1985). As propriedades hidrofóbicas são conferidas pelos reagentes químicos introduzidos no líquido.

O método dos líquidos pesados é também um dos processos pertencentes ao âmbito de separação química. Tal como o próprio nome indica, este recorre a líquidos pesados na separação. Isto é, na separação das amostras, líquidos com diferentes densidades são utilizados a fim de separar materiais com diferentes densidades (as partículas leves irão flutuar e as partículas pesadas afundar-se-ão) (Wills, 1985). Conforme citado anteriormente, a pasta cimentícia e os agregados utilizados apresentam diferentes massas volúmicas e diferente porosidade, tornando-os assim aptos para o presente método.

Contudo, dado que o produto recuperado pode estar contaminado com os químicos incorporados, a aplicabilidade destes métodos torna-se inadequada. Além disso, os líquidos adicionados são prejudiciais para o meio ambiente, contrariando a génese da proteção ambiental. Por outro lado, trata-se de um método economicamente pouco atrativo, pois obriga à substituição periódica do líquido pesado, que para a ordem de grandeza de densidade dos constituintes do betão é muito dispendioso.

Não são abordados métodos químicos com recurso a ácidos que reajam com a pasta, dado que estes destroem a integridade da matriz cimentícia.

2.4.5 Separação elétrica

Para além dos métodos expostos previamente, recentemente foi desenvolvido um novo método que recorre a elevadas descargas elétricas. Este método consiste em descargas elétricas através de um eletrodo imerso num recipiente com o material alvo e água, e um eletrodo distinto na base do recipiente. De seguida, o aparelho produz uma descarga elétrica de curta duração e elevada voltagem entre os dois eletrodos. Como efeito desta descarga, tensões internas são originadas devido à diferença das cargas elétricas entre os elementos (este efeito é maior nas interfaces do agregado e da pasta). Touzé et al. (2017) documentam o sucesso na utilização deste método. No entanto, este método está associado a um elevado consumo de energia, tornando-o ainda inviável para a indústria. Deste modo, não será feita uma análise mais pormenorizada do presente método, visto que uma técnica onerosa não será a mais apropriada na tentativa de procurar estratégias de reciclagem do betão.

2.4.6 Considerações finais

Atualmente, a reciclagem dos constituintes do betão considera essencialmente métodos de separação mecânica, térmica, gravítica ou química, que têm por objetivo a recuperação dos agregados, sendo ainda escassos os procedimentos que visam também a recuperação do cimento. Estes procedimentos apresentam rendimentos e consumos de energia bastante diferentes, não existindo ainda um método verdadeiramente capaz de conduzir a níveis elevados de eficiência no que se refere à relação separação *versus* custo económico e ambiental. Os métodos que potencialmente conduzem a níveis de purificação elevados são muito dispendiosos ou difíceis de transpor para o meio industrial, tornando-os inviáveis. Desse modo, urge explorar novas metodologias fáceis de implementar na indústria e de reduzido impacto ambiental, que conduzam a elevados rendimentos de separação, para baixos consumos energéticos. Foi nesse sentido, que se desenvolveu a metodologia de separação proposta no presente trabalho e que se encontra atualmente em processo de avaliação para ser patenteada.

3 Campanha Experimental

A campanha experimental no presente trabalho teve por objetivo principal o estudo de processos de separação para a obtenção de cimento reciclado proveniente de resíduos de betão, através da consideração de vários métodos de libertação e separação dos elementos do betão presentes na literatura, e ainda, via métodos inovadores testados no âmbito do trabalho. Neste capítulo também se apresenta uma breve descrição dos materiais utilizados e das técnicas de caracterização aplicadas ao longo do trabalho experimental. Dado a importância dos métodos de separação para o presente trabalho, optou-se por apresentar esta parte em separado, no Capítulo 4.

Este trabalho insere-se numa linha de investigação iniciada em 2018, no âmbito do projeto da FCT, PTDC/ECI-CON/28308/2017, designado por “*Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials* (Ligantes hidráulicos ecoeficientes produzidos a partir de resíduos de materiais cimentícios)” do CERIS/IST, que se tem desenvolvido na secção de construção do departamento de engenharia civil do Instituto Superior Técnico e que visa à produção e caracterização de cimentos reciclados de baixo carbono a partir de betões termicamente reativados e ao fabrico de clínqueres ecoeficientes a partir de resíduos de betão como matéria-prima.

3.1 Introdução

A campanha experimental foi desenvolvida segundo 5 etapas fundamentais e uma etapa adicional: produção de betão de origem; produção de resíduos de betão; libertação e separação dos constituintes, avaliação dos métodos de separação; produção e caracterização do cimento reciclado.

Inicialmente, foram produzidos betões de origem, que após, pelo menos, 90 dias de idade foram sujeitos a reciclagem. Estes betões de origem de relação a/c de 0,55 foram produzidos no âmbito do projeto de investigação referido. Numa segunda fase, os provetes de betão de origem, representativos de elementos de betão existentes, foram submetidos a diversos processos de libertação, através de britagem, moagem e crivagem, de modo a obter um produto final finamente fragmentado a uma granulometria adequada para a separação. De seguida, este material foi separado em agregado e matriz cimentícia através dos métodos de separação, mais especificamente, pelo método magnético e método gravítico, que serão introduzidos posteriormente no próximo capítulo. Após a separação, procedeu-se à caracterização da matriz cimentícia obtida por meio de técnicas de análise termogravimétrica, difração de raios X, ataque ácido e análise microscópica. Complementarmente, procedeu-se ainda à termoativação do cimento reciclado obtido, de modo a promover a sua reidratação. Neste caso, foram produzidos e caracterizados provetes de pasta com o cimento reciclado e comparado o seu desempenho com o de cimento obtido diretamente de pastas de origem.

Foi também considerada uma linha de separação alternativa, em que foram testados processos térmicos na fase da libertação. O material, depois de uma primeira britagem foi submetido a diferentes

temperaturas, compreendidas entre os 300 e 500 °C e posteriormente sujeito a uma ação mecânica. Ainda que o objetivo principal passe pela separação da fração cimentícia dos restantes componentes do betão, os procedimentos propostos podem do mesmo modo ser implementados para atingir agregados reciclados de melhor qualidade, ou ter ainda outros proveitos/utilidades.

3.2 Produção do betão de origem

Como referido anteriormente, este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação, tendo-se aproveitado dados e materiais obtidos em estudos prévios, nomeadamente no que se refere à seleção de materiais, formulação e produção dos provetes de betão de origem.

3.2.1 Agregados

Na produção do betão de origem (BO) foram utilizados agregados grossos, de natureza calcária, brita 2, brita 1 e bagos de arroz, provenientes da Pedreira do Galo, Sesimbra. Para os agregados finos foram adotadas duas areias naturais siliciosas, areia grossa e areia fina, provenientes de Pinhal do Conde, Seixal, e da Herdade de Mesquita, Sesimbra, respetivamente. Os agregados grossos e finos foram fornecidos pela empresa Soarvamil. Exemplos dos materiais utilizados estão apresentados na Figura 3.1.



Figura 3.1. Amostras de Bago de Arroz, Brita 1, Brita 2, Areia Fina e Areia Grossa, da esquerda para a direita, respetivamente.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados, nomeadamente a massa volúmica das partículas secas em estufa, massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, absorção de água, baridade e índice de forma, encontram-se na Tabela 3.1, assim como as respetivas normas adotadas.

Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores obtidos da análise granulométrica de cada um dos agregados utilizados, o diâmetro máximo ($D_{máx}$) e mínimo ($d_{mín}$), bem como a respetiva categoria e módulo de finura dos agregados.

Tabela 3.1. Ensaio de caracterização física dos agregados

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

Tabela 3.2. Propriedades geométricas dos agregados

Abertura peneiro (mm)	Passado acumulado (%)				
	Areia fina	Areia grossa	Bago de Arroz	Brita 1	Brita 2
22,4	-	-	-	-	100,0
20	-	-	-	-	97,0
16	-	-	-	100,0	76,1
12,5	-	-	-	99,3	28,3
11,2	-	-	-	96,1	13,8
10	-	-	-	86,9	5,7
8	-	100,0	100,0	58,2	1,6
6,3	-	99,3	98,8	24,9	0,6
5,6	-	98,9	86,0	13,2	0,3
4	-	96,9	21,7	2,5	-
2	100,0	95,4	13,2	0,8	-
1	99,2	85,8	4,3	0,6	-
0,5	79,4	46,3	1,8	-	-
0,25	23,5	10,7	1,3	-	-
0,125	0,5	3,0	-	-	-
0,063	0,0	0,7	-	-	-
D _{máx}	1	2	5,6	10	20
d _{mín}	0,125	0,25	3,35	5,6	11,2
Categoria	G _{F85}	G _{F85}	G _{C85/20}	G _{C85/20}	G _{C90/15}
MF	1,9	3,5	5,7	6,4	7

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado no betão de origem e pasta de origem (PO) foi o CEM I 42,5 R de elevada resistência inicial, fornecido pela empresa SECIL, em Outão. As propriedades físicas e mecânicas e as principais características químicas composicionais do cimento são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Características do cimento Portland

Parâmetro	Norma	Cimento I 42,5R
Massa volúmica (g/cm ³)	LNEC E 64:1979	3,07
Superfície específica de Blaine (cm ² /g)	NP EN 196-6:2010	4437
Resíduo no peneiro 45 µm (%)	NP EN 196-6:2010	6,8
Expansão (mm)	NP EN 196-3:2005	1
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	EN 196-2:2014	19,64+5,34+3,05
CaO+MgO (%)	EN 196-2:2014	62,80+1,80
CaO+MgO livre (%)	NP EN 451-1:2006	0,7+0,9
Tempo de presa (min)	Início	170
	Fim	280
Resistência a compressão da argamassa de referência (MPa)	1 dia	16,6
	2 dias	28,8
	7 dias	43,6
	28 dias	57

3.2.3 Composição, produção e cura do betão de origem

Na Tabela 3.4 apresenta-se a composição da mistura para o betão e pasta de origem. O betão foi formulado por aplicação do método de *Faury*, para uma relação a/c de 0,55, representativa de um betão corrente. O betão foi produzido sem adjuvantes e adições.

Tabela 3.4. Composição da mistura do BO e PO por m³

	Relação a/c	Brita 2 (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Bago de Arroz (kg/m ³)	Areia Grossa (kg/m ³)	Areia Fina (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Água efetiva (L/m ³)
B55	0,55	586	302	195	411	293	360	198
P55	0,55	-	-	-	-	-	1032	569

A fim de avaliar os resultados obtidos da técnica de separação dos constituintes do betão, foram também produzidos provetes de PO com a mesma composição da matriz cimentícia do BO.

A produção do BO foi realizada com auxílio de uma misturadora de eixo vertical. Os agregados finos e os agregados grossos foram introduzidos juntamente com 50% do total da água, misturando-se o conjunto por 2 minutos. Após esse tempo, a mistura foi deixada em repouso antes de se lhe incorporar o cimento e a restante água. O processo completo durou cerca de 7 minutos.

As pastas de cimento foram produzidas num reservatório com 50 L de capacidade recorrendo a um misturador elétrico. A produção consistiu na inclusão de 50% do total da água no recipiente, sendo de seguida introduzido o cimento, misturado por 4 minutos, após o qual foi introduzido progressivamente o resto da água, misturado por mais 4 minutos.

Produziram-se dois tipos de provetes de BO: provetes cúbicos com 150 mm de aresta, para os ensaios de compressão, e provetes em prismas quadrangulares de cerca de 300x150x150 mm para posterior reciclagem (Figura 3.2). Após o desmolde dos provetes, os cubos destinados aos testes de ensaio à compressão foram curados em câmara húmida até à idade de ensaio. Os prismas foram armazenados no exterior do laboratório, tendo sido periodicamente aspergidos com água durante 7 dias.



Figura 3.2. Exemplo de blocos de betão utilizados no estudo e corte transversal de um bloco

Os ensaios de caracterização do betão foram efetuados de forma a avaliar e controlar as propriedades do betão no estado fresco e no estado endurecido. No presente trabalho foram efetuados ensaios de abaixamento (cone de *Abrams*), de massa volúmica do betão no estado fresco e de resistência à compressão aos 28 dias de idade, de acordo com as normas NP EN 12350-2 (2009), NP EN 12350-6 (2009) e NP EN 12390-3 (2011), respetivamente. Na Tabela 3.5 resumem-se os resultados obtidos nestes ensaios, bem como os respetivos coeficientes de variação (CV).

Tabela 3.5. Resultados dos ensaios de abaixamento, massa volúmica fresca e resistência à compressão do betão e pasta de origem

	Abaixamento (mm)	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	C.V. (%)
B55	15	2350	46,2	5
P55	-	1840	41,1	7

De forma a assegurar uma boa hidratação dos blocos de betão, foi garantido um período intercalar de 90 dias após a sua produção, antes de se iniciarem os testes em laboratório. O mesmo foi considerado para os provetes de pasta. Neste estudo deveriam ter sido utilizados provetes ou resíduos de betão existente, com alguns anos de idade, no entanto, pelo facto do presente trabalho ser pioneiro no âmbito da recuperação de cimento reciclado a partir de detritos de betão com métodos inovadores para a indústria da construção, a utilização de amostras de betão produzidas em laboratório é a mais indicada, uma vez que permite um melhor conhecimento/controlo das propriedades dos materiais utilizados. Numa fase mais avançada é recomendado o uso de resíduos de betão dos RC&D a fim de comprovar a veracidade dos métodos propostos.

3.3 Metodologias de ensaio

Foram consideradas diversas técnicas de análise para caracterizar os produtos obtidos nas várias etapas de separação, nomeadamente: análise termogravimétrica (TG), difração de raios X (DRX), ataque ácido e análise visual em câmara digital. Estas técnicas foram indispensáveis para avaliar e retificar as numerosas tentativas efetuadas durante o encadeamento do trabalho laboratorial. Neste capítulo serão descritas as técnicas de caracterização utilizadas na avaliação dos métodos de libertação e separação, como também os ensaios realizados nas pastas endurecidas de cimento reciclado.

3.3.1 Análise termogravimétrica

A técnica de TG permite medir a variação de massa da amostra em função da temperatura e do tempo a que esta é submetida. As variações de massa que ocorrem durante o aquecimento são causadas principalmente pela decomposição, libertação e evaporação dos constituintes da amostra. O equipamento beneficia de uma fonte de calor, uma balança de alta precisão, uma unidade de controlo da temperatura e ainda, de uma unidade de registo, a qual possibilita a monitorização continua da variação da massa. Por outro lado, os tratamentos de resultados fornecem informações adicionais, como a termografia diferencial (DTG), obtida matematicamente através da primeira derivada da variação de massa em função do tempo ou temperatura. Esta, ilustra picos que correspondem a etapas de alteração do sistema no intervalo de temperatura a que ocorre uma transformação notável por perda de massa.

Os ensaios foram realizados num laboratório externo, visto que o departamento de civil não possui este equipamento. A análise termogravimétrica foi efetuada com auxílio do equipamento *SETARAM*, modelo *TGA92*. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/minuto, tendo-se efetuado medições até 1000 °C em atmosfera de azoto. Por sua vez, devido à quantidade numerosa de amostras que foi necessário analisar, e à dificuldade de acesso ao laboratório, considerou-se ainda uma metodologia de ensaio alternativa mais expedita. Neste caso, procedeu-se à medição descontínua da perda de massa em função da temperatura com recurso a uma mufla, cadinhos cerâmicos, um exsiccador e uma balança de alta precisão (até 3 casas decimais) (Figura 3.3).

O material foi inicialmente colocado em estufa a 150 °C durante um período mínimo de 12 horas de forma a eliminar a água livre que poderia estar presente. De seguida, foi deixado a arrefecer durante 30 a 60 minutos num exsiccador até atingir a temperatura ambiente, antes de ser levado à mufla. Todo o material foi pesado antes de ser aquecido. Houve o cuidado de colocar as mesmas quantidades de material nos cadinhos, a fim de reduzir a margem de erro e facilitar a comparação de resultados. O material foi deixado na mufla durante 2 horas a 350 °C, com uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min, perfazendo um total de 2 horas e 35 minutos, incluindo a rampa de aquecimento. Após este tempo, o material foi deixado a arrefecer dentro da mufla até atingir os 200 °C e levado de seguida ao exsiccador, onde permaneceu durante mais 1 hora a fim de arrefecer completamente antes da pesagem.

Após a pesagem, o mesmo material foi colocado de novo na mufla e levado a 550 °C, durante 2 horas. Por fim, repete-se o mesmo processo anteriormente referido para o arrefecimento da amostra. Os diferentes patamares de temperatura foram definidos de modo a quantificar a perda de água livre, a perda de água combinada dos produtos hidratados e a perda de água por desidroxilação do Ca(OH)_2 (Bogas et al., 2019). Este ensaio, daqui em diante irá designar-se por “análise da variação da massa em função da temperatura” (AMT).



Figura 3.3. Mufla, cadinhos cerâmicos e balança utilizados no ensaio de AMT

3.3.2 Difração de raios X

A técnica analítica de DRX é utilizada primariamente para identificar as diferentes fases presentes nos materiais cristalinos. O equipamento é constituído por 3 elementos básicos: uma fonte de raios X, um detetor de raios X e um suporte de amostras. A amostra a ser analisada é moída antecipadamente e de seguida sujeita a um feixe de raio X, pela qual o detetor mede e analisa os ângulos e as intensidades dos feixes difratados pelos planos atômicos. Desse modo, obtém-se um registo (difratograma) que permite identificar as fases cristalinas do material, com base nos picos evidenciados, e a existência eventual de fases amorfas.

Realizaram-se os ensaios de DRX no equipamento *PANalytical X'Pert Pro* (Figura 3.4), com radiação convencional e geometria de *Bragg-Brentano*, instalado no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST. As amostras foram submetidas a uma variação angular de 2θ de 5° a 70°, passo de 0.033° 2θ e tempo equivalente de 75 s, nas seguintes condições experimentais: âmpola de cobre (Cu), tensão de 40 kV e intensidade de corrente de 35 mA.

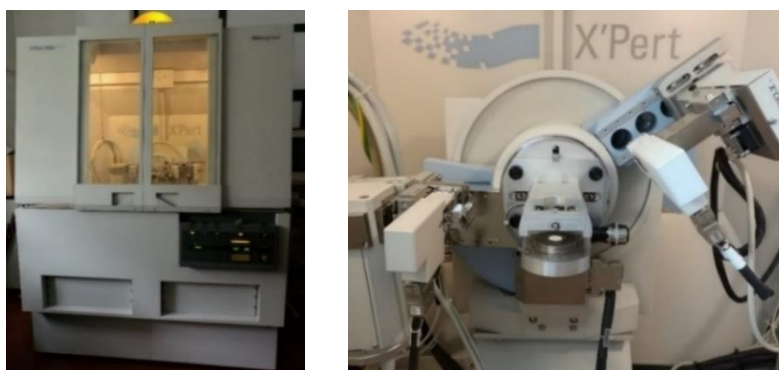


Figura 3.4. Equipamento de DRX utilizado no presente estudo

3.3.3 Ataque ácido

Um dos processos de elevada significância é a quantificação das impurezas da fração cimentícia. Assim, de forma a determinar a percentagem de areia siliciosa presente nas amostras, recorreu-se à técnica de ataque com ácido muriático, que remove os agregados calcários e o cimento hidratado. Este ácido decompõe certos componentes como o silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, assim como o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio, justificando a remoção do cimento e agregados calcários das amostras (Guo et al., 2017).

O ataque ácido consiste na incorporação de uma solução diluída de ácido com água destilada. Começa-se por introduzir 50 ml de água destilada com 1 g de amostra sólida. De seguida são adicionados 3 ml de ácido muriático (concentração $\approx 33\%$), também conhecido como ácido clorídrico, deixando o ácido atuar durante poucos minutos no agitador de amostras com um misturador magnético (Figura 3.5). Na Figura 3.6 é possível observar as diferentes fases do ataque. O ensaio é finalizado após várias decantações e testado com os medidores de pH, devendo a solução final apresentar um pH superior a 6. A avaliação baseia-se na medição da massa inicial e da massa final, pelo que é imprescindível a secagem do material inicial e final em estufa. Este ensaio foi efetuado tendo por base o procedimento adotado por De Juan et al. (2009) e Damas (2017).



Figura 3.5. Ensaio de ataque ácido

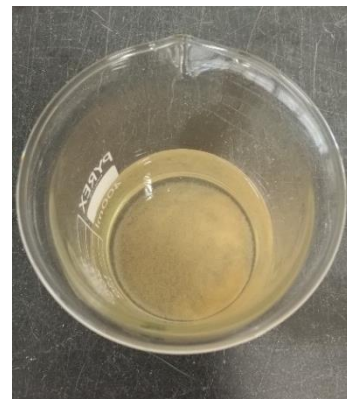


Figura 3.6. Início (esquerda) e fim (direita) do ensaio de ataque ácido

3.3.4 Análise visual em câmara digital

Com o propósito de analisar os produtos resultantes dos vários métodos, as partículas de betão obtidos nos vários processos de libertação e separação foram sujeitas a análise visual, recorrendo a uma câmara digital, modelo AM7915 MZt de Dino Lite, Figura 3.7.

Na Figura 3.8 apresenta-se um exemplo de imagem obtida pelo equipamento de uma amostra com granulometria entre 125-250 μm . A análise visual das amostras é possível principalmente devido às diferentes características físicas dos constituintes do betão, onde a fração cimentícia apresenta uma tonalidade acinzentada e os agregados uma tonalidade creme/amarelada. No material cominuído, as partículas de cimento apresentam usualmente arestas menos definidas enquanto que os agregados

calcários apresentam um formato mais anguloso/afiado. Em algumas amostras, foi previamente aspergido álcool etílico com o objetivo de facilitar a observação. As partículas de cimento, quando húmidas, exibem um cinzento mais expressivo.

Este equipamento possibilita a análise apropriada de partículas até uma dimensão mínima de aproximadamente 100 µm. Para frações inferiores, a análise torna-se mais difícil e imprecisa, por impedir uma observação clara dos diferentes elementos. Por outro lado, nesta fração os silicatos de cálcio do cimento apresentam tonalidade esbranquiçada que se confunde com a dos restantes agregados.

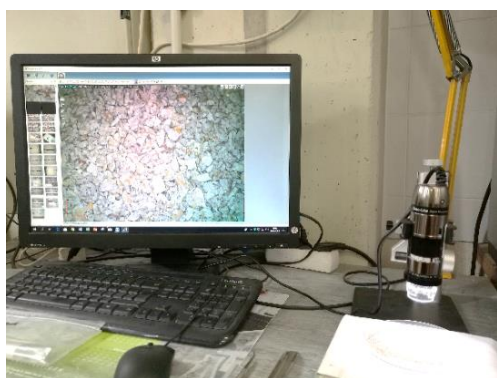


Figura 3.7. Análise microscópica com recurso a uma câmara digital



Figura 3.8. Exemplo de imagem observada pela câmara digital

3.3.5 Caracterização das pastas no estado endurecido

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e flexão em provetes de pasta produzidos com os cimentos reciclados obtidos através dos vários métodos de separação, bem como com os cimentos reciclados de referência a partir da PO.

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados de acordo com a norma EN 1015-11, no equipamento de *Seidner Form+Test D-7950 Riendlingen*, modelo *505/200/10 DM1*, da Figura 3.9.

Basicamente, os provetes são posicionados sobre dois apoios cilíndricos afastados um do outro de 100±0,5 mm, onde um terceiro cilindro, localizado no topo do provete e equidistante dos cilindros de apoio, exerce gradualmente uma força até à rotura do mesmo. Os provetes utilizados têm dimensões de 160x40x40 mm. A tensão de rotura à flexão é calculada segundo a expressão 3.1.

$$f_{ct} = 1,5 \times \frac{F_{ct} \times l}{b \times d^2} \quad (3.1)$$

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].

Posteriormente ao ensaio de flexão, cada uma das metades provenientes do mesmo foi utilizada para a caracterização da resistência à compressão, de acordo com a norma EN 1015-11. Nos casos em que a quantidade de material não permitiu a produção de provetes prismáticos com as características mencionadas, foram produzidos provetes cúbicos de 40x40x40 mm para os ensaios de compressão.

O ensaio de compressão realizou-se no mesmo equipamento que o ensaio de resistência à flexão, onde foi aplicada uma carga até à rotura do provete numa área de 40x40 mm (Figura 3.9). Realizaram-se no mínimo 2 ensaios para os provetes com 3, 7 e 28 dias de idades. Para os casos em que não foi possível produzir provetes suficientes, por ausência de material, a resistência à compressão foi analisada apenas aos 3 e 28 dias de idade. As tensões de rotura à compressão dos espécimes são calculadas segundo a expressão 3.2.

$$f_c = \frac{F_c}{A} = 0,000625 \times F_c \quad (3.2)$$

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 3.9. Ensaio de resistência à flexão (esquerda) e ensaio de resistência à compressão (direita)

3.3.6 Outras técnicas

O processo de crivagem foi uma das técnicas mais utilizadas ao longo do trabalho, devido à constante necessidade de avaliação do material britado/moído. O processo de crivagem foi realizado a seco (Figura 3.10) ou a húmido (Figura 3.11). A crivagem a húmido tem por objetivo remover os ultrafinos gerados pelos processos de libertação mecânica. Este procedimento verifica-se imprescindível para o método de separação magnético.

De modo a garantir análises representativas, as amostras de ensaio foram sempre obtidas com recurso a divisor de amostras (Figura 3.12). Este é constituído por uma estrutura metálica com várias reentrâncias isoladas e direcionadas alternadamente entre si, e dois recipientes onde é captado depois o material dividido.



Figura 3.10. Crivagem seca



Figura 3.11. Crivagem húmida



Figura 3.12. Divisor de amostras

3.4 Métodos de Libertação

Conforme referido no Capítulo 2, existem vários métodos de libertação sugeridos na literatura, no caso do betão, essencialmente aplicados à obtenção de agregados reciclados de melhor qualidade. Neste subcapítulo, é feita a descrição da primeira fase dos dois processos adotados para a libertação do agregado da matriz cimentícia (de modo a simplificar a leitura, deste ponto em diante a matriz cimentícia individualizada da mistura inicial de betão será designada de cimento, caso não seja dito o contrário), nomeadamente por libertação mecânica e térmica.

Recentemente, têm sido realizados vários estudos com vista à produção de cimentos reciclados mais ecoeficientes (Shui et al., 2008; Shui et al., 2009; Xinwei et al., 2010; Serpell e Lopez, 2013; Wang et al., 2018; Bogas et al., 2019). Estes estudos evidenciam a possibilidade de produção de cimento reciclado a partir da reutilização de resíduos de betão, atingindo-se resistências semelhantes das obtidas em outros ligantes hidráulicos, porém associadas a menos emissões de CO₂ resultante do processamento a menores temperaturas (Serpell e Lopez, 2013; Bogas et al., 2019; He et al., 2019). Todavia, conforme abordado no Capítulo 2, este processo ainda tem que ser aperfeiçoado face à libertação dos diferentes componentes para a obtenção de cimento purificado.

A distinção presente neste trabalho, da libertação face à separação, foi feita com o propósito de diferenciar as distintas fases do processo, que são cruciais para a obtenção do cimento. A libertação é utilizada para descrever o processo de fragmentação do betão, que leva ao destacamento do cimento hidratado aderente nos agregados. Já a separação enfatiza o processo subsequente onde se divide a mistura de betão em cimento e agregado. Uma separação bem efetuada compreende-se pela obtenção de uma parcela de cimento com uma baixa percentagem de agregados, intrínseca a uma boa libertação, pois para tal o cimento tem que estar isolado dos agregados.

Os dois métodos de libertação propostos neste trabalho foram selecionados por motivos económicos, ecológicos e ainda pela sua facilidade de execução. Por exemplo, a técnica de elevadas descargas elétricas (Capítulo 2), está associada a um grande consumo energético, sendo inviável a sua utilização. Em relação à técnica de micro-ondas, embora atrativa, não foi possível a sua análise, por falta de equipamento apropriado. Para mais, esta técnica apresenta um consumo de energia elevado e leva à alteração parcial das características físicas dos constituintes (Akbarnezhad et al., 2011)

3.4.1 Processo mecânico

Diversos procedimentos mecânicos foram implementados com recurso a diferentes equipamentos, a fim de avaliar a sua eficiência na libertação e determinar a quantidade gerada em cada fração granulométrica. Estes ensaios foram efetuados no laboratório de construção (LC) e Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST (GEOLAB) do IST. Em seguida resumem-se os processos considerados:

- BMC – Uma passagem na britadeira de maxila do LC (Figura 3.13), com uma abertura de saída aproximadamente entre 2 cm.
- BMM – Uma passagem na britadeira de maxila do GEOLAB (Figura 3.14), com uma abertura de saída aproximadamente de 1 cm.
- R – Uma passagem no moinho de rolos (Figura 3.15), com uma abertura inferior a 1 cm e alimentação rápida (GEOLAB).
- R_L – Uma passagem no moinho de rolos, com a mesma abertura, mas com uma velocidade de alimentação inferior que R.
- MBC – Moagem com esferas de aço no equipamento de Los Angeles (LA), assumindo 20 esferas (cada esfera tem cerca de 4,6 mm de diâmetro e 400 g de massa) por cada 5 kg de resíduo de betão (Figura 3.16), em ciclos de 30 minutos (LC).
- MAC – Moagem autogénea no equipamento de LA (Figura 3.16), em ciclos de 30 minutos.
- C – Crivagem no peneiro de 1 mm (Figura 3.17)



Figura 3.13. Britadeira de maxila do LC



Figura 3.14. Britadeira de maxila do GEOLAB



Figura 3.15. Moinho de rolos do GEOLAB



Figura 3.16. Equipamento de Los Angeles do LC



Figura 3.17. Crivagem no peneiro de 1 mm

Na primeira etapa da libertação, utilizou-se sempre a britadeira de maxila da Figura 3.13 para reduzir os blocos de betão a dimensões inferiores a cerca de 30 mm. Este passo simula convenientemente um dos processos de britagem efetuados durante a triagem dos RC&D. O material obtido após a primeira redução de tamanho (Figura 3.18) foi depois sujeito a outras etapas mecânicas sucessivas, com o objetivo de reduzir as frações mais grosseiras e conseguir um material mais fino. Consequentemente, foram testados diversos métodos com base em combinações dos procedimentos referidos acima, dando origem à primeira fase de testes, obtendo as seguintes combinações finais: BMC+2R, BMC+2BMM+2R, BMC+2MAC e BMC+MBC (Figura 3.19).



Figura 3.18. Betão britado proveniente da britadeira de maxila do LC

Por análise visual, e conforme será demonstrado mais adiante, constata-se que a libertação do cimento tende a ocorrer nas frações até 1 mm. Desse modo, os processos de libertação mecânica foram pensados para a obtenção de material inferiores a esta dimensão. Por outro lado, verifica-se que inferior a 125 μm , torna-se difícil aplicar os métodos de separação considerados no presente trabalho. Desse modo, o método de libertação mecânica visa a produção do máximo de material fino que tenham uma boa libertação, evitando o desperdício do cimento, quer por moagem excessiva ou deficiente.

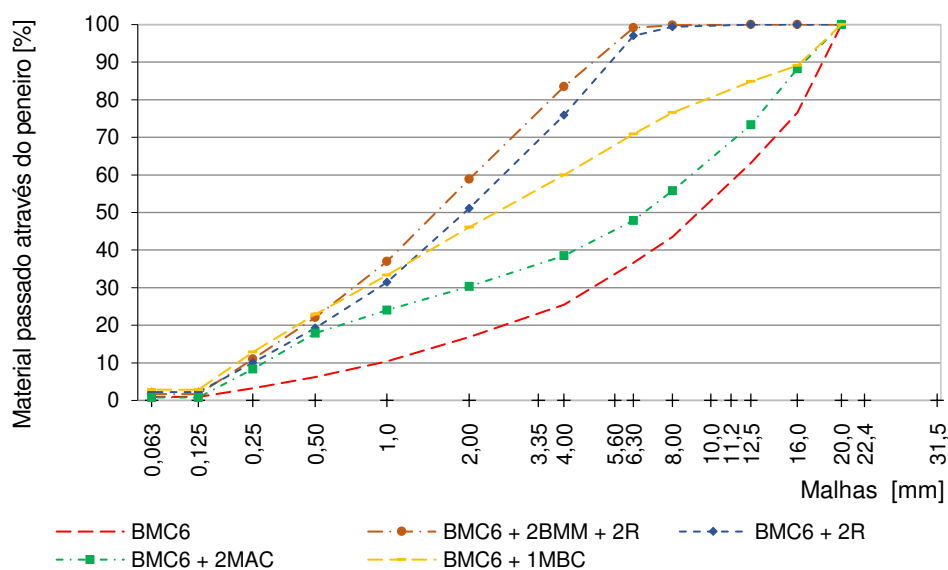


Figura 3.19. Curvas granulométricas das principais combinações da 1ª fase

De forma a avaliar a evolução da granulometria na sequência dos vários processos, efetuou-se uma análise granulométrica segundo a norma NP EN 933-1 (2014), entre cada procedimento adicional. Em destaque, quantificou-se principalmente a evolução de partículas finas, inferiores a 1 mm e superiores a 125 µm, entre cada método mecânico. Obtiveram-se então as curvas da análise granulométrica das seguintes combinações: BMC+R, BMC+2R, BMC+BMM, BMC+BMM+R, BMC+2BMM, BMC+2BMM+1R, BMC+2BMM+2R, BMC+MAC, BMC+2MAC, BMC+MBC, como se pode observar na Figura 3.20. O número 2 antes de uma dada técnica significa que esta foi repetida (o material foi sujeito a duas passagens).

É visível pelas curvas da Figura 3.20, a diminuição sucessiva da dimensão do material, tendo como exemplo o desenvolvimento da combinação BMC+2BMM+2R, com o início em BMC, onde se observa uma translação da curva granulométrica da direita para a esquerda. Curiosamente, observou-se a sobreposição das curvas granulométricas dos métodos BMC+R e BMC+BMM+R, indiciando que a etapa BMM pode ser dispensada.

Através da Figura 3.19 e da Tabela 3.6 é possível concluir que as combinações de BMC+2R e BMC+2BMM+2R produzem em geral um material com menor diâmetro máximo, face ao BMC+BMM+R, BMC+2MAC e BMC+MBC.

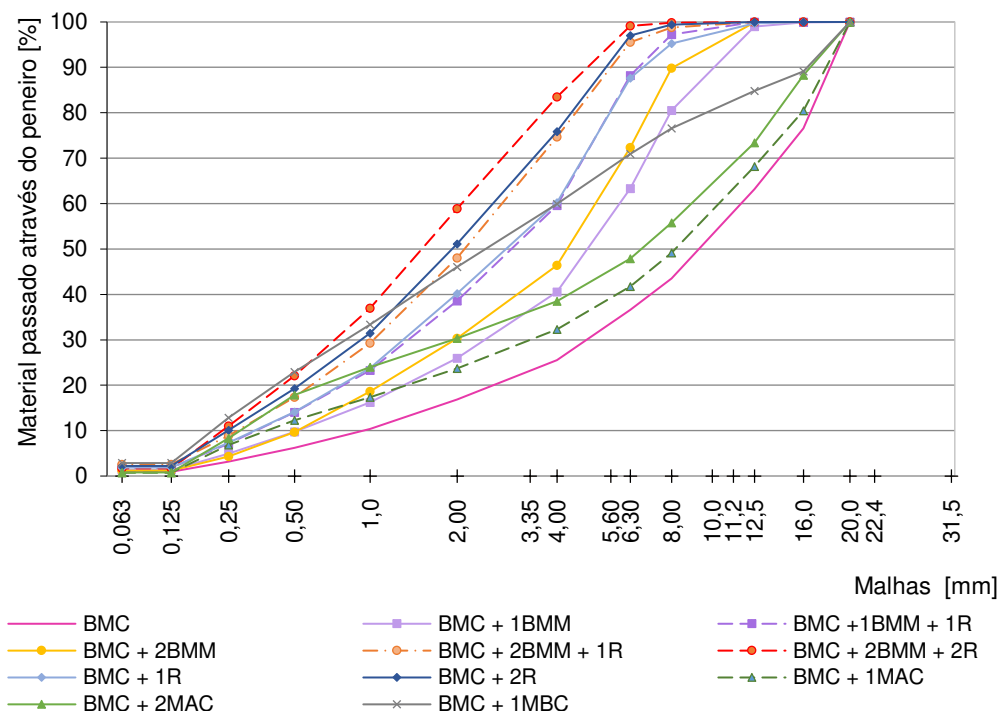


Figura 3.20. Curvas granulométricas de todas as combinações da 1ª fase

Pelos resultados tabelados, o método de BMC+2MAC não demonstra ser muito eficaz na redução da dimensão. Ainda, como se pode observar pela Tabela 3.7, o material obtido não aparenta estar razoavelmente liberto. Este apresenta um formato mais arredondado do que as restantes combinações, devido à ação abrasiva da moagem autogénea.

Tabela 3.6. Análise granulométrica das principais combinações da 1ª fase













Abertura do peneiro (mm)	Material passado através do peneiro (%)				
	BMC	BMC+2R	BMC+2BMM+2R	BMC+2MAC	BMC+MBC
20	100	100	100	100	100
16	76,6	100,0	100,0	88,3	89,1
12,5	63,2	100,0	100,0	73,4	84,9
8	43,5	99,4	99,8	55,8	76,6
6,3	36,6	97,0	99,2	47,9	70,9
4	25,5	75,9	83,5	38,5	59,9
2	16,9	51,1	58,9	30,3	46,1
1	10,4	31,5	37,0	24,0	33,3
0,5	6,2	19,2	22,1	17,9	22,9
0,25	3,2	10,1	11,0	8,3	12,8
0,125	0,9	2,2	1,7	1,2	2,9

A ação do movimento circular do equipamento de LA teve o mesmo efeito abrasivo no material obtido pelo MBC, apesar da incorporação das bolas de aço. O formato arredondado das partículas pode induzir a uma interpretação visual errada devido à possibilidade da não distinção entre partículas de cimento e partículas de agregado, uma vez que a abrasão confere um efeito polido às partículas. Para mais, a distinção é dificultada nos casos em que a matriz cimentícia se concentra à volta dos agregados, tornando impercetível a natureza dessas partículas. Por outro lado, como abordado no Capítulo 2, os métodos de moagem são particularmente pouco atrativos, na medida em que exigem maior quantidade de energia e são processos descontínuos e demorados.

Através do método de BMC+MBC, obteve-se um total de 33% de material inferior a 1 mm, provando-se eficiente na diminuição das frações comparativamente com os outros. Contudo, pela análise visual do material, concluiu-se que a percentagem de cimento aderente aos agregados é significativa nas frações 250-1000 µm. Além disso, o impacto exercido pelas bolas de aço propiciou a produção de grande quantidade de ultrafinos, levando à perda de uma porção de cimento difícil de recuperar nos métodos de separação.

Das várias combinações testadas, BMC+2R e BMC+2BMM+2R parecem proporcionar uma melhor libertação relativamente aos restantes processos (Tabela 3.7), conseguindo ainda uma parcela elevada de finos (denomina-se como finos a fração inferior a 1 mm). O efeito de esmagamento exercido nos fragmentos de betão originou materiais mais angulosos, em oposição aos métodos de MBC e MAC. Este efeito, aparenta ser mais eficaz na libertação dos componentes, devido à pressão exercida na zona de transição entre o cimento e o agregado, originando microfissuras. Todavia, similarmente aos outros métodos, na fração de 500-1000 µm verifica-se uma elevada percentagem de material não liberto.

Tabela 3.7. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação mecânica da 1ª fase.

Método de libertação	Fração granulométrica (mm)		
	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1
BMC+ 2BMM+2R			
BMC+2R			
BMC+2MAC			
BMC+MBC			

Com base na análise visual, é possível confirmar que a liberação é tanto melhor quanto menor for a fração granulométrica. Verifica-se ainda que, no mesmo intervalo granulométrico, as partículas de cimento tendem a apresentar um tamanho menor do que as partículas de agregado, podendo estar relacionado com sua maior suscetibilidade à fragmentação. Os diferentes tipos de partículas resultantes dos métodos de liberação estão apresentados esquematicamente na Figura 3.21.

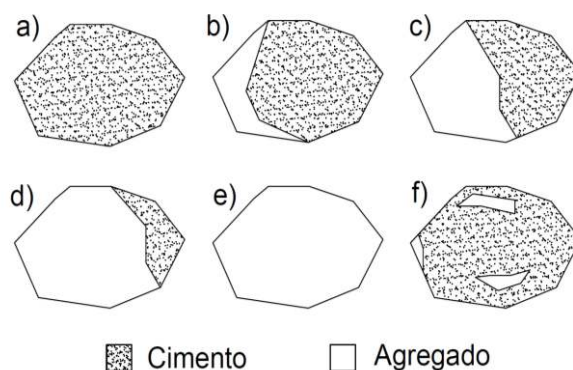


Figura 3.21. Tipos de partículas resultantes dos métodos de liberação: a) >90% cimento; b) 60-90% cimento; c) 40-60% cimento; d) 10-40% cimento; e) <10% cimento; f) agregado revestido com cimento (< 20% de cimento).

Desta forma, após a primeira fase de testes, optou-se por recorrer a combinações de britadeira de maxilas e moinho de rolos. Com os equipamentos definidos, novas combinações foram implementadas, com início na britadeira de maxilas do LC, seguido de passagem na britadeira de maxilas e no moinho de rolos do GEOLAB. Assim, após uma passagem na britadeira do LC e na britadeira do GEOLAB, o material foi conduzido para o moinho de rolos, procedendo-se às seguintes sequências: BMC+BMM+4R (BMC+BMM+C+2R+C+2R+C), BMC+BMM+6R (BMC+BMM+C+2R+C+2R+C+2R+C), BMC+BMM+10R (BMC+BMM+C+2R+C+2R+C+2R+C+2R+C+2R+C) e BMC+BMM+2R_L (BMC+BMM+C+R_L+C+ R_L).

Como referido, uma passagem no moinho de rolos (R) reproduz o mesmo efeito que uma passagem na britadeira de maxilas e uma passagem no moinho de rolos do GEOLAB (BMM+R). Porém, prosseguiu-se com a introdução da passagem BMM após BMC nas combinações com o intuito de reduzir novamente a dimensão do material antes do moinho de rolos, preservando o equipamento de eventuais danos.

Na segunda fase das combinações de liberação, introduziu-se uma crivagem entre cada duas passagens no moinho de rolos, a fim de recolher os finos produzidos e evitar a moagem excessiva do cimento. O material proveniente do moinho é crivado num peneiro de forma a separar o material inferior a 1 mm dos restantes detritos. A parcela retida no peneiro de 1 mm é posteriormente moída novamente no moinho de rolos. Finalmente, a fração inferior a 1 mm é crivada nos peneiros de 500 µm, 250 µm e 125 µm.

As passagens adicionais no moinho de rolos (4R, 6R e 10R) foram realizadas para atestar se a eficiência do método é incrementada com as sucessivas passagens.

Como seria de esperar, o incremento de passagens no rolo reduz a quantidade de material acima de 1 mm, que se considera como desperdício, visto que não se encontra liberto e não pode ser depois sujeito aos processos de separação. Na Tabela 3.8 apresenta-se a distribuição em percentagem do material retido em cada peneiro do material inferior a 1 mm. Por análise da tabela, constata-se que a distribuição granulométrica não é significativamente alternada com o incremento de passagens.

Tabela 3.8. Rendimento de finos resultantes das combinações da 2ª fase

Abertura do peneiro (mm)	Material retido (%)			
	BMC+BMM+4R	BMC+BMM+6R	BMC+BMM+10R	BMC+BMM+2RL
0,5	40,7	44,0	46,5	39,0
0,25	29,0	30,5	29,8	30,5
0,125	21,6	16,9	16,6	20,6
<0,125	8,6	8,5	7,1	9,8

Verifica-se que a redução da velocidade de alimentação no rolo (R_L) conduz a um processo mais eficiente, em termos de tempo e material obtido, do que a velocidade rápida (R). De facto, como constatado na Figura 3.22, a combinação BMC+BMM+2RL resulta numa maior redução do tamanho das partículas, estando associada a um desperdício inferior dos 7% (partículas ≥ 1 mm). Salienta-se ainda que, caso seja adotada uma passagem adicional ($3R_L$), o material obtido inferior a 1 mm atinge os 98% da massa total, ou seja, reduz o desperdício de material superior a 1 mm, de 7% para 2%, majorando a quantia aproveitada do material total sujeito aos processos mecânicos. Por outro lado, a quantidade de finos inferior a 125 μm é ligeiramente maior. O processo tem como vantagem, a obtenção de menor quantidade de material entre 500-1000 μm , que se verifica ser a fração menos adequada para os métodos de separação (Capítulo 4), e de quantidades satisfatórias de material entre 125-500 μm , tendo em conta a celeridade do processo e o baixo desperdício.

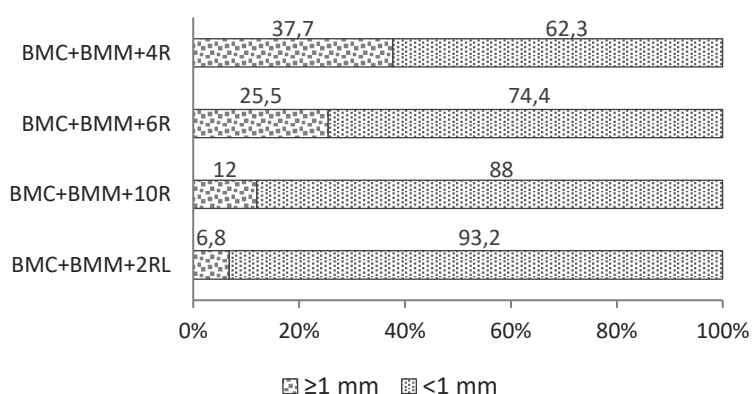














Figura 3.22. Rendimentos da porção fina e grossa face à totalidade do material

O grau de libertação de cada método foi determinado da mesma forma que na primeira fase, através da separação das partículas nas frações granulométricas seguida de pela análise visual (Tabela 3.9). Em geral, constata-se uma maior libertação na fração inferior a 500 μm , independentemente do método de libertação utilizado.

Tabela 3.9. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação mecânica da 2ª fase.

Método de libertação	Fração granulométrica (mm)		
	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1
BMC+C+ BMM+4R			
BMC+C+ BMM+6R			
BMC+C+ BMM+10R			
BMC+C+ BMM+2RL			

3.4.2 Processo térmico

Pelo facto de o processo térmico ser um método menos destrutivo, espera-se conseguir individualizar os agregados grossos e finos, para além da fração cimentícia, desse modo, será também possível recuperar o agregado. No método de libertação térmico, os detritos de betão são submetidos a diversas temperaturas de aquecimento de forma a avaliar o seu efeito na libertação do cimento e do agregado.

O material antes de ser submetido ao aquecimento é previamente britado para dimensões inferiores a 30 mm de modo a otimizar o efeito térmico sobre as partículas. Durante o aquecimento, é expectável que por ação das tensões diferenciais térmicas dos diversos constituintes, se tenham formado fissuras no cimento e na zona de transição agregado-argamassa (2.4.2). Finalmente, após o arrefecimento do material, este é submetido a uma ação mecânica para remover o cimento aderente nos agregados (ver Capítulo 2).

Foram testadas 3 temperaturas diferentes:

- BMC+C+F300+MAC – uma passagem na britadeira de maxila (BMC), seguido de crivagem no peneiro de 1 mm (C). O material com dimensão superior a 1 mm foi aquecido no forno a uma temperatura de 300 °C (F300), durante cerca de 3 horas em forno rotativo (Figura 3.23), com uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min, seguido de arrefecimento dentro do forno até à temperatura ambiente. Depois o material foi sujeito a moagem autogénea no equipamento de Los Angeles (MAC) durante 30 minutos.
- BMC+C+F400+MAC – o mesmo procedimento de BMC+C+F300+MAC, mas a uma temperatura de 400 °C.
- BMC+C+F500+MAC – o mesmo procedimento de BMC+C+F300+MAC, mas a uma temperatura de 500 °C.



Figura 3.23. Forno rotativo do LC

O material antes de aquecido foi crivado de forma a remover a parcela inferior a 1 mm, que pode ser conduzida diretamente para os métodos de separação. Após a moagem autogénea, este foi crivado novamente, em diferentes granulometrias: <125 µm; 125-250 µm; 250-500 µm; 500-1000 µm; 1-12 mm e superior a 12 mm. O material obtido entre 125 µm e 1 mm foi sujeito a separação.

Na Tabela 3.10 e na Figura 3.24 apresentam-se as distribuições granulométricas e as curvas granulométricas das partículas provenientes dos métodos térmicos, respetivamente. Como se pode observar, as curvas granulométricas dos 3 métodos a diferentes temperaturas não apresentam grande diferença na fração inferior a 4 mm.

De modo geral, todos os processos térmicos foram efetivos na redução da dimensão das partículas comparativamente com o BMC. É notável, para a fração inferior a 4 mm, a diminuição do tamanho das partículas sob o efeito da temperatura. A combinação BMC+C+F500+MAC mostra a maior eficiência na redução de partículas superiores a 4 mm, sem produção excessiva de material inferior a 125 µm.

Tabela 3.10. Análise granulométrica dos vários métodos de libertação térmica

Abertura do peneiro (mm)	Material passado através do peneiro (%)		
	BMC+C+F300+MAC	BMC+C+F400+MAC	BMC+C+F500+MAC
20	100	100	100
16	82,6	77,6	94,8
12,5	73,2	70,3	85,6
8	58,2	58,2	69,5
6,3	52,2	52,8	60,9
4	42,6	44,1	47,4
2	32,4	35,3	36,1
1	24,4	27,5	28,1
0,5	18,0	20,2	20,6
0,25	12,1	13,4	13,0
0,125	5,8	5,9	2,3

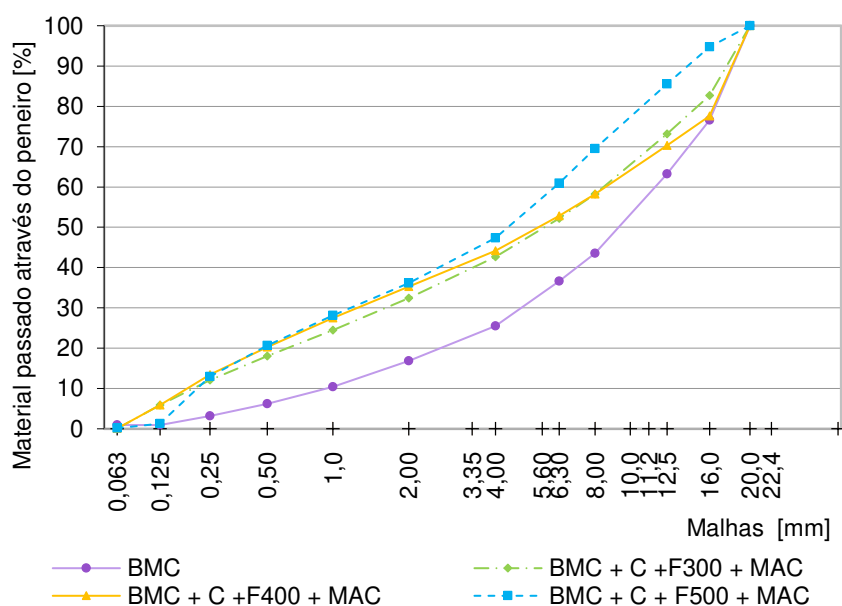











Figura 3.24. Curvas granulométricas dos métodos de libertação térmica

Na Tabela 3.11 apresenta-se o aspeto geral das várias frações provenientes dos métodos térmicos. É visível a alteração física dos agregados após o aquecimento, principalmente nos que foram submetidos a 400 e 500 °C. Este resultado está de acordo com US7258737B2 (2007), que reporta uma alteração mais significativa do agregado para temperaturas superiores a cerca de 400 °C.

O material obtido contém uma grande quantidade de agregados individualizados, principalmente de natureza siliciosa. Todas as partículas apresentam um formato mais arredondado devido à ação mecânica da moagem autogénea. Em geral, houve uma boa libertação do cimento face ao agregado. Analogamente ao processo mecânico, verifica-se uma melhor libertação nas frações inferiores.

Tabela 3.11. Análise visual do material resultante dos métodos de libertação térmica

Método de libertação	Fração granulométrica (mm)		
	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1
BMC + C + F300 + MAC			
BMC + C + F400 + MAC			
BMC + C + F500 + MAC			

Uma vez sujeita à ação térmica, a areia siliciosa adquiriu uma tonalidade mais rosada/alaranjada enquanto que o agregado calcário apresentou uma cor cinza escuro. Pela Figura 3.25 consegue-se observar que o material submetido a um aquecimento de 300 °C apresentou uma mistura de agregados calcários com diversas tonalidades de creme e cinzento, e agregados siliciosos em tons amarelados. Esta diferença de cores variou gradualmente com o aumento da temperatura. Na amostra submetida a 500 °C, quase todo o agregado calcário apresentou uma cor cinza escuro e os agregados siliciosos uma cor rosada. Para esta temperatura, torna-se mais difícil distinguir o agregado calcário do cimento.



Figura 3.25. Amostras do material proveniente do tratamento térmico a 300, 400 e 500 °C, da esquerda para a direita, respetivamente.

A metodologia dos 400 °C aparenta ser a mais indicada na libertação do cimento do agregado, pois produz mais finos que os 300 °C, não altera significativamente as características físicas do material, requer menos tempo de processamento e consome menos energia face aos materiais tratados a 500°C.

Nas amostras que foram submetidos a 400 °C, é possível observar que existe uma fração intermédia (superior a 2 mm e inferior a 8 mm) que apresenta uma grande quantidade de agregados que estão isentos de cimento, demonstrando que o tratamento térmico e a moagem autógena foram eficientes na limpeza destas partículas mais grosseiras. Após classificação manual, verificou-se que 80% da amostra com dimensões entre 2-6 mm e 70% entre 6-8 mm, apresentava percentagem de cimento inferior a 1% (Figura 3.26). O material obtido pode assim ser reaproveitado como agregado reciclado. A fração com dimensão superior a 8 mm não exibiu o mesmo nível de purificação do agregado das frações inferiores. Neste caso, a percentagem de agregado não limpo foi de 40% da amostra total. Sugere-se então uma etapa adicional para reduzir as dimensões das partículas e limpar esta parcela significativa, que não foi considerada no âmbito do presente trabalho.



Figura 3.26. Material proveniente do tratamento a 400 °C: frações entre 2-4, 4-6,3 e 6,3-8 mm com superfície limpa, respetivamente.

Este método, embora permita a recuperação de agregados grossos e finos reciclados de betão, como a fração cimentícia, que irá permitir a produção de betões totalmente reciclados, apresenta a desvantagem de requerer um passo de tratamento térmico e moagem, que virá acrescentar aos custos de exploração e o tempo de processamento do material final.

4 Métodos de Separação

Como referido, o presente trabalho tem como objetivo principal a separação do cimento hidratado a partir de resíduos de betão. Tal como abordado no Capítulo 2, atualmente não existe uma metodologia efetiva para a separação dos constituintes do betão.

Uma das principais dificuldades identificadas na produção de cimentos reciclados reside na individualização da matriz cimentícia dos restantes constituintes do betão (Wang et al., 2018; Bogas et al., 2019). Os métodos propostos estão longe de serem viáveis devido a várias lacunas presentes nos procedimentos relatados, desde a remoção de detritos distintos de betão presentes no RC&D, até à separação propriamente dita do material cimentício, isto é, à divisão física dos diferentes constituintes do betão. Desse modo, no presente capítulo foram experimentadas metodologias inovadoras com vista a esse fim.

Os métodos considerados no presente estudo estão divididos em duas categorias: separação magnética e separação gravítica. Na separação magnética será introduzido o método do rolo magnético e na separação gravítica o método da Mesa *Wiffley* e o método da Mesa *Mozley*. A implementação destes métodos foi inspirada nas técnicas desenvolvidas pela indústria mineira na separação de minérios. O foco deste trabalho será o método de separação através do rolo magnético, por ser o mais limpo do ponto de vista ambiental, exigir menos recursos (menores custos energéticos e de manutenção) e ainda, não contaminar o produto final, entre os vários métodos propostos. Os métodos gravíticos também foram considerados, na medida em que são igualmente metodologias de baixo impacto económico e ambiental.

Todos os materiais obtidos (<1 mm) através das diversas técnicas de libertação mecânica da segunda fase foram reunidos para a separação, a fim de majorar a quantidade de material preparado (cominuído e crivado) pronto a ser testado, exceto o material inferior a 125 µm, cuja separação pelas metodologias referidas é inviável. Contudo, tendo em conta o que foi exposto no Capítulo 3, os métodos de separação adotados no presente ponto têm por base a aplicação do material resultante do método de libertação BMC+BMM+2R_L, por este apresentar o menor desperdício de material superior a 1 mm e inferior a 125 µm.

Os materiais obtidos através dos diferentes métodos de separação são armazenados de forma cuidadosa, antes da etapa de termoativação, com o intuito de evitar ou atrasar o processo de carbonatação, que tende a reduzir a reatividade do produto final (Neto 2019). Anteriormente à termoativação, o cimento é moído num moinho de bolas até atingir uma dimensão máxima de 250 µm, de forma a otimizar a sua capacidade aglutinante.

De modo a facilitar a interpretação, optou-se por adotar as seguintes nomenclaturas ao longo do texto para os diferentes métodos e as respetivas granulometrias: Rolo Magnético (RM), Mesa *Wiffley* (MW), Mesa *Mozley* (MM), material magnético (MAG), material não magnético (NMAG), fração entre 125 e 250 µm (125-250), fração entre 250 e 500 µm (250-500) e fração entre 500 e 1000 µm (500-1000).

4.1 Rolo magnético permanente

Neste subcapítulo será introduzido o método de separação magnético com recurso a um equipamento que tem na sua constituição um rolo magnético permanente, constituído por um íman de terras raras.

4.1.1 Descrição do procedimento

O presente método tira partido da característica paramagnética da matriz cimentícia que a distingue dos outros constituintes do betão (4.1.1.2). Este método inovador não só consegue alcançar um elevado grau de eficiência na separação do cimento, como também é uma técnica limpa, com baixo impacto ambiental e reduzidos custos de aplicação e exploração.

Devido às características deste método magnético, a presença de elementos ultrafinos na superfície das partículas, provenientes dos processos mecânicos prévios da britagem e moagem, afeta diretamente a eficiência da separação, pelo que foi efetuado uma etapa de crivagem húmida seguida de secagem a 90 °C, antes de submeter o material à separação por rolo magnético.

A separação do material foi realizada no laboratório nacional de energia e geologia (LNEG), do Porto, com recurso ao equipamento da Figura 4.1. Este tem incorporado um cilindro de 76 mm de diâmetro, de cerca de 1 T de intensidade de campo na sua superfície, um tapete transportador com 1,5 mm de espessura e 100 mm de largura, que se move a uma velocidade aproximadamente de 40 m/s, e um divisor que representa um intervalo de 1 a 7, sendo que “1” e “7” correspondem à abertura (designada por “a”) mais estreita e larga, respetivamente (Figura 4.2).

O material, após ser limpo e seco, é colocado no alimentador (Figura 4.4). Posteriormente, é conduzido pelo tabuleiro vibratório até chegar ao tapete transportador, que por sua vez, roda uniformemente sobre dois cilindros rotativos, sendo o cilindro da extremidade, magnético. O dispositivo está equipado com um divisor na extremidade de saída a fim de controlar a pureza do material (Figura 4.2). Uma vez que os detritos de betão são compostos principalmente por material não magnético, iniciou-se a primeira passagem com uma maior abertura do divisor e maior velocidade no sistema de alimentação, a fim de excluir a maior parte do agregado, que não interessa para a produção de cimento reciclado.



Figura 4.1. Equipamento de rolo magnético utilizado no presente trabalho do LNEG (Porto)

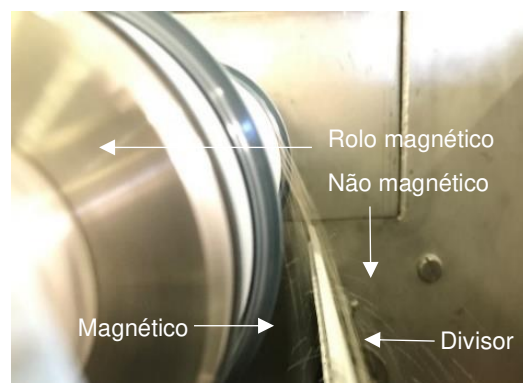


Figura 4.2. Trajetória de partículas magnéticas e não magnéticas separadas pelo divisor

Por ação da força magnética, aquando do funcionamento do rolo magnético, as partículas cimentícias sofrem uma deflexão da sua trajetória original. Ainda, a fração não magnética, segue o percurso natural, pela força centrífuga. Assim, a diferença de trajetórias torna possível a separação dos materiais (Figura 4.2). Após a primeira passagem, o material inicial sofre uma redução drástica em massa, de pelo menos 60% de material não magnético. O material purificado, ou seja, o material retido considerado como parcela magnética, volta a passar pelo equipamento, mas com uma menor abertura e velocidade de alimentação, visando a obtenção de um material magnético mais purificado. A esta fração, realizou-se ainda uma última passagem (3ª passagem). Os materiais provenientes desta última iteração, consecutivamente mais puros, serviram para avaliar a eficiência das várias passagens pelo equipamento. Note-se que foi necessário adotar diferentes aberturas no divisor e velocidades no sistema de doseamento em função da fração granulométrica (Tabela A.I.2).

Na Figura 4.3 é visível o fluxograma dos processos de libertação e da separação magnética dos constituintes do betão (M1).

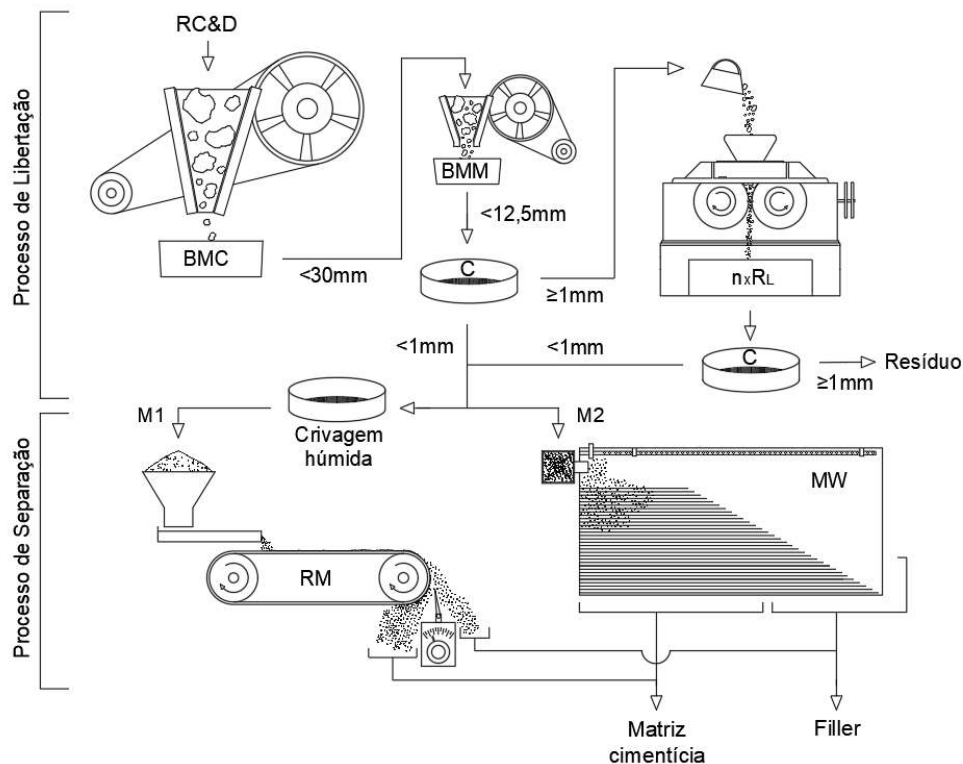


Figura 4.3. Fluxograma do processo de libertação e separação (M1- método magnético; M2- método gravítico)

4.1.2 Fundamentação do procedimento

O procedimento demonstrado no presente capítulo tem por base a separação do cimento hidratado a partir de ímãs de alta intensidade, aproveitando as diferentes características magnéticas dos constituintes do betão. Essa separação só é viável devido à existência de pequenas percentagens de óxidos de ferro na composição do cimento endurecido.

Todos os materiais são suscetíveis a forças magnéticas quando expostos a um campo magnético. No entanto, alguns materiais manifestam um comportamento diamagnético, reagindo de forma pouco significativa ao campo magnético. Os materiais presentes no betão podem então ser agrupados em dois principais grupos, consoante a sua propriedade magnética:

- Diamagnético: Este tipo de material possui os eletrões agrupados aos pares com spins antiparalelos, conduzindo a momentos magnéticos resultantes nulos ou quase nulos. Estes materiais exibem uma suscetibilidade magnética negativa, sendo fracamente repelidos no sentido onde a intensidade do campo é menor (Durão et al., 2002).
- Paramagnético: as estruturas eletrónicas dos átomos deste género de materiais possuem spins não emparelhados com spins antiparalelos. A suscetibilidade magnética positiva resulta do efeito de alinhamento dos dipolos magnéticos, sendo fracamente atraídos na direção onde o campo magnético tem maior intensidade (Durão et al., 2002).

Os principais constituintes do betão, agregado (mais especificamente quartzo, feldspato e calcite), são materiais diamagnéticos. Na literatura, referem-se valores de suscetibilidade magnética de $-5,8 \times 10^{-9}$ e $-4,8 \times 10^{-9}$ m³/kg para o quartzo e calcite (Dearing, 1999), respetivamente. Quanto ao cimento, a suscetibilidade positiva é justificada pela presença do Fe₂O₃ na parcela do ferro-aluminato tetracálcico (C₄AF) no estado anidro, que permanece no cimento endurecido. Gopalakrishnam et al. (2012) reportam valores de $11,4 \times 10^{-7}$ m³/kg para a suscetibilidade mássica de cimento Portland anidro, afirmando as suas características paramagnéticas.

A força magnética que atua nos materiais paramagnéticos ou diamagnéticos é diretamente proporcional ao produto da intensidade pelo gradiente do campo magnético, e atendendo ao facto de esta ser diretamente proporcional ao volume ou massa da amostra, conclui-se que a força magnética é equivalente ao produto de suscetibilidade volúmica/específica, intensidade e gradiente do campo magnético aplicado (Durão et al., 2002). Deste modo, devido à fraca suscetibilidade magnética da matriz cimentícia, somente separadores de alta intensidade e de elevado gradiente são pertinentes para o efeito. Os exemplos mais comuns são separadores de rolos induzidos, de rolos permanentes, supercondutores, entre outros.

No presente estudo, aplicou-se a separação magnética por via seca com rolos permanentes, fabricados a partir de ímanes de terras raras. Comparativamente a outros tipos de separação magnética, esta apresenta reduzido custo de instalação e de operacionalidade. Tem também a vantagem de não exigir consumo de energia e sistemas de refrigeração durante a sua utilização. É importante mencionar que os rolos apresentam alta coercividade, isto é, mantêm a sua propriedade magnética estável durante a sua vida útil (Wills e Munn, 2006). Consequentemente, estes rolos não possibilitam a alteração da intensidade do campo e estão constantemente funcionais. A alteração da indução magnética pode apenas ser conseguida através da variação da distância do material à zona de separação.

Os ímanes de Neodímio-ferro-boro (NdFeB), ou ímanes de terras raras, fabricados a partir da combinação de elementos raros, nomeadamente o neodímio, ferro e boro, possuem características superiores às tradicionais, apresentando as melhores propriedades magnéticas. Estes ímanes, apesar

de possuírem melhores características, apresentam uma temperatura de *Curie* inferior face a outros tipos de ímanes, isto é, temperatura à qual o material exposto perde as suas propriedades magnéticas. Reportam-se perdas de magnetização de 6,5% aos 100 °C e 65% aos 200 °C. Por outro lado, o NdFeB tende a ser vulnerável a ambientes corrosivos, necessitando de proteção através de revestimento superficial.

Os rolos magnéticos são correntemente construídos através de alternância de laminação magnética e não magnética, sendo geralmente utilizados discos de aço para intervalar os discos de ímanes. Esta disposição permite a formação de um campo magnético não uniforme que tem como objetivo incrementar o gradiente do campo. Como resultado, aumenta a força de magnetização das partículas, permitindo separações mais eficientes (Wills e Munn, 2006). A disposição dos polos é otimizada de modo a que se gerem padrões de polaridade alternada. Contrariamente aos separadores eletromagnéticos, onde a alteração da intensidade do campo magnético pode ser facilmente conseguida através da variação da corrente elétrica, nos casos de ímanes permanentes, esta é facultada pela configuração dos discos de íman e aço, mais exatamente pela sua espessura (Wills e Munn, 2006).

Apresenta-se na Figura 4.4 uma configuração simplificada do equipamento utilizado para a separação magnética dos constituintes do betão. A eficiência de separação deste equipamento pode ser incrementada com o aumento do diâmetro do rolo, pois estende o tempo de permanência das partículas no campo magnético do mesmo. A intensidade do campo é influenciada pela distância à superfície do rolo, pelo que é sugerido o uso de tapetes transportadores com pequenas espessuras.

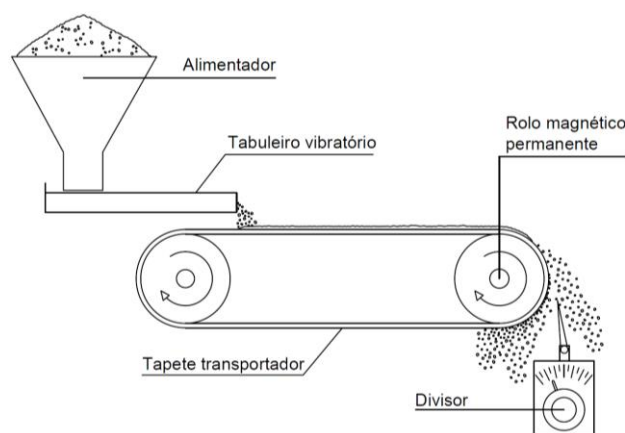


Figura 4.4. Imagem ilustrativa do equipamento de separação magnética utilizada no estudo

Na separação por rolos permanentes, por efeito das dimensões e forma das partículas, a efetividade do método pode ser comprometida, pelo que o material introduzido deve apresentar uma granulometria reduzida e um intervalo granulométrico limitado. Desta forma, o material deve ser previamente crivado nas diferentes frações granulométricas pretendidas. O presente método é inadequado para partículas muito delgadas, inferiores a cerca de 125 μm , visto que estas são facilmente influenciadas por efeitos de corrente de ar, aderência interpartículas e aderência das partículas ao tapete transportador (Wills e Finch, 2016). Adicionalmente, a presença de humidade nas partículas pode prejudicar a efetividade da

separação. Por esse motivo, o material antes de ser sujeito à separação magnética deve estar bem seco. A forma de alimentação é também um dos fatores influenciadores para uma boa separação, sendo importante a disposição em monocamada do material no rotor para que todas as partículas sejam igualmente afetadas pela força magnética induzida pelo rolo. Assim, um sistema otimizado de alimentação vibratória e com abertura ajustável é imprescindível.

Todavia, algumas das dificuldades referidas para o presente método (por via seca) como a libertação de pó e as limitações de granulometria, são superadas pela via húmida, através de um separador magnético de tambor (Svoboda, 2004). Por outro lado, o processo a húmido pode ter ainda a vantagem de evitar a eventual carbonatação do material moído, que tende a diminuir a reatividade do produto final (cimento reciclado).

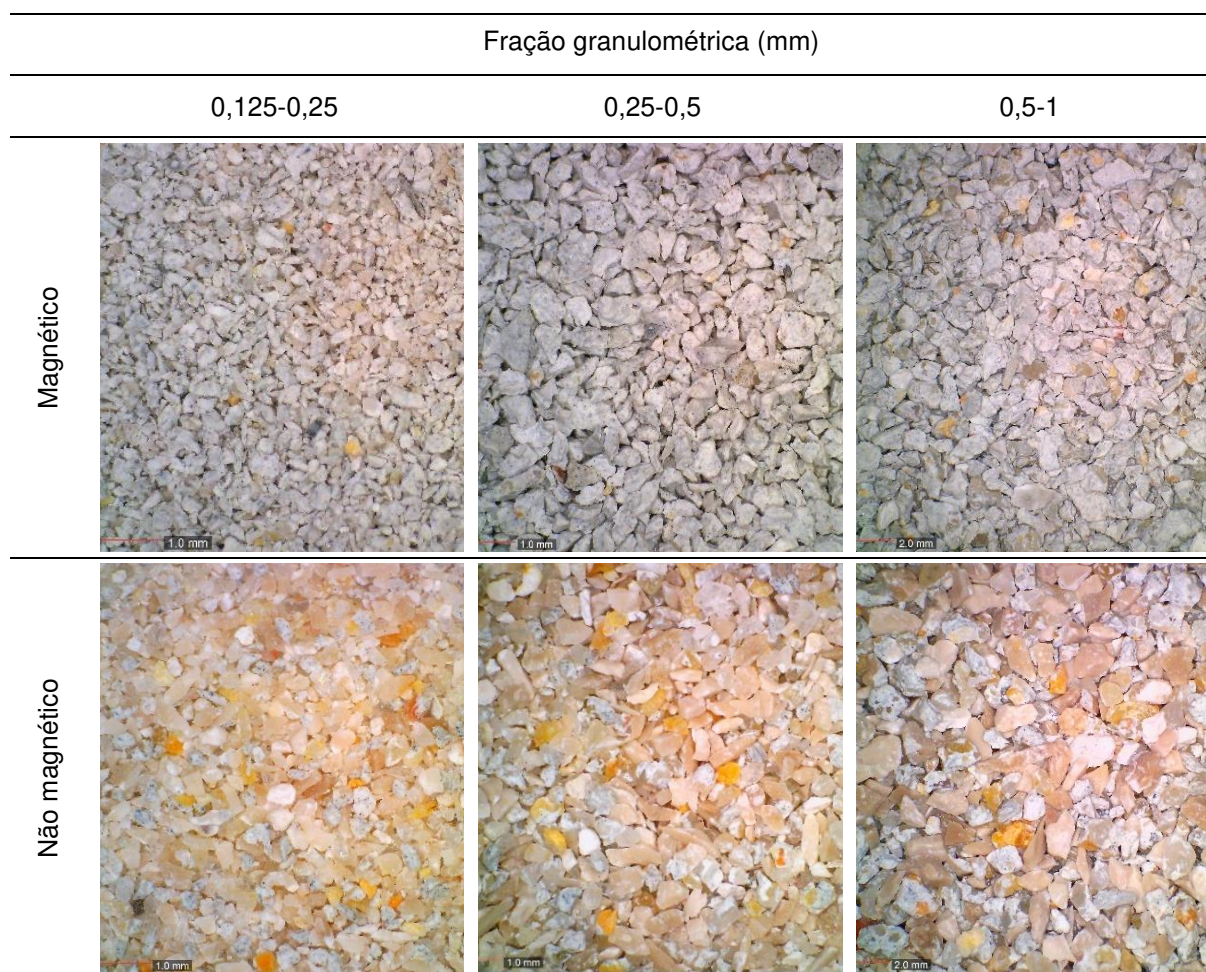
4.1.3 Demonstração de resultados

Os rendimentos de separação para um rolo de 76 mm de diâmetro e uma passadeira de 1,5 mm de espessura e 100 mm de largura foram aproximadamente (massa de material de entrada (kg) por unidade de tempo (h) e por metro de largura do tabuleiro de alimentação): fração 125-250 μm – 16 kg/(h.m); 250-500 μm – 24 kg/(h.m); 500–1000 μm – 32 kg/(h.m). Estes valores foram obtidos para uma velocidade do tapete transportador de aproximadamente 40 m/s.

Por análise das imagens da Tabela 4.1 dos produtos obtidos através do processo de separação magnético, confirma-se a efetividade do método na individualização da fração cimentícia. No entanto, na fração 125-250 μm , observa-se uma presença significativa de partículas de agregado liberto, o que confirma que o presente método é menos adequado para esta fração. Conforme se verá posteriormente, para dimensões superiores a 150 μm , a eficiência do método é aumentada. A força atuante nas partículas de cimento é incrementada com a diminuição do volume das mesmas, pelo que a reduzida dimensão do material, apesar de favorável à separação magnética devido ao acréscimo da força magnética exercida sobre as partículas, pode ser adversa, ao interferir indiretamente na trajetória normal das partículas de agregado. Visto que nas frações granulométricas mais reduzidas, a disposição em monocamada é dificilmente atingida, aquando a separação, as partículas de cimento que estejam à superfície, sob a influência da força do rolo magnético tendem a empurrar as partículas vizinhas (indiferentemente de se tratar de cimento ou agregado) na sua direção. Em paralelo, a fração de 500-1000 μm também aparenta conter uma grande percentagem de agregado, que contrariamente à fração de 125-250 μm , está presente devido à fraca libertação das partículas. Visualmente, a fração mais limpa, obtida através do método magnético é a de 250-500 μm onde, apesar de ainda existirem agregados, a quantidade é mais reduzida.

Por outro lado, as misturas não magnéticas das granulometrias separadas demonstram um reduzido teor de cimento. Em geral, considera-se que a separação é viável tanto para individualizar a matriz cimentícia como na limpeza das partículas de agregado. Acresce que, pelo facto de o material não magnético demonstrar níveis satisfatórios de pureza, este pode ser reutilizado como *filler* para novos betões seguindo o princípio da reciclagem de todos os constituintes dos detritos de betão.

Tabela 4.1. Análise visual do material resultante do método do rolo magnético - material magnético composto por matriz cimentícia e material não magnético composto por agregados de natureza siliciosa e calcária



4.1.3.1 TG/AMT

Recorreu-se à técnica de TG descrita no Capítulo 3.3.1 para quantificar a percentagem de cimento das amostras separadas. Na Figura 4.6 apresentam-se as curvas referentes às TG e DTG dos dois tipos de cimento analisados, cimento reciclado resultante de pastas puras (CR/REF) e cimento reciclado resultante de detritos de betão pelo método magnético (CR/Bet).

Pelas análises de TG e DTG são notáveis 3 pontos distintos onde existe uma mudança dos trajetos das curvas. O primeiro vértice das curvas de DTG constatado abaixo de 200 °C está especialmente relacionado com a perda de água livre, decomposição do gesso e etringite, e parcialmente à perda de água absorvida pelos compostos hidratados, nomeadamente silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O segundo vértice, entre 440 e 500 °C, está relacionado com a decomposição do hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água. A partir deste ponto, existe uma perda progressiva da água quimicamente combinada do C-S-H. Finalmente, atinge-se o terceiro e último pico, entre 700 e 800 °C, aquando a decomposição do C-S-H e a descarbonatação da calcite (CaCO_3), cuja parte poderá ter resultado da carbonatação do material durante o seu manuseamento e armazenamento

Em estudos conduzidos por Scrivener et al. (2016), conseguiram-se dados conclusivos de como a carbonatação devido à exposição do material ao ar influencia o seu comportamento em termos de TG e DTG. Os autores mencionam que existe um decréscimo do primeiro pico, associado ao gesso, etringite e C-S-H, como também uma redução da quantidade de portlandite, compensado pelo aumento da quantidade de carbonatos. A diferença pode ser observada na Figura 4.5, onde pela curva de TG, verifica-se que a curva contínua, representando o material mais carbonatado, exibe um trecho mais reduzido entre os 450 e 550 °C, enquanto que entre 650 e 750 °C a curva apresenta um maior declive, indicador de uma redução da quantidade de portlandite e aumento de calcite, respetivamente.

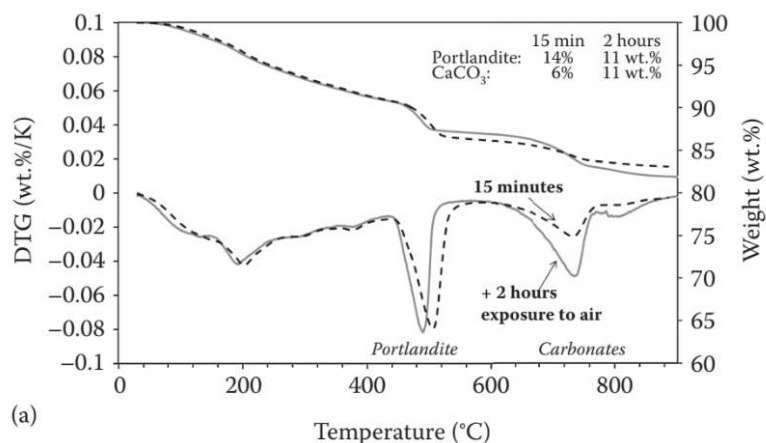


Figura 4.5. Influência da carbonatação no ensaio de TG (Scrivener et al., 2016)

Deste modo, pelo facto de a carbonatação influenciar substancialmente a análise correta das curvas de TG, apenas se teve em consideração a variação de massa devido à perda de água combinada entre os 130 e 400 °C, visto que esta não é influenciada pela carbonatação.

Assim, tendo em conta a perda de massa nestes patamares (Figura 4.6), estima-se que o CR/Bet na fração entre 250 e 500 μm seja composto por cerca de 76%, em massa, de matriz cimentícia, sendo o restante material agregado que não foi liberto ou separado. Esta estimativa tem por base o facto de a perda de massa ser essencialmente resultante da desidratação do cimento. Por sua vez, segundo o ensaio simplificado de AMT, referido no ponto 3.3.1, estima-se um valor de 79% de matriz cimentícia para o mesmo material e intervalo de temperatura. As semelhanças dos valores alcançados demonstram a validade do ensaio de AMT. Com o fim de validar melhor o método AMT, foram ainda testadas misturas de referência com diferentes percentagens de pasta e areia. Na Tabela A.I.1 e Tabela A.I.2 apresentam-se as diferentes percentagens de cimento obtidas para diferentes intervalos de temperatura de todas as amostras remetidas ao processo magnético, assim como as misturas de referência. De acordo com o apresentado em anexo, os valores obtidos entre 150-350 °C são os que representam melhor a realidade. Tal justifica-se pelo facto de as amostras poderem estar associadas a diferentes níveis de carbonatação e, portanto, apresentarem valores não comparáveis de perda de massa acima de 400 °C. Em relação às misturas de referência, o erro entre os valores obtidos e os valores reais foi somente de 8%. Note-se que devido à particularidade do ensaio e às características

do material ensaiado, mais concretamente ao nível de carbonatação do material cimentício, quanto maior for a percentagem de cimento, maior tende a ser o erro entre o valor experimental e o valor real. Confirma-se ainda que a perda de massa entre 150 °C e 350 °C resulta essencialmente da pasta cimentícia, com os agregados a apresentarem uma perda pouco significativa (Tabela A.I.1).

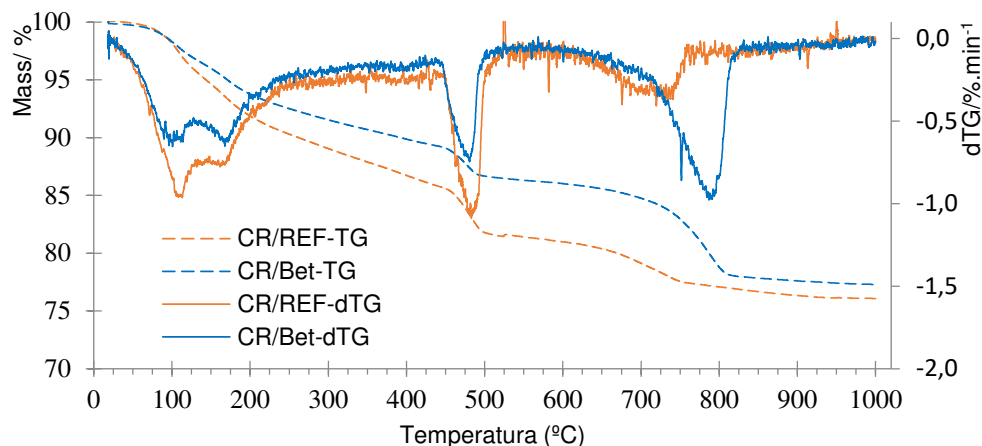


Figura 4.6. Análise termogravimétrica (TG e DTG) do CR/REF e do CR/Bet – fração 250-500 μm .

Segundo os valores do mesmo anexo, obtidos através da AMT, constatou-se que nas frações 250-500 μm a separação permitiu passar de misturas iniciais com cerca de 20-30% de cimento para soluções finais com cerca de 75-80% de cimento. A percentagem de cimento aumentou notavelmente nas duas primeiras passagens tendo-se estagnado na terceira passagem, não justificando a sua realização. Nas misturas com 500-1000 μm o rendimento foi inferior face às frações de 250-500 μm , passando de misturas iniciais com cerca de 15-20% para soluções finais com aproximadamente 50-60% de cimento, uma vez que não ocorreu a libertação desejada, sendo justificável pela variabilidade dos resultados obtidos em todas as passagens (Figura 4.8).

A fração de 125-250 μm foi a que apresentou maior percentagem de cimento na mistura inicial (cerca de 30-40%). Pela separação, conseguiu-se um material purificado com apenas 55-60% de cimento, tida como uma tentativa fracassada, tendo em conta que a fração seria a que estaria mais liberta por análise visual. Em contrapartida, quando se restringiu esta fração em parcelas mais restritas: 125-150 μm ; 150-212 μm ; 212-250 μm , notou-se que a percentagem de cimento na mistura inicial aumenta com o decréscimo da dimensão das partículas, ao invés da percentagem de cimento do material separado que evolui com o aumento do tamanho. Este fenómeno pode ser observado na Tabela 4.2, onde a fração entre 125-150 μm é a que apresenta maior presença de agregados e a fração de 212-250 μm o intervalo menos contaminado. Esta tendência é quantitativamente confirmada no ensaio de AMT, onde se obteve aproximadamente 40% de cimento para a fração entre 125-150 μm , 73% entre os 150-212 μm e 77% entre os 212-250 μm (Figura 4.7). Assim, o presente método de separação magnético não é adequado para separar partículas inferior a 150 μm . Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a separação por esta metodologia deve ser preferencialmente efetuada na fração 150-500 μm .

Na Figura 4.7 é possível observar a proporção da matriz cimentícia e agregados existentes nos produtos separados da Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Parcela magnética das frações 125-150 μm , 150-212 μm e 212-250 μm

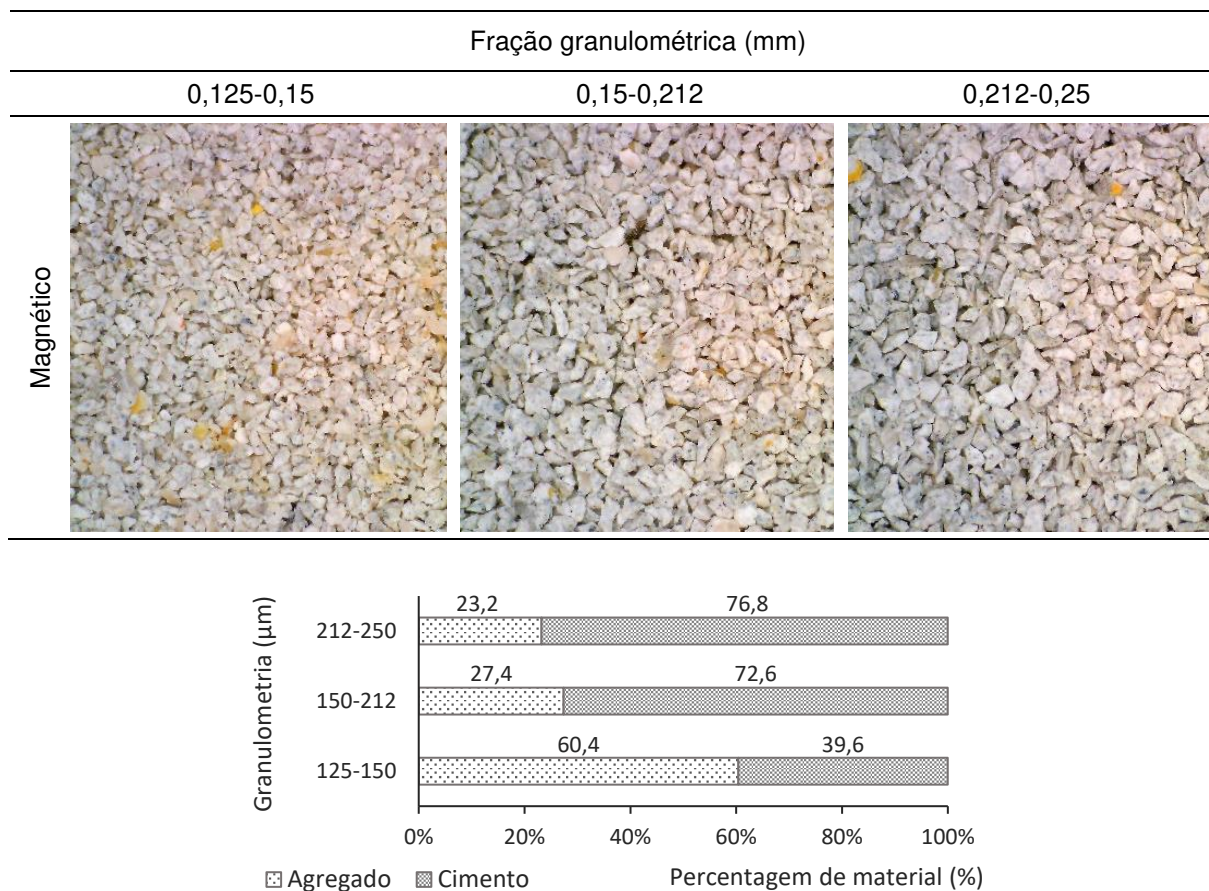


Figura 4.7. Percentagem de material existente nos produtos, após a separação magnética (Agregados de natureza calcária e silicosa e matriz cimentícia)

Na Figura 4.8 estão apresentados os rendimentos dos produtos obtidos através do método de separação magnético e as respectivas percentagens de cimento presentes nos produtos. Constatase que, comparativamente com a percentagem de cimento existente na mistura inicial de cada intervalo de fração, o rendimento presente não foi satisfatório tendo em conta as parcelas mais magnéticas da separação (MAG2 e MAG3): aproximadamente 24; 16,5 e 5,4% para as frações de 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , respetivamente. Salienta-se para as mesmas frações da mistura inicial, pelo ensaio de AMT (Tabela A.I.2), que estas apresentam cerca de 32,5; 25,1 e 12,1% de cimento, respetivamente.

Pela Figura 4.8, para a fração granulométrica entre 125-500 μm , é visível o aumento da percentagem de cimento com o número de passagens, indicativo que as passagens adicionais foram efetivas. Na fração mais grosseira, a inconstância das percentagens de cimento no material é representativa da má libertação do material. Mediante o exposto na mesma figura, o rendimento do método de separação pode ser naturalmente incrementado com recurso a equipamentos industriais, com maiores dimensões/extensões, uma vez que o aumento do comprimento dos elementos leva à maximização da

superfície de contacto do material com o rolo e conseqüentemente ao aumento da quantidade de material passado por hora. A efetividade do método pode ser aumentada com a aplicação de rolos magnético de maior diâmetro e maior intensidade. Denota-se ainda que a repassagem do material magnético proveniente da primeira passagem (MAG1), por apresentar uma quantia significativa de cimento, poderá beneficiar o incremento no rendimento da separação.

Verifica-se que a obtenção de misturas mais grosseira conduz a rendimentos muito mais baixos, o que torna a metodologia menos eficiente. Na realidade, este resultado não traduz uma fraca viabilidade do método de separação, mas sim um maior problema relacionado com a efetiva libertação das partículas. De facto, ao existir mais das partículas c), f) e d) da Figura 3.21, a separação vai conduzir a uma perda significativa de cimento para as frações ditas não magnéticas.

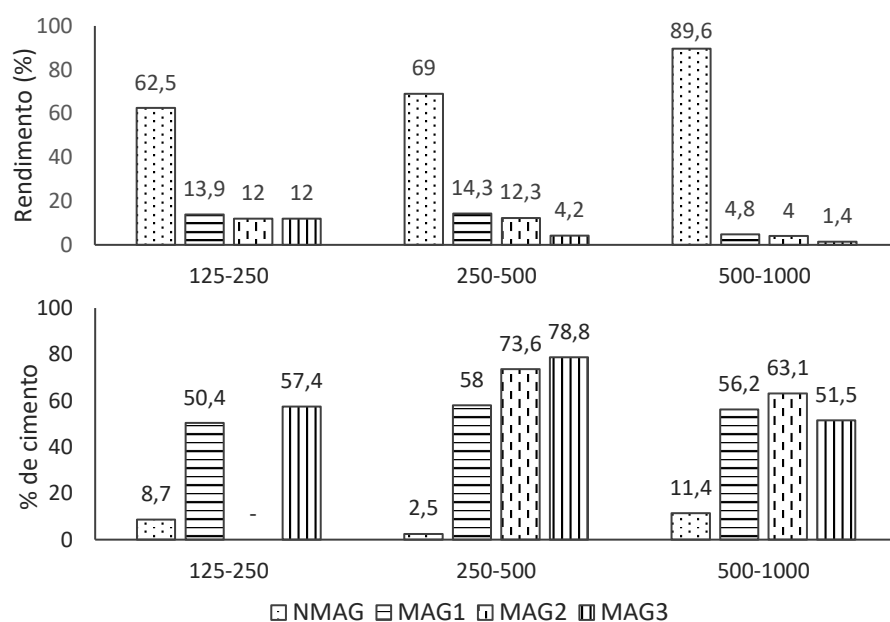


Figura 4.8. Rendimentos do método de separação do rolo magnético (cima) e as respetivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (NMAG-não magnético; MAG1-magnético 1ªpassagem; MAG2-magnético 2ªpassagem; MAG3-magnético 3ªpassagem)

Num aspecto mais global, para o intervalo granulométrico menos contaminado (250-500 µm), os materiais provenientes da segunda e terceira passagem representam aproximadamente 5% da massa do betão de origem, por outras palavras, da fração conseguiu-se recuperar cerca de 28% do cimento presente inicialmente no BO. Para as frações mais contaminadas, 125-250 µm e 500-1000 µm, apesar das percentagens de cimento serem inferiores, o rendimento foi de 5 e 2%, respectivamente. Tendo em conta que o betão de origem apresenta cerca de 18% de matriz cimentícia na sua constituição, considera-se que o rendimento final de material magnético obtido (rondando os 12% da massa do BO) é satisfatório dado que parte do cimento foi perdida para a parcela não magnética e para a fração inferior a 125 µm (é omitida a fração ≥ 1 mm por esta representar uma percentagem insignificante). Os processos de libertação e a restrição dos intervalos granulométricos deverão ser aperfeiçoados de forma a obter um produto menos contaminado, para um rendimento semelhante, nas frações de 125-250 µm e 500-1000 µm pelo presente método. Na Figura 4.9 encontra-se uma análise sumarizada dos rendimentos obtidos dos processos de libertação e da separação referente ao presente método.

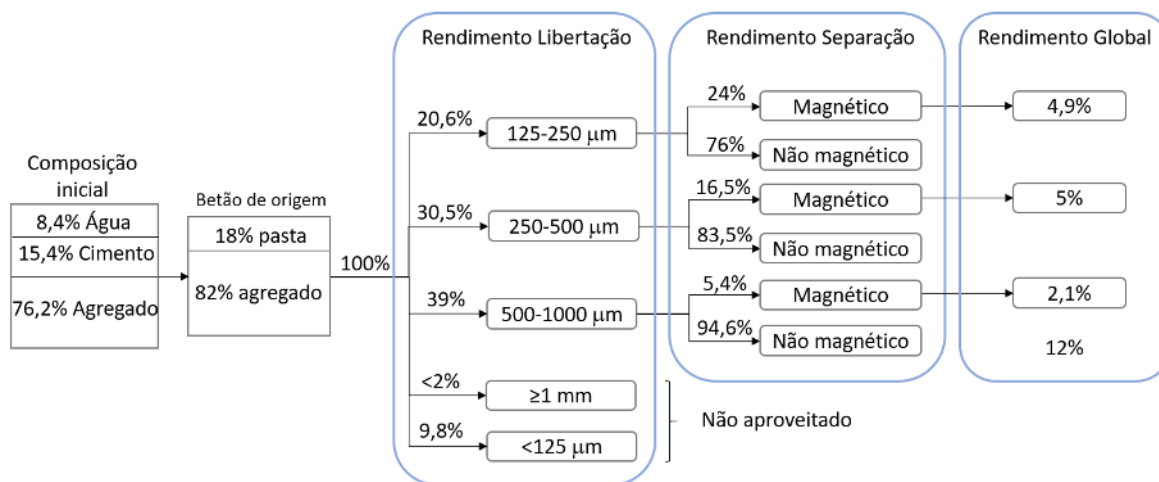


Figura 4.9. Distribuição de rendimentos (em massa) dos processos de libertação e separação do método do rolo magnético

Em relação ao resíduo não magnético, verificou-se que a percentagem de cimento nestas frações é em geral inferior a 9, 3 e 12%, para as frações 125-250 µm, 250-500 µm e 500-1000 µm. Obteve-se assim um produto bastante descontaminado, cuja percentagem de cimento aumenta nas frações mais grossas, corroborando o facto destas se apresentarem menos libertas. Em relação ao material entre 500 µm e 1 mm, pode justificar-se uma moagem adicional que não foi considerada no presente trabalho.

Relativamente à fração inferior a 125 µm, como supramencionado, não é possível ser purificada por separação magnética. Em alternativa, esta pode ser utilizada como adição mineral de menor reatividade (*filler*). Os resultados obtidos pela AMT indicam uma grande percentagem de cimento para o método BMC+BMM+10R, cerca de 40%, e 18% para o método BMC+BMM+2R_L. Estes valores demonstram que a excessiva moagem dos detritos de betão poderá levar à criação de finos dificilmente recuperáveis pelo presente método, causando uma perda significativa de cimento. Isso demonstra a maior adequabilidade da metodologia 2R_L.

Esta fração que não consegue ser reaproveitada, diz respeito a cerca de 5-10% da massa do betão (consoante a combinação dos métodos de britagem e moagem adotados). Admitindo que este material pode apresentar cerca de 20% de cimento na sua constituição (18% para R_L), segundo o ensaio de AMT, e sabendo que cerca de 18% do BO corresponde à matriz cimentícia, o teor de cimento nesta fração pode corresponder a aproximadamente 6-11% (em massa) do cimento inicial no betão, podendo representar uma parcela significativa de cimento desperdiçado. Esta perda pode ser reduzida ao adotar uma separação magnética por via húmida, que abrange partículas de dimensão superior a cerca de 75 µm, diminuindo o teor de material não sujeito a purificação (Svoboda, 2004).

4.1.3.2 DRX e ataque ácido

Conforme abordado no Capítulo 3.3.2, realizaram-se ensaios de DRX com a finalidade de identificar as diferentes fases do cimento reciclado e comprovar a efetividade do método de separação, apesar deste ser somente uma análise qualitativa.

No cimento hidratado, as fases cristalinas com maior relevância são sobretudo a portlandite, etringite e calcite. De facto, após a hidratação do cimento, a portlandite e a etringite são as fases cristalinas mais comumente identificadas por DRX. Como é possível observar na Figura 4.10, o DRX da pasta de referência (CR/REF), apresenta somente as três fases cristalinas mencionadas. No caso dos produtos de CSH, a sua estrutura de natureza essencialmente amorfa torna-os dificilmente identificáveis pelo equipamento. Desta forma, os picos de baixa intensidade das fases amorfas existentes nas amostras são usualmente imperceptíveis na totalidade da curva de intensidades.

Em contrapartida, nas amostras de betão ou de cimento reciclado provenientes de detritos de betão, a elevada cristalinidade dos minerais presentes nos agregados, nomeadamente o quartzo e a calcite, vai salientar os picos destas fases face aos dos restantes componentes de mais baixa cristalinidade. Este efeito é demonstrado na Figura A.II.2 por meio de análises DRX de amostras de referência simuladas com diferentes percentagens de pasta hidratada e areia fina. O DRX da amostra de referência com 75% de pasta e 25% de areia salienta este aspeto. É visível que, apesar do produto possuir um elevado teor de cimento, a presença das fases cristalinas da pasta é ínfima comparativamente ao pico observado correspondente ao quartzo. Mediante isto, a presença de picos mais ou menos acentuados será meramente qualitativa na caracterização dos materiais submetidos ao ensaio, embora a intensidade dos vértices das diversas fases possa ser interpretada de forma semi-quantitativa. Neste contexto, apenas foi tido em conta a identificação das fases presentes e uma suposição incerta das proporções dos componentes existentes nas amostras analisadas.

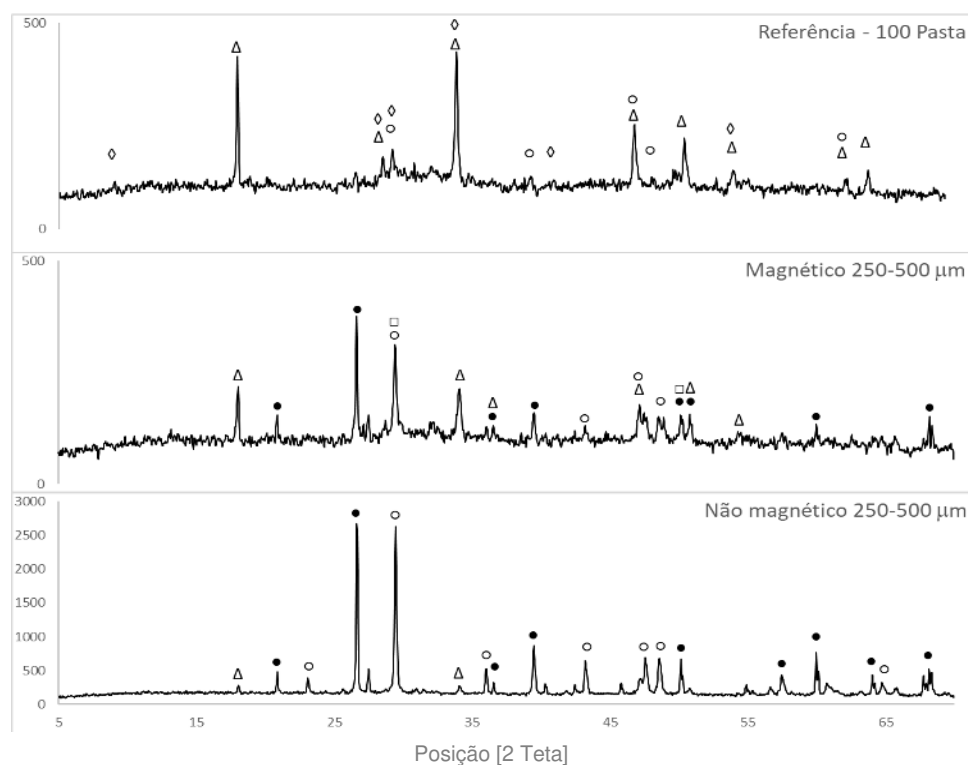


Figura 4.10. Resultados de DRX de: CR/REF (100% pasta hidratada); CR/Bet (produto magnético) da fração de 250-500 µm; c) material não magnético complementar do CR/Bet magnético (Δ-portlandite; ●- quartzo; ○- calcite; ◇- etringite; □- silicatos cálcicos hidratados).

Os resultados obtidos pelos ensaios de DRX dos dois tipos de cimento reciclado, cimento reciclado resultante de pastas puras (CR/REF) e cimento reciclado resultante de detritos de betão na fração de 250-500 μm pelo método de separação magnético (CR/Bet), apresentados na Figura 4.10, comprovam a presença do mesmo tipo de fase predominante (portlandite) em ambas as amostras. O CR/Bet contrariamente ao CR/REF, demonstra níveis de quartzo e calcite, que estão associados à contaminação do agregado resultante dos processos de libertação e separação. Para mais, a calcite identificada por DRX, tal como já foi exposto, resulta também do fenómeno de carbonatação ocorrido posteriormente à moagem, crivagem, secagem em estufa e armazenamento do material.

Apresenta-se igualmente o difratograma do material complementar do CR/Bet separado (parcela não magnética) onde se identificam as fases cristalinas do agregado (quartzo e calcite) e um pico fraco correspondente à portlandite. Estão presentes na Figura A.II.1 os resultados de DRX das amostras magnéticas e das misturas iniciais das frações granulométricas entre 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , de onde é possível identificar a diminuição da intensidade das fases cristalinas correspondentes ao quartzo e calcite, revelando a eficácia na redução dos agregados calcários e siliciosos das amostras pelo presente método.

Em suma, através das análises do DRX dos produtos submetidos ao ensaio, obtiveram-se resultados compatíveis com o esperado, comprovando a capacidade da presente técnica na busca do melhor método de separação.

A percentagem de areia siliciosa obtida através do ataque ácido numa amostra do CR/Bet na fração de 250-500 μm , foi de 13,3% (Tabela A.I.2). Este valor suplementar, em conjunto com os valores de TG/AMT, indica que o material separado pelo método magnético terá uma constituição inicial de aproximadamente 76% de cimento (79% pela AMT), 13,3% de areia e 10,7% de agregado calcário. Na Figura 4.11 estão presentes as quantidades estimadas dos diversos constituintes do betão dos produtos provenientes da separação magnética.

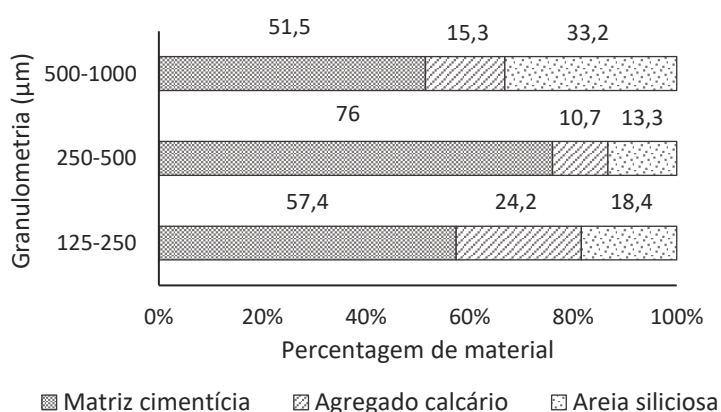


Figura 4.11. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes do rolo magnético

4.1.3.3 Processo térmico

Em paralelo à separação realizada no material proveniente do processo de libertação mecânico, explorou-se ainda a separação do material provindo da libertação via tratamento a 400 °C, recorrendo a separação magnética. Tal como no processo mecânico, o material resultante do processo térmico foi crivado a húmido, a fim de remover os finos resultantes da moagem autogénea.

Autores como Wang et al. (2018), reportam que o aquecimento do cimento hidratado a uma temperatura de 450 °C exibe melhores resultados. Por outro lado, de acordo com outros autores, temperaturas no intervalo compreendido entre os 600 e 800 °C tendem a garantir condições mais elevadas de reidratação (Xinwei et al., 2010; Bogas et al., 2019). Apesar da discrepância das temperaturas aplicadas pelos vários autores na reativação do cimento hidratado, é possível afirmar que pelo facto do material ter sido sujeito a um tratamento térmico anterior à crivagem húmida, este tenha recuperado uma parcela da sua propriedade aglutinante, o que pode levar à reidratação parcial do cimento durante e após a ação de crivagem a húmido. Esta adversidade deve ser tida em consideração, uma vez que ao promover aglomeração pode dificultar o processo de separação magnético.

Segundo a técnica de AMT, obtiveram-se valores análogos para a fração de 125-250 µm e 250-500 µm, de aproximadamente 40-45% de cimento, em massa, do produto final. Aquando o aquecimento do material, ocorre uma perda de massa pela decomposição e perda de água combinada e não combinada dos constituintes. Desse modo, os resultados obtidos pelo ensaio de AMT nas amostras resultantes do processo térmico não são comparáveis com os resultados obtidos pelo processo mecânico. De facto, visto que o material foi pré-aquecido até 400 °C, o ensaio de AMT até esta temperatura não permite identificar a parcela de matriz cimentícia. Acima desta temperatura, o ensaio é afetado pelos problemas de carbonatação já referidos. Assim, é previsto que a percentagem de cimento seja superior ao apresentado, dado que pela análise visual nas amostras obtidas na fração de 250-500 µm, apresentadas na Figura 4.12, é possível identificar uma proporção superior de partículas de cimento face às partículas de agregado.

Na medida em que a percentagem de cimento obtida não reflete a quantia real do cimento presente, não é possível determinar a efetividade do presente método de separação na individualização do material que advém do processo de libertação térmico.

Com os resultados de AMT obtidos, conjuntamente com os valores resultantes da técnica de ataque ácido, pode-se inferir que para a granulometria entre 125-250 µm e 250-500 µm, a percentagem máxima de cimento existente na amostra está compreendida entre os 55-80%, supondo a ausência do agregado calcário. Tendo em conta que não se pode excluir a influência dos agregados calcários nos resultados, considera-se razoável assumir uma percentagem semelhante à obtida pelo processo mecânico. Assim, admite-se aproximadamente que a mistura apresenta 21% de areia silicosa, 11% de agregado calcário e 68% de matriz cimentícia. Da análise microscópica do material separado, conclui-se que a percentagem de cimento deduzido é compatível com o valor deduzido, embora esta análise seja apenas qualitativa.

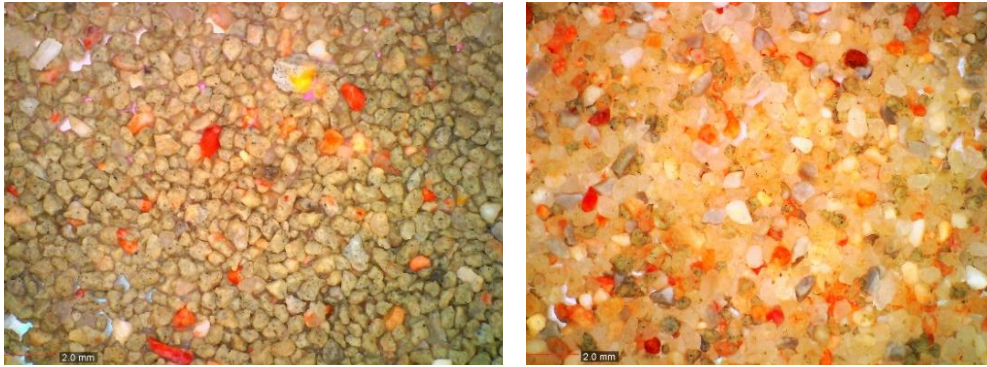


Figura 4.12. Separação magnética do material resultante do processo de libertação térmico a 400 °C, na fração de 250-500 μm : material magnético (esquerda) e material não magnético (direita)

4.1.3.4 Separação de outros constituintes

A separação de materiais presentes no RC&D, como a madeira e o plástico, estão relativamente bem consolidadas nos processos de reciclagem atualmente implementados na indústria. No entanto, para outros materiais como os cerâmicos, ainda não existe uma solução bem consolidada para a sua remoção. Isso resulta de este apresentar propriedades físicas semelhantes às do betão, nomeadamente a massa volúmica. Nesse sentido, o presente método de separação magnético idealizado para o presente trabalho foi também experimentado na separação do material cerâmico, explorando a elevada percentagem de óxido de ferro existente na sua constituição, tornando-o também um paramagnético. Para tal, britou-se um tijolo corrente e um bloco de betão, a fim de replicar a composição possível de um RC&D após uma primeira fase de triagem. O material foi crivado em diversas frações para avaliar o efeito da granulometria na separação.

Na Figura 4.13 é visível o processo de separação dos fragmentos de tijolo e betão. Demonstra-se a separação efetiva das partículas de betão e tijolo, apesar da ligeira contaminação presente no produto separado, maioritariamente de betão. Para a fração 1-6,3 mm, o rendimento de separação atingiu os 97%, e para as frações de 6,3-12 mm, cerca de 90%. Conclui-se então que o presente método é adequado tanto para a separação da matriz cimentícia como para a remoção/limpeza dos produtos cerâmicos provenientes do RC&D.



Figura 4.13. RC&D simulado (à esquerda), detrito de betão (no meio) e material cerâmico (à direita) resultante da separação magnética (fração menos eficiente de 6,3-12 mm, após uma passagem)

Em suma, fica demonstrado que o procedimento proposto no presente trabalho foi bem-sucedido na separação dos diversos componentes do betão, nomeadamente na separação da matriz cimentícia, quer derivado do processo de libertação mecânico como do processo de libertação térmico, visando a produção de cimento reciclado. O presente método foi igualmente válido na separação dos compostos cerâmicos na fase de triagem do RC&D.

4.2 Mesa Wilfley

A técnica de separação por Mesa *Wilfley*, envolve um dispositivo de concentração gravítica conhecida como mesa *Wilfley*, correntemente utilizada na indústria dos minérios. O equipamento consiste numa mesa oscilatória, que mediante um fluxo de água e mediante a sua inclinação, separa as partículas com base na diferença de densidades, tamanhos e formas dos materiais e por ação da força gravítica, força centrífuga ou pela sua combinação (Wills e Munn, 2006).

4.2.1 Descrição do procedimento

Contrariamente ao método do rolo magnético, o método da mesa de concentração gravítica *Wilfley* não necessita de uma pré-crivagem húmida do material visto que a separação implica uma lavagem durante o seu funcionamento. Por conseguinte, o material após ser reduzido à granulometria desejada e crivado nas frações pretendidas (125-250 μm ; 250-500 μm e 500-1000 μm) é introduzido a seco no alimentador, posicionado na zona mais elevada do equipamento, tal como indicado na Figura 4.14. De seguida, o equipamento é acionado, dando início à oscilação da mesa e à adução de água da torneira num fluxo constante. O material é então deixado cair do alimentador de forma contínua. Por sua vez, com o balançar da mesa e ação da água, o material é empurrado para o canto oposto, atravessando as saliências, que formam corredores ao longo do comprimento da mesa. A inclinação da mesa é ajustável em ambas as direções, longitudinalmente e transversamente, de modo a otimizar a separação em função das características das partículas.



Figura 4.14. Mesa *Wilfley* utilizada no presente trabalho do LNEG (Porto)

Após a calibração do equipamento, o material é separado em 4 produtos finais, conforme demonstrado na Figura 4.15: agregado, mistura com maior percentagem de agregado (AC), mistura com maior percentagem de cimento (CA) e finalmente, cimento.

No decorrer da separação, a fração cimentícia é espalhada ao longo das réguas, atravessando-as transversalmente, ao invés do agregado, que percorre ao longo do limite da superfície lisa e das extremidades das réguas, formando ostensivamente um traço de cor amarela na zona superior da mesa, como se pode observar na Figura 4.16. Isso resulta da maior densidade da fração de agregado face à matriz cimentícia. Obviamente, a eficiência do método depende significativamente do grau de libertação do material e, como tal, melhores separações são atingidas para as frações mais finas.

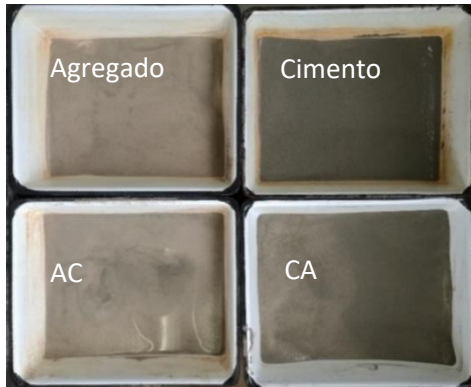


Figura 4.15. Produtos obtidos através da separação pelo método Wilfley



Figura 4.16. Detalhe da separação na mesa Wilfley

Na primeira passagem, optou-se pela mesma filosofia aplicada no método magnético. A inclinação da mesa foi estabelecida de maneira a remover a maior percentagem de agregado possível. O material recolhido no recipiente de agregado é posteriormente excluído na segunda passagem. Quanto ao material proveniente da primeira passagem, visto que se encontra em estado húmido, na segunda passagem é necessário colocar manualmente o restante material na mesa, tendo-se o cuidado de colocar doses similares com o mesmo intervalo de tempo, para eliminar fatores que possam interferir na eficiência de separação. Esta dificuldade é facilmente superada recorrendo a um sistema em série de mesas *Wilfley*, onde o material proveniente da primeira mesa é recolhido e encaminhado para uma outra mesa idêntica e adjacente. Na Figura 4.3 é visível o fluxograma dos processos de libertação e da separação pelo método da mesa *Wilfley* dos constituintes do betão (M2).

4.2.2 Fundamentação do procedimento

A mesa oscilatória *Wilfley* é um método que separa eficazmente materiais com diferentes dimensões e densidades, através da ação da água, do movimento oscilatório e da inclinação atribuída à mesa. Esta oscila num movimento assimétrico na direção longitudinal. O movimento assimétrico representa uma ação com um avanço lento e retorno rápido. Esta ação propicia o deslocamento das partículas ao longo da mesa na direção do movimento. Deste modo, o material está sujeito a duas ações: movimento da mesa e fluxo de água. O movimento oscilatório da mesa leva a uma estratificação do material entre as réguas, onde o material mais fino e denso afunda para a base e o material mais grosseiro e leve se encontra em suspensão no topo, visível no esquema da Figura 4.17. O fluxo de água que percorre ortogonalmente as réguas arrasta consecutivamente as partículas leves sobre as

réguas, até chegar à zona de recolha (Wills e Munn, 2006). Como podemos observar no esquema ilustrativo da mesa Wilfley presente na Figura 4.18, o material mais denso é recolhido no canto oposto ao alimentador e o material menos denso no canto inferior direito, ou seja, agregado e cimento, respetivamente. O movimento da água, longitudinal à mesa, em conjunto com a inclinação e a oscilação da mesma, transporta o material que está na base entre as réguas para a zona de recolha, no canto inferior esquerdo.

Finalmente, o material cimentício recolhido é decantado, para remover o excesso de água. Depois, este material é seco em estufa a 90 °C. O material seco deve ser conservado cuidadosamente, a fim de atrasar o processo de carbonatação.

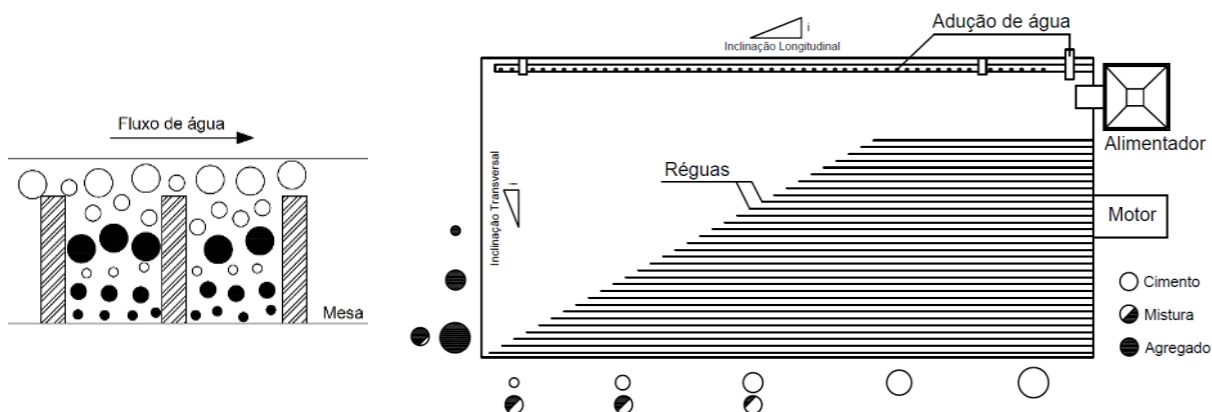


Figura 4.17. Esquema ilustrativo da estratificação entre réguas (adaptado de Wills e Munn, 2006)

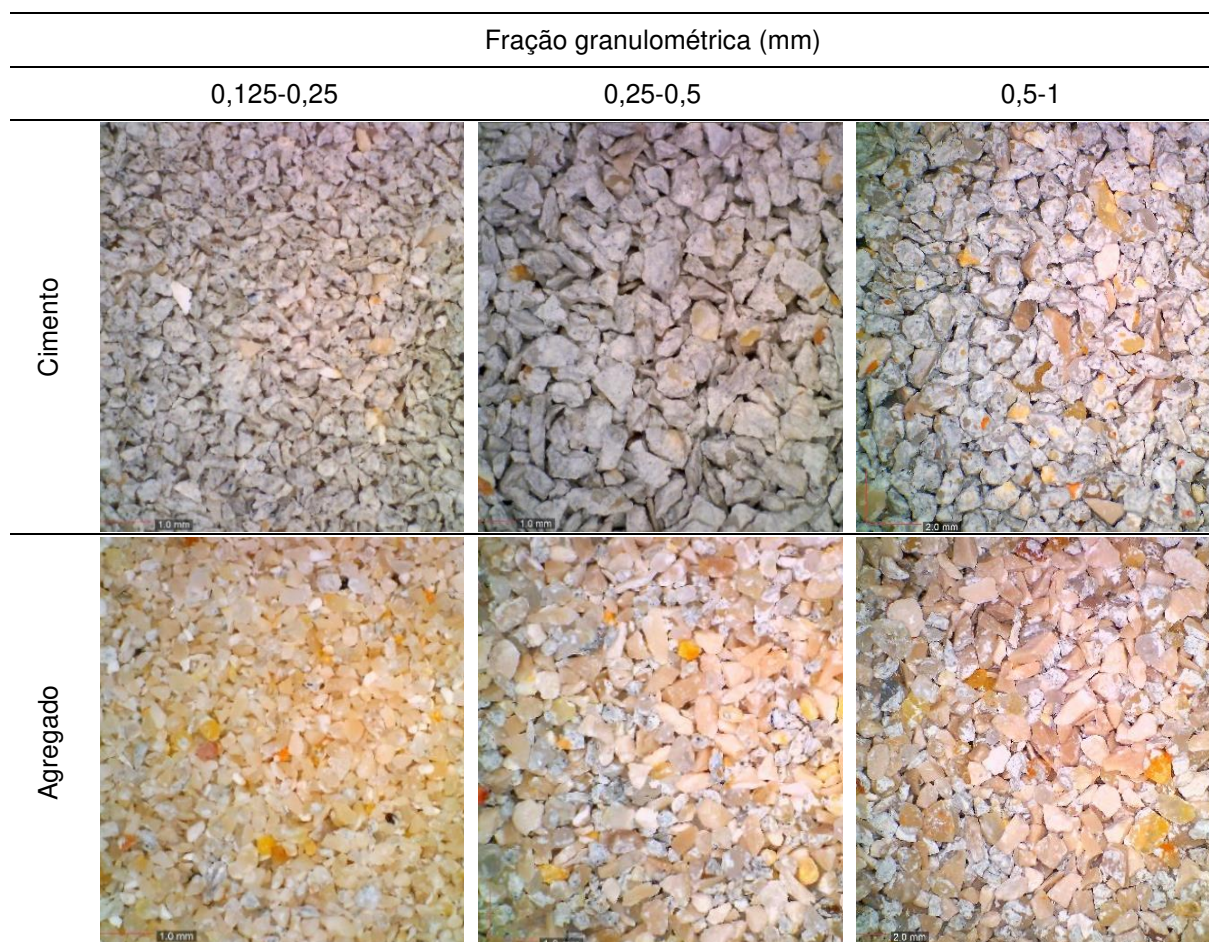
Figura 4.18. Esquema ilustrativo da mesa Wilfley em planta (adaptado de Wills e Munn, 2006)

Pela literatura, a massa volúmica da pasta de cimento hidratado é inferior à dos agregados presentes no betão, podendo variar entre 1,8-2,3 g/cm³. Por exemplo, Gomes et al. (2013) indica uma massa volúmica na ordem de 2,2 g/cm³ para a pasta de cimento hidratado. Feldman (1972) aponta valores entre 2,1-2,3 g/cm³ para as massas volúmicas das pastas de cimento com relação de a/c entre 0,4-0,6 em que comparativamente com que foi anunciado anteriormente na Tabela 3.1, os agregados apresentam massas volúmicas que variam entre 2,5-2,7 g/cm³. Em virtude destas características, as partículas de cimento e agregados reagem de forma distinta quando sujeitas à ação da água, possibilitando assim a separação dos materiais.

4.2.3 Demonstração de resultados

Na Tabela 4.3, confirma-se que a separação realizada com este método foi efetiva para todos os intervalos granulométricos. Como previsto, pela análise do produto denominado por *cimento* da fração de 125-250 µm, observou-se uma maior quantidade do material cimentício separado face às restantes frações. No entanto, existe contaminação de algumas partículas de agregados isoladas, que não foram removidas durante o processo de separação. O nível de contaminação aumenta de forma crescente nas frações de 250-500 µm e 500-1000 µm. Desse modo é possível concluir que a libertação não foi muito efetiva para frações superiores a 250 µm, justificando a menor otimização atingida também no método de separação magnético.

Tabela 4.3. Análise visual do material resultante do método da mesa Wilfley - material composto por matriz cimentícia e material composto por agregados de natureza siliciosa e calcária



Em contrapartida, verificou-se que as misturas de agregado resultantes da separação, exibem uma baixa percentagem de cimento. Este fenómeno poderá estar relacionado com a eficácia de separação do equipamento perante partículas que sejam constituídas maioritariamente por agregado, ou seja, partículas que apresentem uma maior densidade comparativamente com partículas mal libertas, que possam conter matriz cimentícia na sua constituição, ou partículas de cimento propriamente ditas.

4.2.3.1 AMT

Conforme os dados de AMT presentes na Tabela A.1.3, no que diz respeito à percentagem de cimento presente nos produtos finais após separação, conclui-se que o teor de cimento existente é tanto maior quanto menor for a fração, comprovando o que foi inferido relativamente ao impacto da libertação nas diferentes granulometrias.

A passagem na mesa *Wilfley*, permitiu atingir na parcela de cimento e de CA da fração de 125-250 μm , cerca de 88 e 87% de matriz cimentícia, respetivamente (Figura 4.19). Na parcela de agregados a presença de cimento foi de apenas 5% da massa total. Estes valores fundamentam não só a necessidade de remover primeiramente os agregados, como também comprovam o elevado nível de

libertação conseguido no material inferior a 250 μm . Na fração de 250-500 μm , a percentagem de cimento separado foi cerca de 73%, um valor expectável tendo em conta a observação efetuada pela análise visual e os resultados obtidos no processo de separação magnético. Da mesma forma, a má libertação dos constituintes do betão afetou a fração de 500-1000 μm , onde apenas se conseguiu obter um produto final com 40% de cimento. Do estudo de separação magnética e gravítica concluiu-se que a fração 500-1000 μm deve ser moída para frações inferiores.

Na Figura 4.19 indicam-se os rendimentos atingidos pelo presente método de separação e as respetivas percentagens presentes nos produtos obtidos. Tendo por base a percentagem de cimento existente na mistura inicial da fração 125-250 μm (Tabela A.I.2), cerca de 32,5%, verifica-se que para o rendimento obtido dos materiais mais puros (cimento e CA), foi possível recuperar aproximadamente 76% do cimento presente inicialmente nessa fração. Para as restantes granulometrias, o rendimento foi menor.

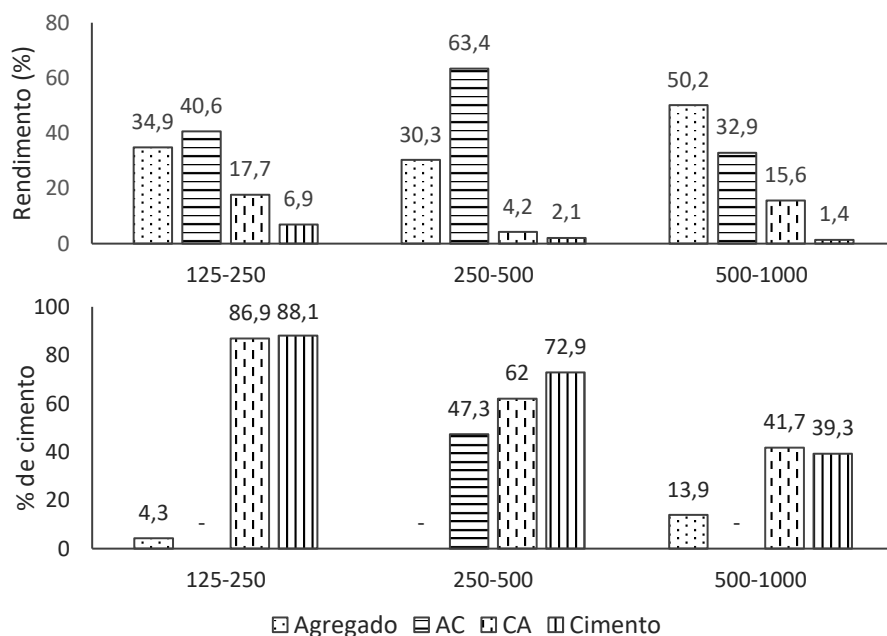


Figura 4.19. Rendimento do método de separação pela mesa Wilfley (cima) e as respetivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (Agregado; AC (maioritariamente agregado); CA (maioritariamente cimento); Cimento)

O rendimento global (das parcelas mais puras, CA e cimento) dos três intervalos granulométricos introduzidos à separação pelo presente método foi de 13,6% da massa do BO, do qual a parcela mais expressiva foi a de 500-1000 μm , atingindo os 6,6%, seguida de 5,1% para a fração de 125-250 μm e 1,9% para a fração de 250-500 μm . Comparativamente com os 18% de cimento presentes no BO, esta metodologia apresenta um melhor rendimento global em relação ao método magnético. No entanto, é obtida uma amostra menos pura devido à grande percentagem de material da fração 500-1000 μm , com baixa percentagem de cimento devido à fraca libertação dos componentes (Figura 4.19). Na Figura 4.20 encontra-se uma análise sumariada dos rendimentos obtidos dos processos de libertação e da separação referente ao presente método.

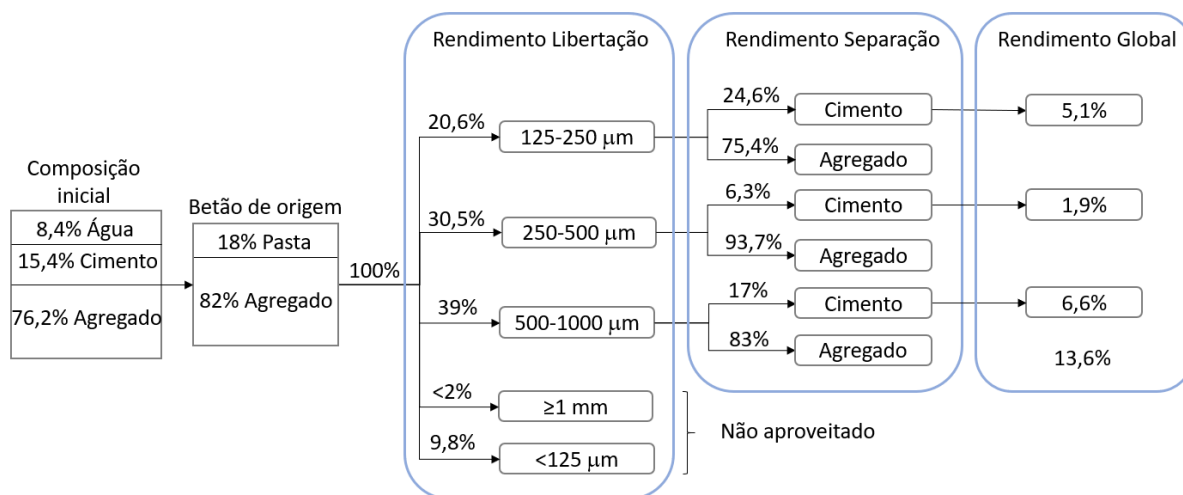


Figura 4.20. Distribuição de rendimentos dos processos de libertação e separação do método da mesa Wilfley

4.2.3.2 DRX e ataque ácido

O ensaio de DRX permitiu obter uma análise qualitativa do cimento proveniente do método de mesa Wilfley na fração de 125-250 μm (Figura 4.21). Os resultados obtidos validam a existência de portlandite como esperado. Apesar deste apresentar picos menos expressivos por comparação ao quartzo, por efeito da sua cristalinidade mais reduzida, a intensidade exibida pelo quartzo presente na mistura é indicativa de que este não se trata do composto maioritário.

Perante os gráficos resultantes do ensaio de DRX das amostras de referência apresentadas na Figura A.II.2, verifica-se que o difratograma da amostra em causa está curiosamente compreendido entre os difratogramas das amostras de referência com 75 e 90% de pasta e 25 e 10% de areia, respetivamente. Esta observação enquadra-se com os valores obtidos no ensaio AMT.

Pelos motivos já referidos, a manifestação da calcite também foi expectável nesta amostra. Em geral, os produtos obtidos pelo presente ensaio são compatíveis com os resultados previstos.

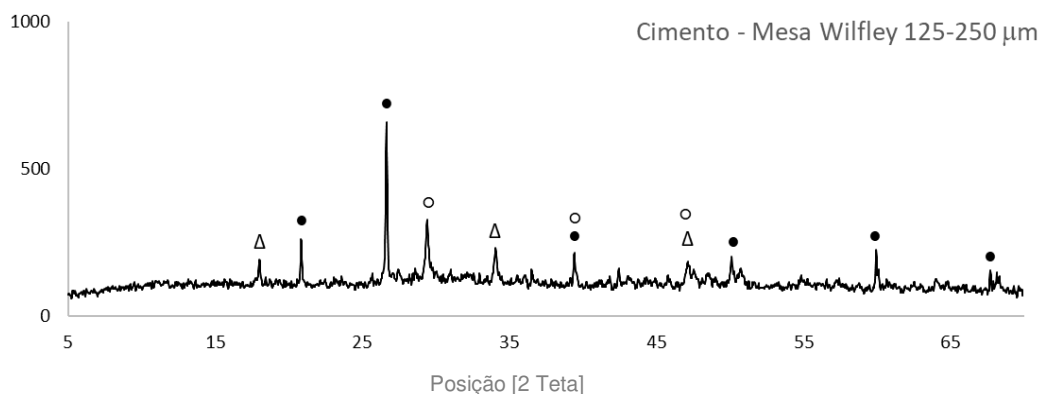


Figura 4.21. Resultados de DRX do cimento obtido através do método de Mesa Wilfley da fração 125-250 μm : Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite.

Através do ensaio de ataque ácido e os resultados apresentados na Tabela A.I.3, confirmou-se a má separação na fração de 500-1000 μm , com quantidades de areia siliciosa a rondar os 44%, em percentagem de massa da mistura total. A fração de 125-250 μm apresenta cerca de 7% de areia siliciosa, em massa, enquanto que a fração 250-500 μm apresenta cerca de 21%. Estes valores são coerentes com os valores obtidos no ensaio de AMT, para os quais a parcela em falta corresponde à percentagem de agregado de natureza calcária (cerca de 15 e 7% para as frações de 125-250 μm e 250-500 μm , respetivamente) (Figura 4.22).

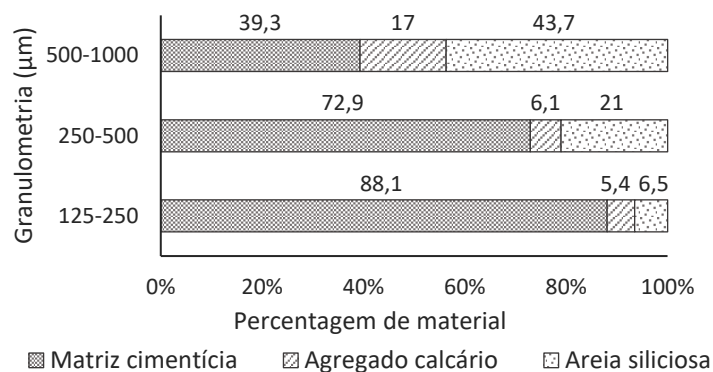


Figura 4.22. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes da mesa Wilfley

Resumidamente, no presente capítulo foi possível demonstrar a efetividade do método da mesa *Wilfley*, na separação dos constituintes do betão, em especial para fração 125-500 μm . Face ao método magnético, obtém-se um melhor desempenho nas frações muito finas, mas o processo é mais demorado e difícil de implementar. Para mais, este método representa um gasto adicional de água face ao método magnético.

4.3 Mesa Mozley

O método de mesa *Mozley*, semelhante ao método de mesa *Wilfley*, também se enquadra nos métodos de separação por concentração gravítica. Este equipamento difere estruturalmente da mesa *Wilfley*, contudo, fundamenta-se nos mesmos princípios.

4.3.1 Descrição do procedimento

À semelhança da mesa *Wilfley*, é diretamente utilizado o material proveniente da britagem seguido de moagem, não sendo necessária a etapa prévia de crivagem húmida. As características da mesa não permitem a sua utilização contínua, isto é, a separação tem que ser realizada por um ciclo de várias etapas: colocação do material, separação e limpeza da mesa. Assim, para obter uma quantidade significativa de material, foi necessário repetir este procedimento múltiplas vezes, tornando o processo extremamente moroso. Esta é a principal limitação deste método de separação. Na Figura 4.23 apresenta-se o equipamento utilizado.

Como ponto de partida, procedeu-se à pesagem das amostras, das quais foram preparadas várias doses de material com cerca de 100 g cada. Colocou-se a amostra na extremidade onde é injetada a água e acionou-se a oscilação do tabuleiro. O caudal de água utilizado ronda os 2,5-3 L/min. De forma a auxiliar a dispersão do monte de material acumulado no início, recorreu-se ao uso de um esguicho de água. O material sujeito à oscilação da mesa e ao fluxo de água sobre o tabuleiro inclinado é encaminhado para a outra extremidade onde é recolhido num recipiente (Figura 4.24). Uma vez promovida a separação por diferenciação gravítica, o material que flui primeiro para a extremidade oposta da mesma é o material cimentício (o mais leve). Quando o primeiro agregado atinge a extremidade, desliga-se o equipamento e procede-se à lavagem do material retido no tabuleiro com ajuda de esguichos. Repetiu-se este procedimento as vezes necessárias para obter uma quantidade suficiente de cimento. Note-se que, de forma semelhante à mesa *Wilfley*, foi necessário realizar vários testes preliminares de modo a determinar a inclinação ideal para a separação do material cimentício.



Figura 4.23. Mesa Mozley recorrido no presente trabalho do LNEG (Porto)

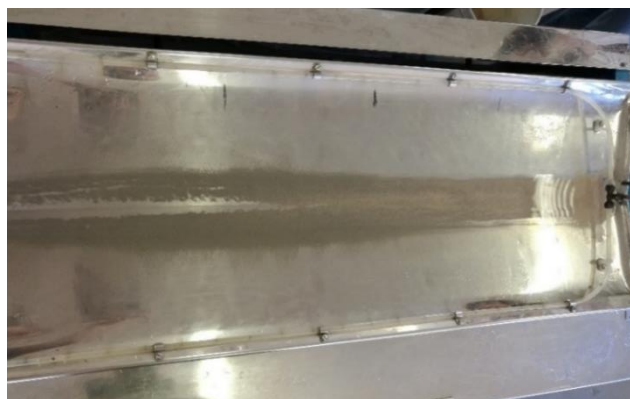


Figura 4.24. Distribuição das partículas durante o funcionamento da mesa Mozley

4.3.2 Fundamentação do procedimento

A mesa *Mozley* também conhecida como a mesa *Mozley Superpanner* é um método de separação correntemente utilizado por mineralogistas e metalurgistas para separar minérios, pois é capaz de separar minerais com diferenças pequenas de massa volúmica. Este equipamento é uma versão moderna do *Superpanner*, que tem como fim replicar as ações de uma bateia manual.

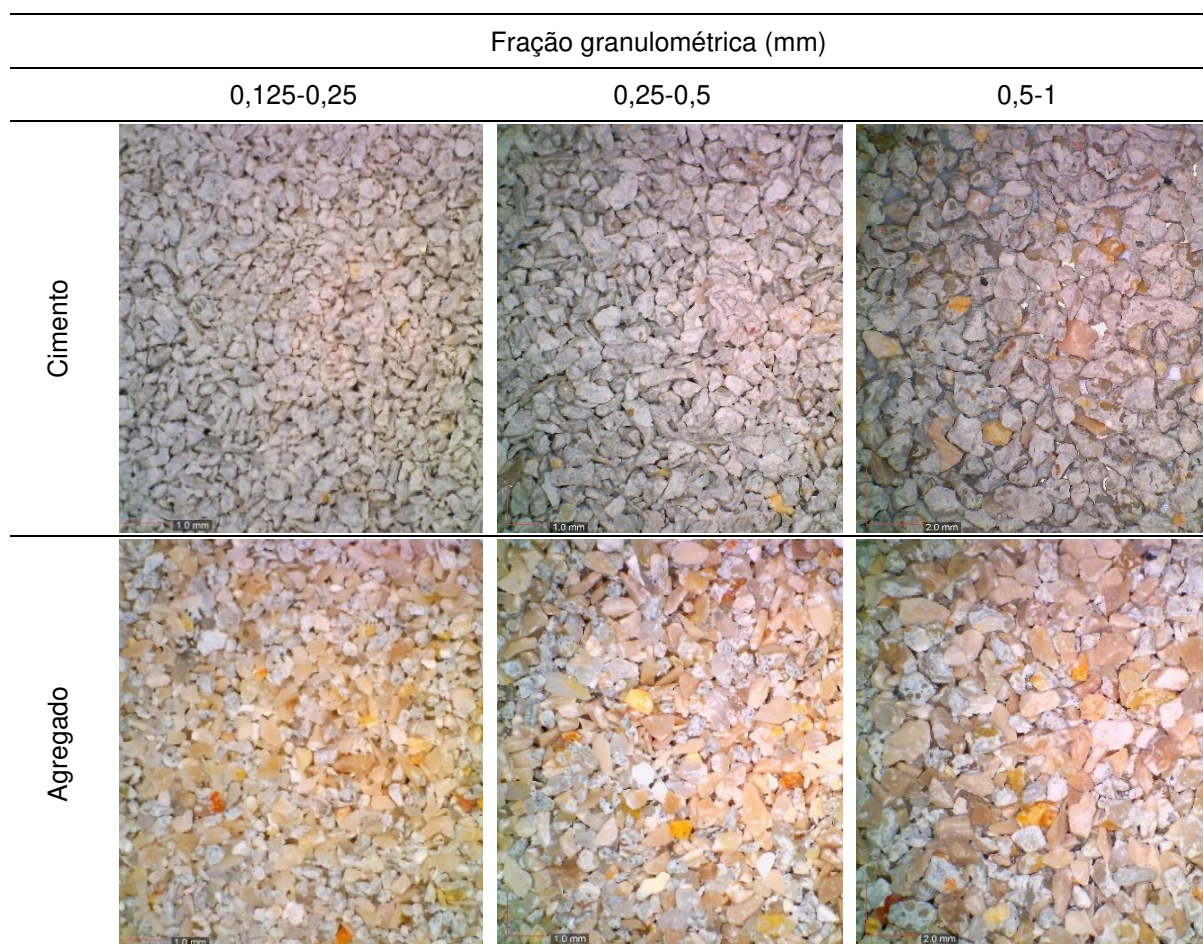
A mesa dispõe de dois tabuleiros de aço inoxidável alternáveis, sendo que o tabuleiro utilizado no presente trabalho apresenta uma seção transversal em V enquanto que o outro tabuleiro se caracteriza por um perfil plano. O tabuleiro em V é recomendado para fazer separações de amostras com dimensões entre 100 μm e 2 mm, enquanto que o tabuleiro liso é recomendado para frações inferiores a 100 μm (911metalurgist, 2019). Os tabuleiros podem ser ajustados relativamente à sua inclinação na direção longitudinal, dependendo da granulometria do material. Consoante a amostra a ser tratada, são reguladas a vazão da água e a velocidade de oscilação do tabuleiro. Aquando a ativação do equipamento, o tabuleiro começa o seu movimento oscilatório horizontal, com o eixo de simetria coincidente à linha de centro do perfil V. Uma película uniforme de água é introduzida em toda a

superfície do tabuleiro por tubos de irrigação ao redor da fronteira. O material separado percorre numa faixa estreita ao longo do vértice do “V”. As partículas de maior densidade concentram-se no centro do tabuleiro e são menos impulsionadas para jusante da mesa. Por outro lado, as partículas de baixa densidade ficam em suspensão devido à oscilação e são transportadas para jusante, com auxílio do fluxo de água, sendo em seguida descarregadas para o recipiente de recolha.

4.3.3 Demonstração de resultados

Pela análise microscópica das amostras obtidas pelo método de Mesa *Mozley*, demonstrado na Tabela 4.4, verifica-se uma boa separação entre o cimento e o agregado, tendo por base a diferenciação das tonalidades.

Tabela 4.4. Análise visual do material resultante do método da mesa Mozley - material composto por matriz cimentícia e material composto por agregados de natureza siliciosa e calcária



Nota-se que a percentagem de contaminação da mistura de cimento é bastante reduzida, principalmente para a fração de 125-250 μm . No entanto, verifica-se que para a mistura de agregado da mesma fração, a contaminação de partículas de cimento é significativa, ainda que esta se encontra liberta. Esta discrepância na qualidade dos produtos adquiridos pelo método de separação pode ser justificada pelo mecanismo do equipamento, isto é, por se tratar de um método não contínuo, a

qualidade e o rendimento são influenciados pela capacidade de observação do utilizador. Desse modo, para se atingir uma grande pureza da fração de cimento, uma parte significativa de amostra contaminada é preterida pelo utilizador. Por outras palavras, atingem-se níveis elevados de pureza em prejuízo de baixos rendimentos de separação. Caso o objetivo fosse a purificação do agregado, o corte realizado seria efetuado mais tarde, optando-se por deixar a fração de cimento mais contaminada. Nas frações entre 250-500 μm e 500-1000 μm exibem-se as mesmas características que na fração abordada, ainda que na fração mais grosseira, as partículas de cimento obtidas aparentem estar substancialmente contaminadas, o que se justifica pela fraca libertação atingida, conforme confirmado nos métodos de separação anteriores.

4.3.3.1 TG/AMT

Conforme observado na Figura 4.25, apenas para temperaturas superiores a 450 $^{\circ}\text{C}$, correspondentes à fase da perda de água por desidroxilação, foi possível observar uma variação mais significativa das duas curvas (indicando a elevada percentagem de cimento do produto separado pelo método de MM). Tendo em consideração o ensaio de TG, na fração de 125-250 μm , para o intervalo de temperatura entre 120-400 $^{\circ}\text{C}$, verifica-se que a percentagem de cimento foi de aproximadamente 93%. Para a mesma amostra e pelo ensaio de AMT (Tabela A.I.4), registaram-se valores de 94% de cimento. Mais uma vez se confirma a boa correspondência entre os ensaios AMT e TG.

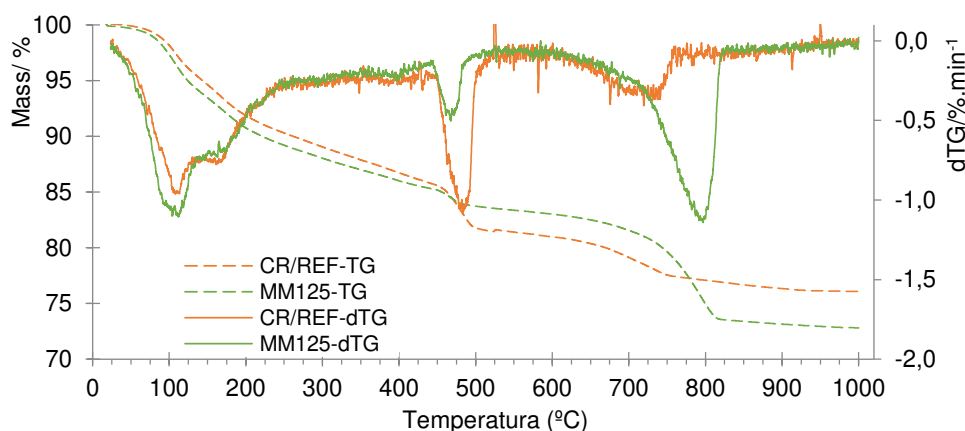


Figura 4.25. Análise termogravimétrica (TG e DTG) da pasta de referência (CR/REF) e do cimento proveniente da mesa Mozley (MM) – fração 125-250 μm .

Por sua vez, na fração entre 250-500 μm obteve-se 80% de cimento em relação à massa do produto separado. Considera-se que este é um valor máximo de separação atingível nesta fração, tendo em conta o grau de libertação atingido nas partículas. Desse modo, os níveis de separação atingidos no método magnético foram excelentes, demonstrando a grande eficiência deste método. Por outro lado, a amostra final, na fração entre 500-1000 μm , não ultrapassou os 50% de cimento. Assim, salienta-se a necessidade de moer esta fração para níveis inferiores de maior libertação.

Da Figura 4.26 e Tabela A.I.2, confirmam-se que os rendimentos obtidos através do método em causa, em todas frações granulométricas, são inferiores à existente na mistura inicial. Por exemplo, na fração

de 125-250 μm , a mistura inicial continha 32,5% de cimento, contudo, após a separação, apenas se obteve um rendimento de 11% (ocorreu uma perda expressiva de 66% do cimento presente no produto inicial). Este obstáculo pode ser facilmente superado através da repassagem do material, o que não é recomendado visto não ser a prática mais eficiente, tendo em conta que o equipamento consegue apenas separar pequenas amostras em cada etapa e a divisão é efetuada manualmente. De facto, este método serve apenas para fins de investigação e calibração, visto que se atingem amostras potencialmente muito puras. No entanto, não é viável a sua aplicação industrial.

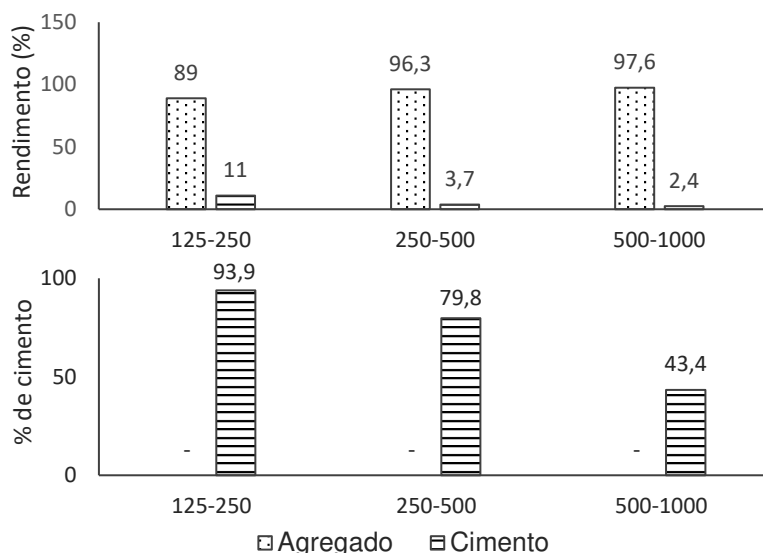


Figura 4.26. Rendimento do método de separação pela mesa Mozley (cima) e as respetivas percentagens de cimento presentes nas amostras (baixo) (Agregados de natureza calcária e silicosa e matriz cimentícia)

4.3.3.2 DRX e ataque ácido

A eficácia do presente método para a fração de 125-250 μm é ainda comprovada pelos resultados do ensaio de DRX. Na Figura 4.27, demonstra-se a presença de portlandite, acompanhada ainda de quartzo e calcite. Devido às diferentes características dos componentes, a presença de quartzo na amostra é evidenciada pelas suas propriedades cristalinas, comparativamente com os componentes de cimento essencialmente amorfos. Contudo, a intensidade do pico de quartzo demonstra que o material obtido pelo método de Mesa *Mozley* deverá conter uma baixa percentagem de quartzo.

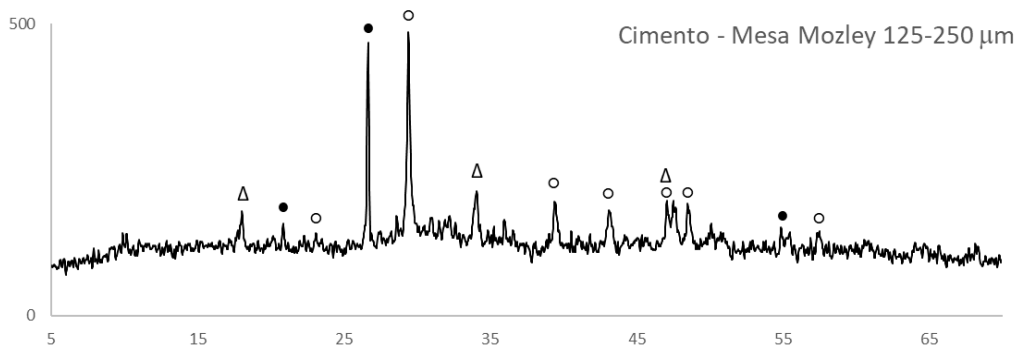


Figura 4.27. Resultados de DRX do cimento obtido através do método de mesa Mozley da fração 125-250 μm : Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite;

Comparando o presente difratograma com o difratograma da amostra de referência constituído por 90% de CR/REF e 10% areia fina, constata-se que ambos apresentam o mesmo nível de intensidade de quartzo (Figura 4.27 e Figura A.II.2). A existência de calcite na amostra de referência é justificada pela carbonatação do cimento. Porém na amostra de MM, esta ainda pode resultar da existência de agregados de natureza calcária que não tenham sido removidos.

Segundo o ensaio de ataque ácido, como se pode observar na Figura 4.28, obteve-se aproximadamente 6% de areia siliciosa. Este valor, em conjunto com a percentagem de cimento determinada pelo ensaio de TG/AMT, é indicativo de que a presença de agregado calcário na mistura não deverá exceder 1%, em massa, da amostra total. Assim, o evidente vestígio da calcite no ensaio de DRX deverá ser maioritariamente derivado do efeito de carbonatação da matriz cimentícia.

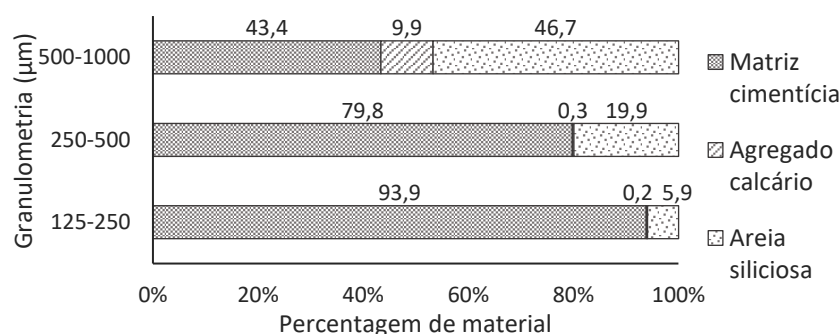


Figura 4.28. Estimativa das proporções dos constituintes presentes nos produtos provenientes da mesa Mozley

Conclui-se que a amostra de 125-250 µm obtida pelo presente método é excepcionalmente pura, apesar de apresentar um elevado nível de carbonatação. A pureza do material é diretamente proporcional ao grau de libertação obtido anteriormente no processo mecânico, demonstrando então que os métodos de libertação aplicados foram bem-sucedidos nesta fração. Resumindo, considera-se que o presente método é somente indicado para avaliar o nível de libertação dos processos de libertação, não devendo ser aplicado como um método de separação. A excessiva carbonatação do material pode ser adequadamente evitada com um melhor manuseio e armazenamento do material.

4.4 Comparação de resultados entre técnicas










A procura de um método de separação para os resíduos de betão levou à adoção de procedimentos já dominados ou reconhecidos na indústria dos minérios. Dos três métodos apresentados (MM, MW e RM), teve-se como foco principal o método magnético, por se considerar o método com maior potencialidade de ser empregue a nível industrial, tendo em consideração a sua eficiência, economia e impacto ambiental.

Como observado, todos os métodos analisados apresentaram resultados satisfatórios na separação dos componentes do betão, nomeadamente na individualização da matriz cimentícia. Em relação à fração com melhor libertação, 125-250 µm, a amostra obtida pelo método de MM aparenta ser a menos contaminada, e a de RM a menos pura (Tabela 4.5). A fração intermédia, entre 250-500 µm, embora demonstre bons resultados nos três métodos, manifesta a presença de algum agregado não liberto. No

entanto, a fração mais contaminada é a fração de 500-1000 µm. O vestígio desta parcela é claramente marcado pela coloração creme/castanho claro dos fragmentos de brita e amarelo/creme translúcido das areias. A fraca liberação atingida nesta fração não permitiu separações razoáveis em qualquer dos métodos testados.

Prevê-se discrepância dos resultados entre o que foi observado pela câmara digital e o que foi obtido pelas outras técnicas quantitativas e qualitativas aplicadas ao longo do presente trabalho, dado que a análise visual não distingue, por exemplo, as partículas de agregado (normalmente grãos de areia, devido à sua dimensão e ao seu formato) revestidas com uma fina camada de cimento.

Tabela 4.5. Análise visual das frações granulométricas dos vários métodos de separação - mistura composta essencialmente por matriz cimentícia

Método de separação	Fração granulométrica (mm)		
	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1
RM			
MW			
MM			

Na Figura 4.29 estão apresentadas as percentagens de cimento presentes em amostras separadas nas frações granulométricas de 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , através dos métodos abordados. Os valores foram estimados através do ensaio de AMT. Nos métodos gravíticos (MM e MW), a separação foi mais eficaz para as frações inferior a 250 μm , tendo atingido uma pureza aproximadamente de 85-95% de cimento, em massa, da totalidade da mistura separada. No método magnético esta percentagem desce para os 58%, visto que a eficiência deste método é perturbada por partículas ultrafinas inferiores a 150 μm . Na fração de 250-500 μm , observaram-se eficiências semelhantes para todos os métodos, compreendidos entre 70-80%, o que atesta a grande capacidade destes métodos nesta fração. Pelas razões já referidas, de fraca libertação, a fração de 500-1000 μm revelou uma baixa porção de cimento (atingindo dificilmente os 50%). Ainda assim, o método RM foi o que demonstrou melhor eficiência na separação destas amostras mais grosseiras.

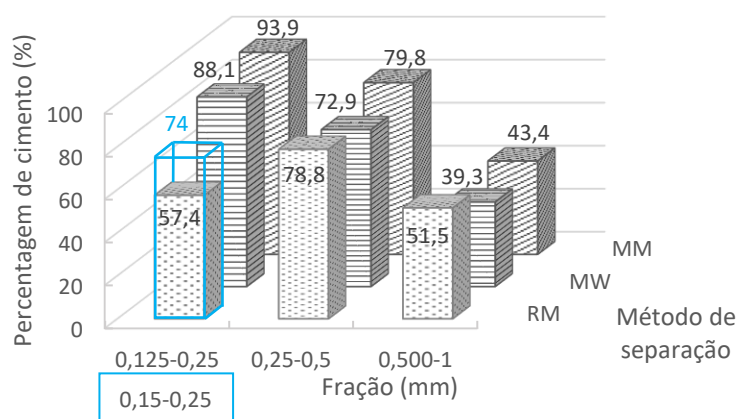


Figura 4.29. Percentagem de cimento dos produtos resultantes da separação

De modo a contornar a natureza qualitativa do ensaio de DRX, procurou-se analisar os picos de intensidade dos difratogramas. Conforme observado na Figura 4.30, as amostras denominadas “mais puras”, apresentaram picos de intensidade mais baixo nas fases de quartzo e calcite. A comparação dos difratogramas obtidos com o das amostras de referência é uma boa forma de quantificar o seu nível de pureza, isto é, atribuir-lhes uma percentagem de contaminação dos materiais ensaiados. Como é visível na Figura A.II.2 os difratogramas correspondentes às misturas de referência manifestam maioritariamente fases correspondentes ao quartzo, portlandite, etringite, calcite e silicatos de cálcio hidratados (conjugação de pasta hidratada e areia fina inferior a 250 μm , proporcional em massa). Comparando os picos de quartzo, entre 25° e 30° (onde a sua presença é mais evidente), obtidos nas amostras de RM, MM e MW, verifica-se que todos eles deverão possuir menos de 25% de areia siliciosa na sua constituição, revelando as purezas dos materiais separados e validando a técnica de AMT. Porém, não se pode descartar a possibilidade da existência da calcite resultantes dos agregados de natureza calcária. De facto, a calcite é dos compostos mais difíceis de identificar pelo presente ensaio, por se tratar de um mineral comum à matriz cimentícia (originado pela reação de carbonatação) e aos agregados calcários. Como consequência do fenómeno de carbonatação, a formação da calcite implica a perda de portlandite e, em parte, silicatos cálcicos hidratados, impossibilitando a determinação da quantidade de pasta efetiva. Deste modo, considera-se imprescindível o recurso a outros tipos de ensaios de caracterização quantitativa no sentido de elevar a veracidade dos dados obtidos.

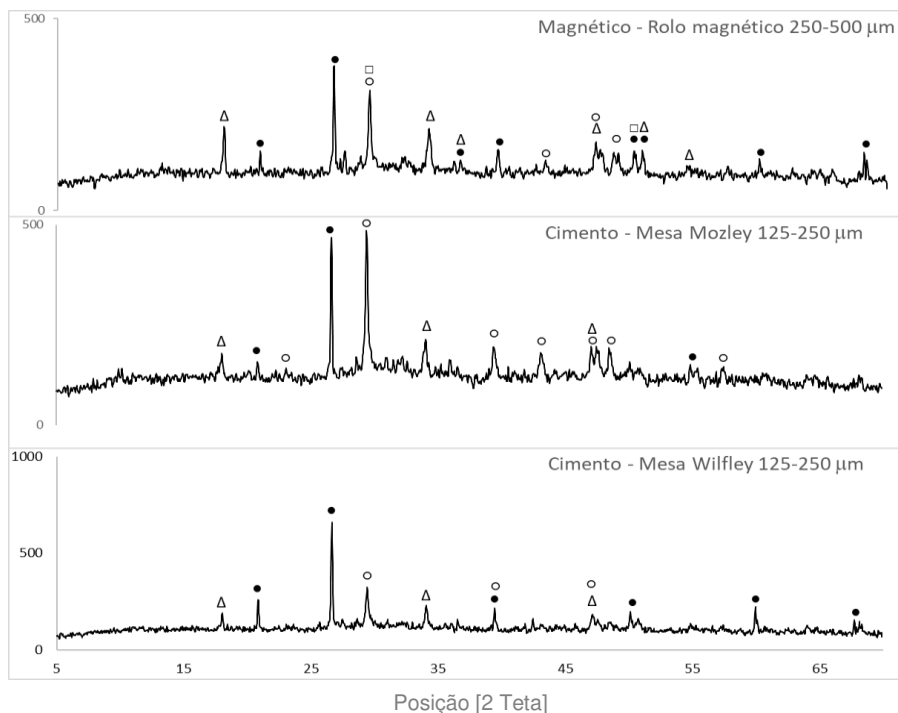


Figura 4.30. Resultados de DRX dos métodos de RM, MW e MM nas frações menos contaminadas (Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite; \diamond - etringite; \square - silicatos cálcicos hidratados)

Importa ainda salientar que o ensaio de DRX apresenta as seguintes dificuldades: apenas parte da amostra é analisada; a qualidade da moagem afeta os resultados. A presença de partículas pobremente cominuídas pode levar a leituras distorcidas, especialmente em partículas de areia siliciosa, devido à sua elevada cristalinidade.

Atendendo aos resultados obtidos pelo ataque ácido das frações menos contaminadas, as quantidades de agregado calcário presente nos produtos separados pelos métodos de RM, MM e MW, rondam os 7,9; 0,2 e 5,5%, respetivamente. Projetando estes valores para os difratogramas de DRX, deparou-se que para o método de MM, o resultado não está de acordo com os picos revelados (referentes à calcite). Enquanto que este apresenta uma percentagem de agregado inferior a 1% da massa total, a intensidade correspondente ao agregado calcário (calcite) excede o pico do quartzo existente na amostra (cerca de 6% da amostra), segundo o resultado de DRX. Assim, conclui-se que os difratogramas obtidos pelo DRX não são comparáveis entre si, sendo, no entanto, uma boa ferramenta para avaliar os constituintes do material (para o caso da avaliação do nível de carbonatação, em conjunto com o ensaio de ataque ácido).

Em suma, com os resultados alcançados, comprova-se que todos os métodos alvo de estudo foram efetivos na separação da fração cimentícia. Enumera-se de seguida a pureza dos materiais obtidos, por ordem decrescente: MM 125-250, MW 125-250, MM 250-500, RM 250-500, MW 250-500, RM 125-250, RM 500-1000, MM 500-1000 e MW 500-1000. Nota-se que qualquer dos métodos permitiu níveis de separação superiores a 70%, para as frações superiores a 150 μm e inferiores a 500 μm .

Como referido, o método de MM apesar de ter conduzido ao material mais purificado comparativamente com os outros métodos, não é um método implementável a nível industrial. Contudo este método é uma boa ferramenta para avaliar o nível de libertação de cada fração.

4.5 Reativação e produção de provetes com cimento reciclado

Foram produzidas pastas com amostras de cimento separado a partir das metodologias utilizadas, de modo a avaliar a viabilidade desta técnica para a produção de cimento reciclado. A temperatura de termoativação foi definida tendo em conta o sugerido por outros autores (Xinwei et al., 2010; Shui et al., 2009; Serpell e Lopez, 2013; Bogas et al., 2019; entre outros), em especial considerando o trabalho desenvolvido no IST (Neto, 2019). Assim, considerou-se uma temperatura de tratamento de 700 °C. Utilizaram-se as frações granulométricas de cada método que apresentaram a maior percentagem de cimento nos ensaios de TG/AMT, reativando-se assim o material RM 250-500 MAG3, MW 125-250 e MM 125-250. Para efeitos comparativos foi ainda produzido cimento reciclado proveniente das PO's.

O cimento, previamente ao aquecimento, foi moído no moinho apresentado na Figura 4.31, com recurso a bolas cerâmicas, de modo a apresentar uma granulometria mais reduzida e uniforme. De seguida foi crivado num peneiro de 250 µm, e todas as partículas retidas no peneiro foram remoídas num almofariz mecânico (Figura 4.32). Tentou-se realizar a reativação o mais próximo possível da data de moagem, pois a redução adicional do cimento, e o contacto com o ar, poderia condicionar o grau de carbonatação do material.



Figura 4.31. Moinho de bolas de Denver do GEOLAB/IST



Figura 4.32. Almofariz mecânico do LAMPIST

O aquecimento do cimento foi realizado no forno horizontal da Figura 4.33. O material foi aquecido a 700 °C durante um período de 3 horas, aproximadamente, com uma velocidade de aquecimento de 15 °C/min. O tratamento térmico foi monitorizado com auxílio de termopares. O material foi deixado a arrefecer naturalmente dentro do forno, até atingir a temperatura ambiente, sendo posteriormente retirado e armazenado cuidadosamente. Os materiais, após o aquecimento, perderam em média cerca de 25% da sua massa inicial.



Figura 4.33. Forno horizontal do LC em funcionamento (com termopares)

Após a reativação, procedeu-se à produção dos provetes de pasta. A relação a/c das pastas com 100% de cimento reciclado, resultante das pastas de origem, foi estabelecida de modo a apresentar consistência normal, de acordo com a NP EN 196-3. Os provetes com os restantes tipos de cimento foram produzidos com a mesma relação a/l.

Visto não existir atualmente uma norma focada na produção de provetes de cimento reciclado, procedeu-se ao ajuste do procedimento estipulado na NP EN 196-1. Recorreu-se a uma misturadora de eixo vertical para produzir os provetes. Apresenta-se de seguida o procedimento adotado na produção dos provetes de pasta com cimento reciclado:

1. Colocar 50% da água de mistura e 1/3 do cimento reciclado no recipiente da misturadora;
 2. Acionar a máquina e deixar misturar até não avistar grumos ou cimento por hidratar;
 3. Adicionar com ajuda de uma espátula poucas quantidades do ligante e deixar misturar;
 4. Adicionar água quando a mistura apresentar uma má trabalhabilidade ou cimento seco;
 5. Parar pontualmente o equipamento e remover a pasta aderente às paredes do recipiente;
 6. Acrescentar sucessivamente e em porções alternadas o ligante e a água, preparados previamente;
 7. Deixar misturar poucos minutos até apresentar uma mistura uniforme e trabalhável.
- Recomenda-se um tempo total de mistura de cerca de 5 minutos.

Foram moldados e compactados provetes prismáticos de 40x40x160 mm. Os provetes foram compactados na mesa de compactação em duas camadas, sendo sujeitos a 60 pancadas por camada. Removeu-se o molde com os provetes e alisou-se a superfície exposta com recurso a uma colher de pedreiro até se obter uma superfície uniforme. Seguidamente, protegeram-se os provetes com um filme plástico e deixaram-se repousar em ambiente de laboratório durante pelo menos 24 horas. Após a desmoldagem, os provetes foram curados em câmara condicionada, com uma humidade relativa maior que 95% até à idade de ensaio.

Produziram-se provetes com os materiais provenientes do método de separação magnético, mesa *Willey* e mesa *Mozley*, com as características indicadas na Tabela 4.6. Em certos casos, devido à perda de massa do cimento reciclado durante a sua reativação, a falta de material levou a que não fosse possível produzir provetes suficientes para as 3 idades de ensaio, nomeadamente para a mistura de MM e 75/25 REF, em que somente se obtiveram 2 provetes. Desta forma, ensaiaram-se os provetes apenas aos 3 e 28 dias, a fim de avaliar a sua evolução de resistência em idades iniciais e a longo prazo.

A fim de cumprir a produção de pastas com consistência normal, procurou-se que estas tivessem pelos menos uma relação a/l semelhante ao CR/REF. Em casos onde se utilizaram cimento reciclado proveniente dos métodos de separação, a presença de agregados na sua constituição promove uma maior trabalhabilidade das pastas. No entanto, durante o fabrico das pastas de MM e MW, verificou-se que era necessário aumentar a relação a/l. A maior necessidade de água de MM e MW, comparativamente ao CR/Bet, poderá ter sido induzida pela maior finura do material. Visto que antes da moagem inicial do cimento CR/Bet, este apresentava uma granulometria superior aos cimentos resultantes de MM e MW, a moagem complementar antes do aquecimento, poderá ter reduzido ainda

mais a granulometria das partículas. Assim, o aumento da superfície específica do material poderá ter sido a causa da maior necessidade de água.

Tabela 4.6. Descrição dos diversos provetes produzidos a partir de cimento reciclado

Designação	Relação a/l	Granulometria inicial (μm)	Descrição
CR/REF	0,71	<250	100% de cimento reciclado resultante de pastas puras de nível de hidratação semelhante ao dos betões sujeitos a reciclagem
CR/Bet	0,71	250-500	100% de cimento reciclado resultante de detritos de betão pelo método magnético
MW	0,75	125-250	100% de cimento reciclado resultante de detritos de betão pelo método da mesa <i>Willey</i>
MM	0,72	125-250	100% de cimento reciclado resultante de detritos de betão pelo método da mesa <i>Mozley</i>
75/25 REF	0,72	<250	Simulação de cimento reciclado proveniente de detritos de betão com 75% de cimento reciclado resultante de pastas puras e 25% de areia fina

4.6 Caracterização mecânica das pastas com cimento reciclado

Os resultados de resistência à compressão das pastas produzidas mencionadas na Tabela 4.6 encontram-se representados na Figura 4.35.

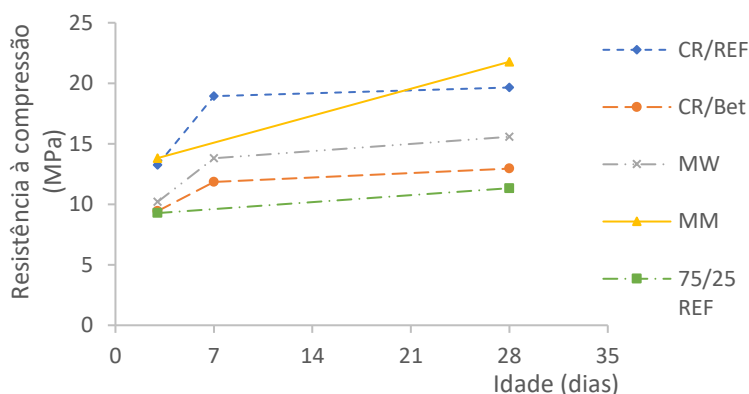


Figura 4.34. Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade de: CR/REF; CR/Bet; MW; MM; 75/25REF.

Na Tabela 4.7 resumem-se os valores médios da resistência à compressão e flexão dos provetes produzidos, ensaiados aos 3, 7 e 28 dias de idade. Na Figura 4.36 estão apresentadas as resistências à compressão dos provetes de CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF ($F_{\text{cm},28\text{d}}/F_{\text{cmCR/REF},28\text{d}}$) relativas ao provete referência (CR/REF) e as percentagens de cimento existentes (obtidos através do ensaio de AMT). Note-se que devido à limitação de quantidade de material, apenas foi possível obter 1 resultado no caso da resistência à flexão e 2 resultados no caso da resistência à compressão (na maioria dos casos). Na Tabela A.III.1, Tabela A.III.2 e Tabela A.III.3 apresentam-se todos os resultados de resistência obtidos com maior detalhe.

Tabela 4.7. Resistência à flexão e compressão dos provetes produzidos com o cimento reciclado

Composição	a/l	Idades de ensaio (dias)	Flexão	Compressão
			f_{ctm} (MPa)	f_{cm} (MPa)
CR/REF	0,71	3	2,93	13,3
		7	1,88	18,9
		28	3,28	19,65
CR/Bet	0,71	3	2,34	9,4
		7	3,28	11,9
		28	2,46	12,95
MW	0,75	3	2,52	10,2
		7	2,97	13,8
		28	3,44	15,3
MM	0,72	3	-	13,8
		7	-	-
		28	-	21,8
75/25 REF	0,72	3	2,23	9,3
		7	-	-
		28	2,34	11,3

O foco principal do presente trabalho reside na separação dos constituintes e, como tal, apenas é analisada a evolução da resistência nas misturas com cimento reciclado de betão e comparado o seu desempenho face ao de provetes de referência com apenas cimento reciclado resultante de pastas puras.

Visto que foi apenas ensaiado um provete à flexão por composição, e dado que a rotura dos provetes envolve apenas uma secção, estando suscetíveis à influência de defeitos e heterogeneidades, a determinação desta propriedade não foi rigorosa e nem sempre se verificou uma tendência de evolução lógica da resistência (Tabela 4.7).

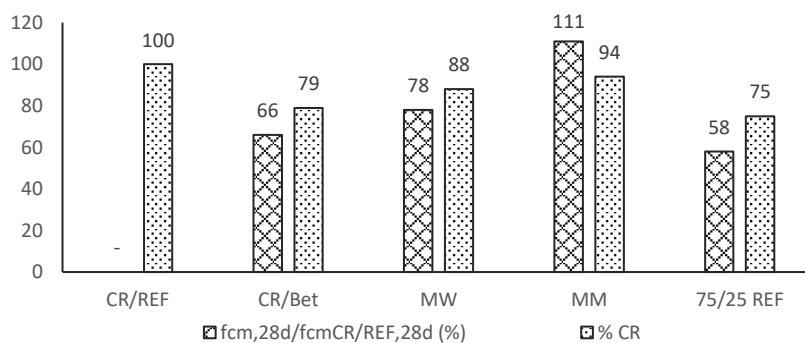


Figura 4.35. Comparação da resistência relativa com a percentagem de cimento existente no cimento reciclado dos provetes de CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF

Os resultados de resistência à compressão indicados na Figura 4.35 demonstram que o método de separação magnético permite obter ligantes com resistências à compressão de cerca de 66% da resistência verificada em pastas de referência com 100% de cimento reciclado de igual a/l (Figura 4.36). Face à percentagem de cimento existente no ligante reciclado de betão (79%, 4.1.3), seriam esperadas menores diferenças. No entanto, visto se ter considerado misturas de igual a/l, e dado que mais de 20% da amostra é agregado, a relação a/c efetiva da mistura é mais elevada, o que dificulta a comparação direta de resultados. Assim, caso se tivessem produzido misturas de igual a/c, as resistências seriam

mais comparáveis. No entanto, verifica-se uma grande proximidade com os resultados de resistência à compressão de misturas artificiais com CR/REF e 25% de areia, para igual a/l (Tabela 4.7).

De acordo com Shui et al. (2009), para temperaturas de tratamento de 700 °C, a resistência à compressão em pastas de cimento reciclado (provenientes de pastas de cimento puras) de consistência normal foi de 8, 11 e 14 MPa para os 3, 7 e 28 dias de idade, respetivamente. A obtenção de pastas de consistência normal exigiu uma relação a/c de 0,63. No presente estudo foram obtidas resistências ligeiramente superiores às de Shui et al. (2009). Para uma relação a/c 11% superior, ainda assim a resistência no presente estudo foi cerca de 29% superior. Nas misturas provenientes de MM e MW, associadas a teores de ligante superiores, as resistências foram mais elevadas (Tabela 4.7). Na mistura MM mais pura, a resistência foi inclusivamente superior à do CR/REF apesar da relação a/l superior. Este aumento poderá ser atribuído a 2 fatores: efeito *filler* promovido pelas partículas finas de areia sobre as partículas de cimento reciclado e maior finura do cimento reciclado, obtido a partir da fração 125-250 µm.

Os resultados alcançados com MM, comprovam que o novo ligante obtido através da separação da matriz cimentícia existente nos detritos de betão, aquando uma separação efetiva, podem apresentar uma resistência pelo menos igual à de pastas produzidas com 100% de cimento reciclado.

Na Figura 4.37 apresenta-se a secção de rotura em flexão dos provetes produzidos com cimento reciclado, CR/REF e CR/Bet. É evidente a distinção na pigmentação dos provetes, pelo qual o provete composto por 100% de pasta de cimento hidratada e reativada exibe um cinzento escuro e o provete composto por 100% de cimento separado pelo método magnético e reativada revela um cinzento mais acastanhado (por efeito da moagem e aquecimento de partículas de agregado não removidos durante o processo de separação).



Figura 4.36. Diferença visual dos provetes produzidos: CR/REF (cima) e CR/Bet (baixo)

Conforme discutido, as resistências obtidas foram ainda penalizadas pela carbonatação a que foram sujeitos os cimentos reciclados. O princípio da reidratação do material reativado consiste na formação de novos compostos e na recristalização das fases cristalinas inicialmente já formadas da matriz cimentícia quando este é exposto à água. A redução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e C-S-H que leva à formação de elevada quantidade de calcite, reduz a capacidade de reativação do cimento reciclado.

Em suma, após os vários estudos realizados neste trabalho, conclui-se que a separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados é um processo viável.

5 Conclusão

5.1 Considerações finais

No presente ponto apresentar-se-ão as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido ao longo da campanha experimental, que tal como indicado no Capítulo 1, visava o importante objetivo de investigar e avaliar a aplicação de métodos de libertação e separação de forma a individualizar os diferentes constituintes do betão, e assim, viabilizar a produção de cimento reciclado.

Tendo em conta os resultados obtidos na campanha experimental, a viabilidade e a efetividade dos métodos foram comprovados com a aplicação de diferentes técnicas de caracterização (observação em câmara digital; difração de raios X; termogravimetria; ataque ácido; ensaios de caracterização mecânica). Visto que o estudo foi efetuado num domínio inovador cujos trabalhos publicados são ainda bastante escassos, e para o qual ainda não foi encontrado uma solução para o problema, foram confrontadas várias dificuldades que obrigaram a redefinições constantes do plano de trabalhos. Isso faz com que o trabalho desenvolvido deva ser continuado procurando otimizar as metodologias de separação propostas e exploradas no presente trabalho, bem como a consideração de procedimentos complementares que permitam incrementar o rendimento de separação.

No entanto, considera-se que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, tendo sido inclusivamente possível desenvolver uma metodologia de separação que foi recentemente submetida para um pedido de patente. Nos próximos pontos resumem-se as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho e são ainda sugeridas propostas de desenvolvimento futuro.

Os produtos obtidos no presente trabalho resultaram da separação da matriz cimentícia de blocos de betão produzidos exclusivamente para tal efeito. Os blocos foram em seguida britados e moídos até uma granulometria adequada à separação. Através dos diversos métodos de separação implementados no presente trabalho, obtiveram-se misturas finais com diferentes quantidades de matriz cimentícia na sua constituição. As efetividades dos métodos foram avaliadas com base nos diversos ensaios aplicados, nomeadamente TG, AMT, DRX, ataque ácido e análise microscópica.

Numa primeira fase, os blocos de betão foram submetidos a um procedimento de libertação mecânica, envolvendo britagem e moagem, a fim de reduzi-los para frações onde ocorra um maior destacamento da fração cimentícia aderente aos agregados. Através da análise granulométrica e análise visual concluiu-se que o uso de moinho de rolos apresentava a melhor taxa de diminuição das partículas e a melhor libertação das partículas inferior a 1 mm. Desta forma, com base na análise visual, três intervalos distintos de granulometria foram selecionados e submetidos a separação, por apresentarem melhor libertação: 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm .

Aplicando diferentes combinações de britagem e moagem, determinou-se que a combinação BMC+BMM+2R_L apresenta melhor eficiência na obtenção de material menor do que 1 mm, representando um desperdício de apenas 7% na parcela superior a 1 mm e de 10% na parcela inferior

a 125 μm (um desperdício total de 17%), enquanto que as restantes combinações, para além de representarem um maior desperdício total do material (aproximadamente de 12-38% para materiais superior a 1 mm e 7-9% para materiais inferior a 125 μm), implicam também um maior consumo de tempo e conseqüentemente, um acréscimo de energia gasta durante o seu processamento. A efetividade do presente método relativamente aos restantes métodos foi novamente comprovada pelos resultados do ensaio de AMT, do qual a amostra <125 μm do BMC+BMM+2R_L apresentou 18% de cimento e do BMC+BMM+10R, 40%, em massa, de cimento.

No processo de libertação térmico, tendo por base os resultados obtidos para as temperaturas de 300, 400 e 500 °C, o material submetido a 400 °C foi o que apresentou a melhor relação qualidade-rendimento, dado que este deu origem a uma maior percentagem de finos comparativamente com o material sujeito a 300 °C e, ainda, necessitou de um tempo mais reduzido de tratamento, correspondendo a um menor gasto energético, sem alterar de forma significativas as suas características físicas e mecânicas, conforme sucede no material submetido a 500 °C. Por outro lado, dada a particularidade do processo, foi possível obter percentagens satisfatórias de agregados limpos, quase isentos de matriz cimentícia (<1%), em cerca de 80% da amostra com dimensões entre 2-6 mm e em 70% entre 6-8 mm. No entanto, para o material superior a 8 mm, representando cerca de 40% da amostra total, a libertação foi menos favorável, sendo necessário desenvolver procedimentos complementares para esta fração.

Para os métodos de separação testados no presente trabalho, nomeadamente o método do rolo magnético, o material separado da fração de 250-500 μm foi o que apresentou menor contaminação, comparativamente com as restantes frações do mesmo método. Pelos ensaios de AMT, concluiu-se que foi possível obter produtos finais com aproximadamente 57,4; 78,8 e 51,5% de cimento, em massa, para as frações de 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , respetivamente. Para o material resultante do processo de libertação térmico, não foi possível confirmar a efetividade do método dado que a percentagem de cimento obtida pela AMT não reflete o valor real do cimento existente. Contudo, pelo ensaio de ataque ácido, foi possível verificar que a percentagem de cimento está compreendida entre 55 e 80%. Para além disso, o método magnético demonstrou bons resultados na separação de materiais cerâmicos em misturas típicas de resíduos de construção e demolição. Para partículas entre 1 e 6,3 mm, conseguiu-se separar cerca de 97% das partículas cerâmicas, ao passo que se obteve um rendimento de 90% para partículas entre 6,3 e 12 mm.

A efetividade do método de mesa *Wilfley* para a fração mais fina (125-250 μm) demonstrou ser mais elevada do que no método magnético. De acordo com os dados determinados pelo ensaio de AMT, para as frações de 125-250 μm , 250-500 μm e 500-1000 μm , obteve-se cerca de 88,1; 72,9 e 39,3% de cimento, respetivamente, nos produtos finais.

O método de mesa *Mozley*, apesar de não ser um método de separação viável para fins industriais, revelou ser um excelente método para quantificar a libertação dos materiais para as devidas granulometrias. Atendendo aos valores obtidos pelo AMT, o presente método conduziu aos materiais de maior pureza para as frações de 125-250 μm e 250-500 μm , com cerca de 93,9 e 79,8% de cimento, respetivamente. Por outro lado, para a fração de 500-1000 μm apenas se conseguiu um produto final

com 43,4% de cimento. Os valores obtidos pelo presente método vieram a confirmar a eficácia do método da mesa *Wilfley* para a fração de 125-250 μm e do método do rolo magnético para a fração 250-500 μm . Em contrapartida, os resultados obtidos nos 3 métodos confirmaram que o material da fração de 500-1000 μm apresenta uma má libertação das partículas de cimento dos agregados.

As resistências mecânicas obtidas pelas pastas produzidas com os cimentos reciclados termoativados a partir do material obtido dos detritos de betão, após implementação dos métodos de separação, foram consideradas razoáveis face a de misturas de referência de igual a/l com cimento reciclado resultante de pastas puras de apenas cimento. Aos 28 dias, todos os provetes apresentaram uma resistência à compressão igual ou superior a 13 MPa, que corresponde a cerca de 66% da resistência atingida nas misturas de referência. Destaca-se a pasta proveniente da mesa *Mozley*, que conduziu a uma resistência de 21,8 MPa, superior à da mistura de referência. De acordo com os valores de resistência mecânica obtidos nos diferentes cimentos reciclados, demonstra-se a viabilidade de reativação do cimento reciclado proveniente de detritos de betão, tendo por base as técnicas de libertação e separação implementadas.

5.2 Propostas de desenvolvimento futuro

Conforme referido, pelo facto da presente investigação ser pioneira no domínio da separação de constituintes de resíduos de betão, nomeadamente tendo por foco a recuperação da matriz cimentícia, apesar dos importantes avanços alcançados é ainda necessário desenvolver vários estudos de investigação nesta área. Em seguida sugerem-se algumas propostas de desenvolvimento futuro com o fim de aprofundar e consolidar o conhecimento neste domínio:

- Otimizar as metodologias de separação adotadas, intervindo ao nível dos vários fatores que afetam o seu rendimento, como a granulometria, o estado de humidade e de superfície das partículas e o grau de libertação atingido em etapas prévias do processo;
- Estudar e avaliar a influência da restrição das granulometrias das partículas pelos diferentes métodos de separação;
- Avaliar outras combinações de libertação a fim de otimizar a produção de material na fração de maior rendimento, que se constatou situar entre 150-500 μm ;
- Exploração de outros métodos ou procedimentos que visem um maior grau de libertação dos constituintes do betão;
- Avaliação do método magnético por via húmida a fim de avaliar a eficiência do mesmo para granulometrias inferiores;
- Avaliar a influência da carbonatação nos vários procedimentos de libertação e separação propostos, definindo medidas para a sua mitigação;
- Análise do desempenho mecânico dos cimentos reciclados provenientes dos métodos de separação, após a reativação, quando incorporado em pastas, argamassas e betões;
- Avaliação da influência da composição e relação a/c dos betões de origem na efetivação dos métodos de separação propostos;

- Explorar a definição de procedimentos que permitam a recuperação simultânea da matriz cimentícia e de agregados reciclados, bem como a caracterização de betões produzidos a partir desses resíduos de separação;
- Avaliação dos custos energéticos e do impacto ambiental associado aos procedimentos de separação propostos.

Referências Bibliográficas

Publicações escritas

Ahn J.W., Kim H.S., Han G.C., Recovery of Aggregates from Waste Concrete by Heating and Grinding, Geosystem Engineering, pp 117-122, 2001.

Ahn J.W., You K.S., Han G.C., Um N., Cho H.C., Advanced Process for Recovery of High-Quality Recycled Aggregate from Waste Concrete, Geosystem Engineering, pp 45-48, 2006.

Akbarnezhad A., Microwave-Assisted Production of Aggregates from Demolition Debris, PhD thesis, 2010

Akbarnezhad A., Ong K.C.G., Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA), Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste, pp 246-269, 2013.

Akbarnezhad A., Ong K.C.G., Zhang M.H., Tam C.T., Foo T.W.J., Microwave assisted beneficiation of recycled concrete aggregates, Constr. Build. Mater., 25 (8), pp 3469–3479, 2011.

Akhtar A. , Sarmah A.K., Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, Journal of Cleaner Production, 186, pp 262-281, 2018.

Al-Bayati H.K.A., Das P.K., Tighe S.L., Baaj H., Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials 112, pp 284–298, 2016.

Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A.K., Deoliya R., Maiti S., Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, Construction and Building Materials 68, pp 501-516, 2014.

Bogas J. A., Carriço A., Pereira M. F. C., Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars, Journal of Cleaner Production, 2019.

Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N., Ménard Y., Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste, International Journal of Mineral Processing 126, pp 90–98, 2014.

Castelo Branco F., Ferreira M.Q., Levantamento das Características dos Agregados produzidos, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2009.

Coutinho J.S., Agregados para Argamassas e Betões, Materiais de Construção 1, 1999.

Damas A.L.O.R., Caracterização de argamassas de assentamento de azulejo antigas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.

Damtoft J.S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D., Gartner E.M., Sustainable development and climate change initiatives, Cement and Concrete Research, 38, pp 115-127, 2008.

Despotović I., The Improvement of Recycled Concrete Aggregate – A Review Paper, Contemporary achievements in civil engineering 22, 4th International Conference, Subotica, Serbia, 2016.

Dearing J., Environmental magnetic susceptibility: Using the bartington MS2 system, Chi Publishing, Kenilworth, 1999.

De Juan M. S., Gutierrez P. A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 23(2), pp 872-877, 2009.

Dhir R.K., De Brito J., Silva R.V., Lye C.Q., 4- Processing of Recycled Aggregates, *Materials, Recycled Aggregates*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pp 57-88, 2019.

Durão F., Cortez L., Carvalho M.T., Separação Magnética, Nota Interna n.o1/2002, CVRM – Centro de Geosistemas, 2002.

Feldman R.F., Density and porosity studies of hydrated Portland cement, *Cement Technology*, Vol.3, No.1, pp 5-14, January-February 1972.

Florea M.V.A., Ning Z., Brouwers H.J.H., Smart crushing of concrete and activation of liberated concrete fines, Final report, Eindhoven University of Technology, 2013.

Florea M.V.A., Brouwers H.J.H., Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use, *Cement and Concrete research*, 52, pp 11-21, 2013.

Gomes P.C.C., Ulsen C., Pereira F.A. , Quattrone M., Angulo S.C., Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates, *Waste Management*, 45, pp 171-179, 2015.

Gomes A., Pinto A. P. F., Pinto B., Cimento Portland e Adições, *Materiais de Construção*, 2013.

Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D., Magnetic Susceptibility Measurements on Fly Ash Admixed Cement Hydrated with Groundwater and Seawater, *American Journal of Materials Science* 2, pp 32-36, 2012.

Guo B., Liu X., Tan X., Acidizing, *Petroleum Production Engineering*, Gulf Professional Publishing, pp 367–387, 2017.

Gupta A., Yan D.S., *Mineral Processing Design and Operation (Second Edition)*, Elsevier, pp 123-152, 169-188, 189-240, 563-628, 629-687, 689-741, 2016.

He Z., Zhu X., Wang J., Mud M., Wang Y., Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production, *Construction and Building Materials* 211, pp 965–973, 2019.

IEA, WBCSD, *Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050*. Paris, France: International Energy Agency [IEA], World Business Council for Sustainable Development [WBCSD]; 2009.

Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S., Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), pp 194-216, 2012.

Jamil M., Hassan M.K., Al-Mattarneh H.M.A., Zain M.F.M., Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques, *Materials and Structures* 46, pp 77–87, 2013.

Kappe C.O., Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis. *Angew. Chem.* 43, pp 6250-6284, 2004.

- Kim K. H., Cho H. C., Ahn J. W.**, Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill, *Minerals Engineering*, 35, pp 43-45, 2012.
- Letelier V., Tarela E., Muñoz P., Moriconi G.**, Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 132, pp 365-375, 2017.
- Lotfi S., Deja J., Rem P., Mróz R., Roekel E.V., Van der Stelt H.**, Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, pp 117–125, 2014.
- Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M.**, Impacts of booming concrete production on water resources worldwide, *Nature Sustainability*, 1, pp 69–76, 2018.
- MPA**, Cement fact sheet 6: Use of Recycled Aggregates in Concrete, London, 2013.
- Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M.**, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34, pp 965-971, 2004.
- Neto G.C.**, Argamassas com resíduos de materiais cimentícios de diferentes finuras, *Dissertação de mestrado, IST*, 2019.
- Niry R., Beaucour A.L., Hebert R., Noumowé A., Ledésert B., Bodet R.**, Thermal stability of different siliceous and calcareous aggregates subjected to high temperature. *MATEC Web of Conferences* 6, 07001, published by EDP Sciences, 2013.
- Peduzzi, P.**, Sand, Rarer Than One Thinks, *Global Environmental Alert Service (GEAS), United Nations Environment Programme*, 2014.
- Pellegrino C., Faleschini F.**, Sustainability Improvements in the Concrete Industry, Use of Recycled Materials for Structural Concrete Production, *Green Energy and Technology*, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- Pepe M., Toledo Filho R.D., Koenders E.A.B., Martinelli E.**, Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, *Construction and Building Materials*, 69, pp 124–132, 2014.
- Pinto A. P. F., Gomes A., Pinto B.**, Argamassas, *Materiais de Construção*, 2006.
- Rao M.C., Bhattacharyya S.K., Barai S.V.**, Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete, *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*, ISBN 978-981-10-6686-3, 2018
- Scrivener K.L., Snellings R., Lothenbach B.**, Chapter 5: Thermogravimetric analysis, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press, pp 178–208, 2016.
- Scrivener K.L., Crumby A.K., Laugesen P.**, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface Sci.* 12, pp 411–421, 2004.
- Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J.**, The concrete conundrum, *Chemistry World*, March 2008, *Construction*, pp 62-66, 2008(a).

- Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J.**, Innovation in use and research on cementitious material. *Cement Concrete Research*, 38, pp 128-136, 2008(b).
- Scrivener K.L., John V. M., Gartner E. M.**, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*, 114, pp 2-26, 2018.
- Serpell R., Lopez M.**, Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes, *Cement Concr. Compos.*, 39, pp 104–114, 2013.
- Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z.**, Performance enhancement of recycled concrete aggregate: A review, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp 466-472, 2016.
- Shima H., Tateyashiki H., Nakato T., Okamoto M., Asano T.**, New technology for recovering high quality aggregate from demolished concrete. In: *Proceedings of Fifth International Symposium on East Asia Recycling Technology*, pp 106–109, 1999.
- Shima H., Tateyashiki H., Matsushashi R., Yoshida Y.**, An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input- output analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3, pp 53 – 67, 2005.
- Shui Z., Xuan D., Chen W., Yu R., Zhang R.**, Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures, *Construction and Building Materials* 23, pp 531–537, 2009.
- Shui Z., Xuan D., Wan H., Cao B.**, Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment, *Constr. Build. Mater*, 22 (8), pp 1723-1729, 2008.
- Silva A.R.B.P.**, Modelo para otimização de moinho de bolas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- Sims I., Brown B.**, Concrete Aggregates: Chapter 16 in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*, pp 907-1015, 1998.
- Stafford F.N., Raupp P.F., Labrincha J.A., Hotza D.**, Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study, *Journal of Cleaner Production*, 137, pp 1293-1299, 2016.
- Svoboda J.**, *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004.
- Tam V, Tam C, Le K.N.**, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches *Resources, Conservation and Recycling*, 50, pp 82–101, 2007.
- Touzé S., Bru K., Ménard Y., Weh A., Von der Weid F.**, Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste – Effect on aggregate liberation, *International Journal of Mineral Processing*, 158, pp 68–75, 2017.
- Ulsen C., Tseng E., Angulo S.C., Landmann M., Contessotto R., Balbo J.T., Kahn H.**, Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing, *Journal of Materials Research and Technology*, 8, pp 494-502, 2018.

Vázquez E., Progress of recycling in the built environment, Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE, Springer, Berlin, 2013.

Wang J., Mu M., Liu Y., Recycled cement, Construction and Building Materials, 190, pp 1124-1132, (2018).

Wills B.A., Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, third edition, pp 342-375, 376-485, 1985.

Wills B.A., Munn T.N., Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, seventh edition, pp 238-241, 344-372, 2016.

Wills B. A., Finch J., Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Chapter 13: Magnetic and Electrical Separation, pp 381–407, 2016.

Xinwei, M., Zhaoxiang, H., Xueying, L., Reactivity of dehydrated cement paste from waste concrete subjected to heat treatment, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, pp 175-180, 2010.

Yang K.H., Jung Y.B., Cho M.S., Tae S.H., Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete, Journal of Cleaner Production, 103, pp 774-783, 2015.

Yoda K., Harada M., Sakuramoto F., Field Application and Advantage of Concrete Recycled In- situ Recycling Systems, London, Thomas Telford Services Ltd, pp 437-446, 2003.

Patentes

CN1857782A (2006). Waste concrete component separating method

CN105271858A (2014). Method for preparing recycled coarse aggregate and environment-friendly cement block with construction waste

CN107140903A (2017). Preparation method of recycled aggregate concrete

JP2009000606A (2009). Apparatus and method for regeneration of concrete waste

KR20020090354 (2002). A Manufacturing method and apparatus for recycle sand exploiting construction waste concrete

KR101379913B1 (2013). Concrete waste recycling system and method for recycling sands from concrete wastes

US7258737B2 (2007). Method for recycling concrete waste

WO2011/142663A1 (2011). Separating device

Documentos normativos

Diretiva 2009/29/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2009.

Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2008.

LNCE E 64-1979 – “Determinação da massa volumica de um cimento”

LNCE E 471-2009 – Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.

NP EN 933-1 (2014) – Análise granulométrica - Método de peneiração.

NP EN 933-4 (2002) – Determinação da forma das partículas. Índice de forma.

NP EN 1097-3 (2002) – Determinação da baridade e do volume de vazios.

NP EN 1097-6 – Determinação da massa volúmica real e da absorção de água.

NP EN 12620 (2004) – Agregados para betão.

NP EN 196-1 (2006) – Ensaio das propriedades mecânicas. Resistência a compressão da argamassa de referência.

NP EN 196-2 (2014) – Ensaio das propriedades químicas.

NP EN 196-3 (2005) – Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.

NP EN 196-6 (2010) – Método de peneiração (Resíduo no peneiro 45 µm). Método de permeabilidade ao ar (método de *Blaine*).

NP EN 451-1 (2006) – Ensaio das propriedades químicas. Teor de óxido de cálcio livre.

NP EN 12350-2 (2009) – Ensaio de abaixamento do betão fresco.

NP EN 12350-6 (2009) – Massa volúmica do betão fresco.

NP EN 12390-3 (2011) – Ensaio de compressão de um provete de betão.

EN 1015-11:1999/A1:2006 – Determinação da resistência à flexão e da resistência à compressão em argamassas.

Páginas Web

Cembureau, Activity Report 2017, <https://cembureau.eu/media/1716/activity-report-2017.pdf>, 2017, consultado em Setembro de 2019.

9111metallurgist, Mozley SuperPanner: Laboratory Mineral Separator Table, <https://www.911metallurgist.com/equipment/laboratory-mozley-super-panner/>, consultado em Agosto de 2019.

Eurostat Statistics Explained, Estatísticas dos Resíduos, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/pt, maio de 2017, consultado em Março de 2019.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Getting the Numbers Right (GNR), <https://www.wbcscement.org/GNR-2016/>, 2016, consultado em Setembro de 2019.

Zenith, mining and construction, <http://www.bestcrushersale.com/products/crusher/pfw-impact-crusher.html>, consultado em Outubro 2019

Anexos

(página intencionalmente deixada em branco)

Anexo.I. Ensaio de AMT e ataque ácido

Tabela A.I.1. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras de referência (pasta hidratada e areia <250 mm)

Método	Amostra	% areia siliciosa	% de cimento		
			150-350	350-550	150-550
Amostras Referência	100% Pasta	1,49	100	100	100
	10%Pasta+90%Areia	89,50	10,0	8,0	9,0
	25%Pasta+75%Areia	74,63	24,4	22,8	24,0
	50%Pasta+50%Areia	50,00	48,8	44,3	46,8
	75%Pasta+25%Areia	-	71,0	65,5	68,3
	90%Pasta+10%Areia	-	82,4	89,1	86,7
	100% Areia	-	0,0	0,0	0,0
	100% Brita	1,25	-	-	-

Tabela A.I.2. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras provenientes do método de rolo magnético (com os respectivos parâmetros adotados durante a separação, velocidade do sistema de doseamento (v) e abertura do divisor (a)): mistura inicial, parcela magnética (Mag) e não magnética (NãoMag).

Método	Amostra	Parâmetro		% areia siliciosa	% de cimento			
		v	a		150-350	350-550	150-550	
Moagem Rolos - Separação Magnética	125-250 Mistura	-	-	28,2	32,5	15,9	23,5	
	125-250 NãoMag	-	-	-	8,7	5,5	7,4	
	125-250 Mag1	10	1,5	18,6	50,4	36,6	43,1	
	125-250 Mag3	10	1,25	18,4	57,4	45,2	51,0	
	125-150 Mistura	-	-	-	32,8	16,7	24,0	
	125-150 Mag	10	1,4	19,5	39,6	27,3	33,2	
	150-212 Mistura	-	-	-	30,1	15,8	22,4	
	150-212 Mag	10	1,75	11,1	72,6	59,5	65,5	
	212-250 Mistura	-	-	-	18,4	13,4	16,2	
	212-250 Mag	10	1,75	7,9	76,8	67,9	72,2	
	250-500 Mistura	-	-	-	25,1	13,2	18,8	
	250-500 NãoMag	-	-	-	2,5	1,4	2,4	
	250-500 Mag1	12,5	2,5	29,5	58,0	47,4	52,6	
	250-500 Mag2	12,5	2,1	17,2	73,6	58,1	65,1	
	250-500 Mag3	12,5	1,5	13,3	78,8	54,9	65,3	
	500-1 Mistura	-	-	39,7	12,7	8,5	10,9	
	500-1 NãoMag	-	-	-	11,4	4,3	7,7	
	500-1 Mag1	15	2,4	38,3	56,2	35,1	44,5	
	500-1 Mag2	10	2,3	38,7	63,1	33,1	46,2	
	500-1 Mag3	10	1,75	33,2	51,5	30,8	40,1	
	< 125 Mistura 2RL	-	-	20,1	17,8	18,0	18,7	
	< 125 Mistura 10R	-	-	16,8	39,8	34,5	37,5	
	F400+MAC - Separação Magnética	125-250 Mistura	-	-	45,6	21,5	17,9	20,2
		125-250 NãoMag	-	-	-	14,8	12,1	13,9
125-250 Mag		10	1,75	20,0	42,7	44,2	44,6	
250-500 Mistura		-	-	69,3	9,4	11,1	11,1	
250-500 NãoMag		-	-	-	6,4	6,2	6,9	
250-500 Mag		10	2,2	21,2	44,3	49,8	48,6	
500-1 Mistura		-	-	71,7	9,9	4,7	7,4	
500-1 NãoMag		-	-	-	7,8	4,2	6,2	
500-1 Mag		10	2,3	-	-	-	-	
< 125 Mistura		-	-	16,9	11,0	49,5	35,1	

Tabela A.1.3. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras resultantes do método da mesa Wilfley: Cimento; Mistura com mais de 50% de cimento (CA); Mistura com mais de 50% de agregado (AC); Agregado (de natureza siliciosa e calcária)

Método	Amostra	% areia siliciosa	% de cimento		
			150-350	350-550	150-550
Mesa Wilfley	125-250 Cimento	6,47	88,1	38,6	59,4
	125-250 CA	-	86,9	34,4	56,5
	125-250 Agregado	-	4,3	1,4	3,1
	250-500 Cimento	20,98	72,9	55,5	63,3
	250-500 CA	-	62,0	44,3	52,4
	250-500 Agregado + AC	-	47,3	19,2	31,5
	500-1000 Cimento	43,69	39,3	27,7	33,3
	500-1000 CA	-	41,7	18,4	28,7
	500-1000 Agregado	-	13,9	3,2	8,1

Tabela A.1.4. Resultados de AMT e ataque ácido de amostras resultantes do método da mesa Mozley: cimento

Método	Amostra	% areia siliciosa	% de cimento		
			150-350	350-550	150-550
Mesa Mozley	125-250 Cimento	5,94	93,9	52,1	69,7
	250-500 Cimento	19,87	79,8	44,8	59,7
	500-1000 Cimento	46,74	43,4	23,3	32,3

Anexo.II. Difração de raios X (DRX)

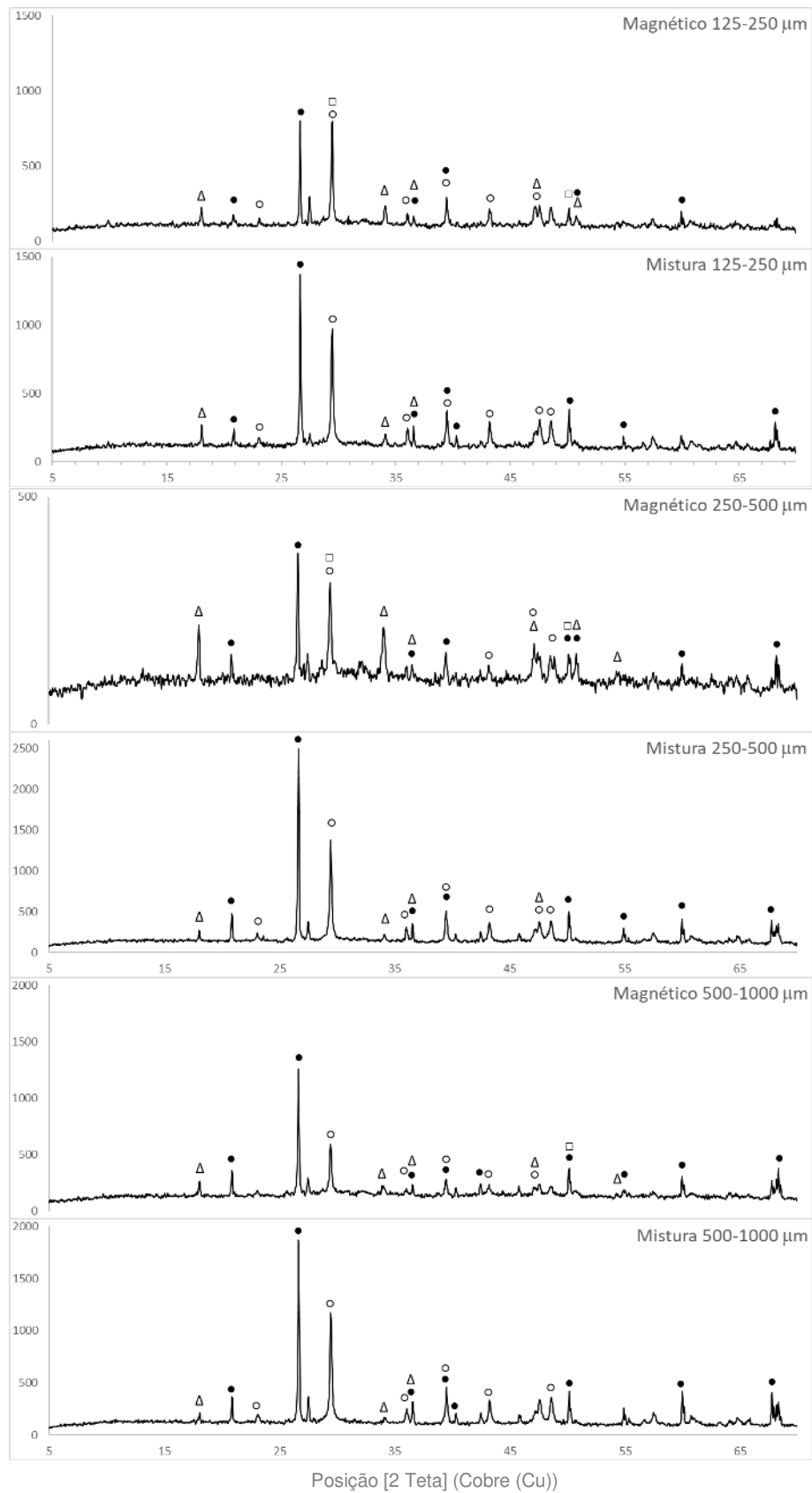


Figura A.II.1. Resultado de DRX das amostras de mistura inicial e magnética do método de RM (Δ-portlandite; ●-quartz; ○- calcite; ◇- etringite; □- silicatos cálcicos hidratados)

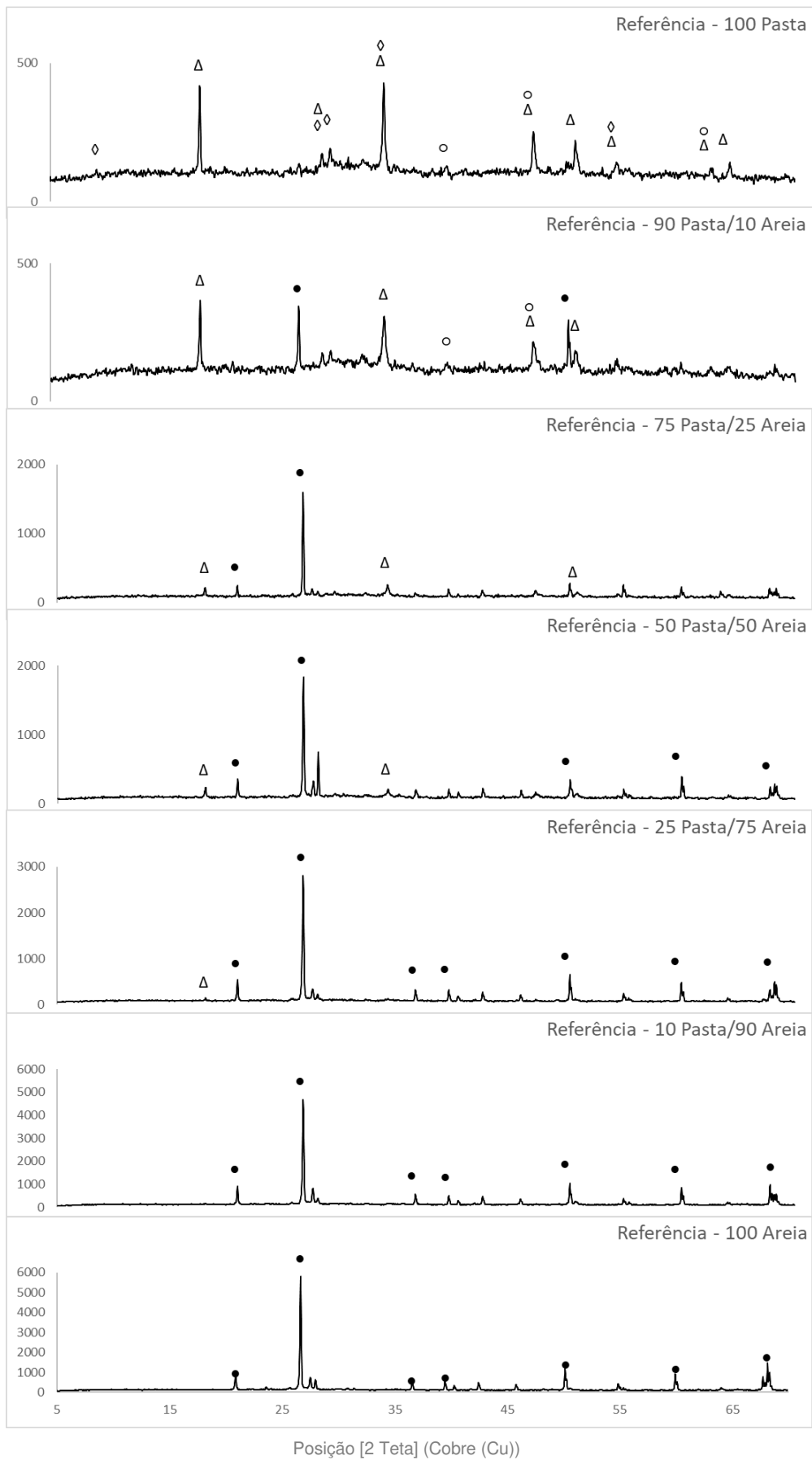


Figura A.II.2. Resultado de DRX das amostras de referência: Δ -portlandite; \bullet - quartzo; \circ - calcite; \diamond - etringite

Anexo.III. Ensaio de resistência à compressão

Tabela A.III.1. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 3 dias

Idade de ensaio - 3 dias									
Composição	a/l	Flexão				Compressão			
		F (kN)	f _{cti} (MPa)	f _{ctm} (MPa)	C.V. (%)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)	C.V. (%)
CR/REF	0,71	1,25	2,93	2,93	-	25,66	16,04	13,3	21,0
		16,74	10,46						
CR/Bet	0,71	1,00	2,34	2,34	-	15,60	9,75	9,4	3,3
		14,60	9,13						
MW	0,75	1,08	2,52	2,52	-	16,21	10,13	10,2	0,6
		16,42	10,26						
MM	0,72	-	-	-	-	22,27	13,92	13,8	0,7
		21,94	13,71						
75/25 REF	0,72	0,95	2,23	2,23	-	15,24	9,53	9,3	2,7
		14,43	9,02						

Tabela A.III.2. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 7 dias

Idade de ensaio - 7 dias									
Composição	a/l	Flexão				Compressão			
		F (kN)	f _{cti} (MPa)	f _{ctm} (MPa)	C.V. (%)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)	C.V. (%)
CR/REF	0,71	0,80	1,88	1,88	-	28,33	17,71	18,9	6,4
		32,22	20,14						
CR/Bet	0,71	1,40	3,28	3,28	-	18,27	11,42	11,9	3,6
		19,65	12,28						
MW	0,75	1,27	2,97	2,97	-	22,70	14,19	13,8	2,8
		21,48	13,43						
MM	0,72	-	-	-	-	-	-	-	-
75/25 REF	0,72	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela A.III.3. Resultado dos ensaios de resistência mecânica dos provetes CR/REF, CR/Bet, MW, MM e 75/25 REF aos 28 dias

		Idade de ensaio - 28 dias							
Composição	a/l	Flexão				Compressão			
		F (kN)	fcti (MPa)	fctm (MPa)	C.V. (%)	F (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	C.V. (%)
CR/REF	0,71	1,45	3,40			30,3	18,94		
				3,28	3,6	34,35	21,47	19,65	5,5
		1,35	3,16			31,1	19,44		
						30	18,75		
CR/Bet	0,71	1,05	2,46			20,25	12,66		
				2,46	0,0	21,45	13,41	12,95	2,2
		1,05	2,46			20,5	12,81		
						20,65	12,91		
MW	0,75	1,47	3,44	3,44	-	24,72	15,45	15,3	0,8
						24,33	15,21		
MM	0,72	-	-	-	-	34,84	21,78		
						36,00	22,50	21,8	2,7
						33,67	21,04		
75/25 REF	0,72	1,00	2,34	2,34	-	18,14	11,34	11,3	0,1
						18,11	11,32		