



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

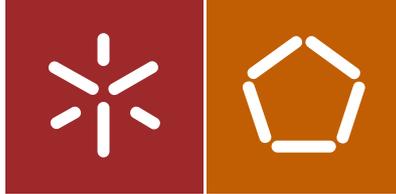
Carina Raquel Cruz Gonçalves

Incorporação de areias e escórias  
de fundição em argamassas e betões

Carina Raquel Cruz Gonçalves  
Incorporação de areias e escórias  
de fundição em argamassas e betões

UMinho | 2017

janeiro de 2017



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Carina Raquel Cruz Gonçalves

Incorporação de areias e escórias  
de fundição em argamassas e betões

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Aires F. Camões de Azevedo

*“Interesso-me pelo futuro, porque é lá que vou passar o resto da minha vida.”*

Charles Kettering

Aos meus pais e irmão!



## AGRADECIMENTOS

A moldagem do conhecimento de cada pessoa é feita na partilha de experiências, momentos, valores, ideias e amizades. É impossível aguçar o nosso engenho isolado do mundo, e é deste modo, que quero exprimir com a maior gratidão, a todos os que ajudaram na realização deste trabalho. Deixo algumas palavras, poucas, mas com um profundo sentimento de agradecimento.

Ao meu pai por ser o meu porto seguro, pela confiança inigualável, por todas as palavras de carinho, pelo seu apoio em todas as minhas decisões, pelo enorme esforço e dedicação. Por todo o amor que prova ter por mim todos os dias.

À minha mãe por ser o meu exemplo de força e coragem. Pela forma como me incutiu a força de viver, pelo amor incondicional, por sempre me incentivar perante os desafios a fazer mais e melhor. Por ser a mulher que mais prezo.

Ao meu irmão por ter sempre acreditado em mim e em tudo o que faço, pelo orgulho e admiração que nutre por mim e pelo amor e carinho sinceros que sempre me ofereceu e continua a oferecer todos os dias.

Ao João Nuno pela compreensão, pelo companheirismo e ajuda, e sobretudo pela amizade que permitiu que cada dia fosse encarado com particular motivação.

Às minhas amigas Carina, Renata, Sofia, Ana, Isabel, Vânia, Rita, Joanas, Diana, Ilda, Zé, Vera e Raquel por todos os momentos de força e amizade partilhados, pela entajuda e por tudo. Cada uma de vocês sabe o que significa para mim.

Aos meus amigos Dani, David, Bruno, Max, Ricardo e João que me acompanharam desde o 1º ano e pela amizade verdadeira que criámos.

À família do Café Universidade, pois sem dúvida vocês são uma família de coração que criei. Obrigada por todas as palavras de carinho e de força que me deram nos piores momentos, pela preocupação e amizade pura. Um especial agradecimento ao Boss.

Ao Professor Doutor Aires Camões, o meu sincero agradecimento pela orientação neste projeto. Muito obrigada pelo excelente profissionalismo, por todo o auxílio e apoio prestados, pela total disponibilidade, pelo incentivo e boa disposição em todos os momentos. O seu contributo foi essencial para que chegasse ao fim deste trabalho com um enorme sentimento de satisfação.

Ao Professor Engenheiro César Cardoso, com quem tive o orgulho e privilégio de trabalhar, agradeço todos os estímulos, desafios e essencialmente toda a ajuda para a realização deste projeto. Agradeço também pela experiência e amabilidade. O seu apoio foi determinante na elaboração desta Tese.

A todos os colegas e técnicos de laboratório, Carlos Jesus e Fernando Poke, ligados ao departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, quer pela ajuda e disponibilidade bem como pelo bom ambiente de trabalho criado, ambiente esse que fez com que a parte laboratorial deste projeto fosse mais facilmente realizada.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho com quem me cruzei, que contribuíram para o enriquecimento da minha formação académica e que, de certa forma, fizeram-me ser parte de quem sou hoje.

A todos, o meu mais sincero OBRIGADO!

Tenho a certeza que esta conquista também é vossa.

## RESUMO

Sendo originados por todas as atividades humanas, os resíduos, tanto em relação à sua composição como à quantidade produzida, variam em função das práticas de consumo e dos métodos de produção. As principais preocupações centram-se nas consequências dos seus efeitos no que concerne à saúde humana e ao meio ambiente, seguindo-se as questões de carácter social e económico. Os resíduos produzidos pela indústria são particularmente preocupantes, pois quando incorretamente orientados transformam-se numa grave ameaça. O aumento da produção destes resíduos tem exigido soluções eficazes e investimentos por parte das entidades gestoras. Além disso, a crescente industrialização nos países em desenvolvimento tem influência sobre estes resíduos, pois passam a ser produzidos em regiões nem sempre preparadas para processá-los ou, pelo menos, para armazená-los adequadamente. Até pouco tempo atrás, depositá-los em aterros industriais era a única maneira encontrada pelas empresas para dar destino a esses resíduos, porém, atualmente, a indústria da construção civil apresenta-se como grande potencial na solução desses problemas, através da sua incorporação nos materiais de construção. Assim, a substituição de parte da areia natural por areias e escórias de fundição em argamassas e betões pode vir a diminuir o custo da produção dos mesmos, e também vir a melhorar algumas das suas propriedades físicas e mecânicas. Diante deste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o efeito da incorporação de areias e escórias de fundição em argamassas e betões, prevendo-se a sua aptidão para produtos de construção de matriz cimentícia, por intermédio da análise dos resultados duma campanha experimental entretanto realizada. Para o efeito, em argamassas e betões, fez-se variar a percentagem de substituição de areia por uma areia de fundição ou escória, e comparou-se o desempenho obtido com o de uma composição padrão, cujo fabrico não implicou o uso de resíduos.

São assim comparados e analisados os resultados de ensaios de caracterização física e mecânica de argamassas produzidas com areia natural como agregado fino, com os correspondentes obtidos em argamassas em que se substituiu parcialmente a areia por areias e escórias do setor da fundição, nas percentagens de 25%, 50%, 75% e 100% em massa e, posteriormente, em betões cuja substituição da areia natural foi feita por uma escória de fundição.

Relativamente aos ensaios, determinou-se a resistência à compressão aos 3, 7, 28, 56 e 90 dias, a absorção de água por capilaridade e por imersão aos 28 dias, a migração de cloretos também aos 28 dias, o coeficiente de carbonatação aos 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56 e 90 dias e a suscetibilidade à reação álcalis-agregado. Foram também efetuados os ensaios de Los Angeles e de retração. Relativamente ao betão fresco, foram realizados ensaios de abaixamento e foram medidas a massa volúmica real e a massa volúmica aparente, absorção de água e baridade. Foram ainda realizadas análises granulométricas das várias composições.

**Palavras-chave:** Areias de fundição; Escórias de fundição; Argamassas; Betões; Valorização de Resíduos.



## ABSTRACT

Being originated by all human activities, the waste, both in terms of its composition and quantity produced, they vary according to consumption practices and production methods. The main concerns are the consequences of their effects on human health and the environment, following social and economic issues. The waste produced by the industry is particularly worrying because when incorrectly targeted it becomes a serious threat. The increase in the production of these wastes has required effective solutions and investments by the managing entities. In addition, increasing industrialization in developing countries has an influence on these wastes, since they are produced in regions not always ready to process them or at least to store them properly. Until a short time ago, depositing them in industrial landfills was the only way found by companies to give them waste, but nowadays the construction industry presents itself as a great potential in solving these problems by incorporating them into the construction materials. Thus, replacing some of the natural sand with sands and slag casting in mortars and concrete may reduce the cost of producing them and also improve some of their physical and mechanical properties. In this context, the present study aims to analyze, through normative tests, the effect of the incorporation of sand and slag foundry in mortar and concrete, predicting its suitability for cement matrix construction products. For this purpose, the percentage of replacement of sand crushed by casting sand or slag and the standard composition was varied, and the standard composition, whose manufacture does not imply the use of waste.

The results of the physical and mechanical characterization of mortars produced with natural sand as fine aggregate are compared and analysed, with the corresponding results obtained in mortars in which the sand was partially replaced by sands and slag in the foundry sector, in the percentages of 25%, 50%, 75% and 100% by mass, and later in concrete whose replacement of the natural sand is made by a foundry slag.

For the tests, the compressive strength was carried out at 3, 7, 28, 56 and 90 days, water absorption by capillarity and by immersion at 28 days, migration of chlorides also at 28 days and determination of the carbonation coefficient at 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56 and 90 days, alkali-aggregate reaction, Los Angeles test and retraction assay. With respect to fresh concrete, lowering tests were carried out and the actual bulk density and bulk density, water absorption and apparent density were measured. Granulometric analyzes of the various compositions were also performed.

**Keywords:** Foundry sands; Foundry slag; Mortars; Concrete; Waste Appreciation.



## ÍNDICE

1.	Introdução e Motivação do Trabalho .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Organização do Documento.....	4
2.	Incorporação de resíduos sólidos em matriz cimentícia .....	7
2.1	Introdução .....	7
2.2	Resíduos sólidos industriais.....	10
2.2.1	Classificação .....	11
2.2.2	Alternativas de utilização dos resíduos na construção civil.....	12
2.2.3	A Indústria Global de Fundição.....	14
2.3	Areia de fundição.....	15
2.3.1	Processo de Fundição.....	16
2.3.2	Composição da areia de fundição .....	18
2.3.3	Tipos de areia de fundição .....	20
2.3.3.1	Areia verde.....	20
2.3.3.2	Areia ligada quimicamente .....	21
2.3.4	Utilização de Areia de Fundição em Argamassas e Betões.....	22
2.4	Escórias de fundição .....	32
2.4.1	Processo de produção.....	33
2.4.2	Forno de indução elétrica.....	34
2.4.3	Betão contendo escórias.....	35
2.5	Conclusões finais face aos estudos desenvolvidos .....	37
3.	Materiais e métodos de ensaio .....	39
3.1	Introdução .....	39

---

3.2	Materiais utilizados.....	40
3.2.1	Cimento.....	40
3.2.2	Água.....	40
3.2.3	Adjuvantes.....	41
3.2.4	Areias e britas naturais.....	41
3.2.4.1	Análise granulométrica.....	41
3.2.4.2	Massa volúmica aparente.....	42
3.2.5	Areias de fundição.....	43
3.2.5.1	Análise granulométrica.....	44
3.2.5.2	Massa volúmica e absorção de água.....	44
3.2.5.3	Baridade e volume de vazios.....	45
3.2.6	Escórias de fundição.....	45
3.2.6.1	Análise granulométrica.....	45
3.2.6.2	Massa volúmica e absorção de água.....	47
3.2.6.3	Baridade e volume de vazios.....	47
3.2.6.4	Resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles.....	47
3.2.6.5	Massa volúmica real.....	49
3.3	Preparação da matéria-prima, composições e cura.....	52
3.3.1	Processo de britagem dos resíduos.....	52
3.3.2	Formulações e metodologia.....	54
3.3.2.1	Argamassas.....	54
3.3.2.2	Betões.....	55
3.4	Métodos de ensaio.....	56
3.4.1	Massa volúmica fresca.....	56

3.4.1.1	Betões.....	56
3.4.1.2	Argamassas .....	57
3.4.2	Teor de ar .....	57
3.4.2.1	Betões.....	57
3.4.3	Ensaio de abaixamento .....	57
3.4.3.1	Argamassas .....	57
3.4.3.2	Betões.....	58
3.4.4	Resistência à rotura por flexão.....	59
3.4.4.1	Argamassas .....	59
3.4.5	Resistência à rotura por compressão.....	59
3.4.5.1	Argamassas .....	59
3.4.5.2	Betões.....	59
3.4.6	Absorção de água.....	60
3.4.6.1	Por capilaridade, em argamassas .....	60
3.4.6.2	Por capilaridade, em betões .....	61
3.4.6.3	Por imersão, em betões .....	62
3.4.7	Coeficiente de difusão de cloretos .....	62
3.4.7.1	Betões.....	62
3.4.8	Resistência à carbonatação .....	63
3.4.8.1	Betões.....	63
3.4.9	Ensaio de retração .....	63
3.4.9.1	Argamassas .....	63
	Ensaio potencial de reação álcalis-agregado.....	65

---

s.....	65
3.4.10.....	65
3.4.10.1 Argamassas .....	65
4. Apresentação e análise de resultados .....	67
4.1 Argamassas .....	67
4.1.1 Caracterização no estado fresco.....	67
4.1.2 Caracterização no estado endurecido.....	68
4.1.2.1 Resistência à rotura por flexão.....	68
4.1.2.2 Resistência à rotura por compressão.....	73
4.1.2.3 Absorção de água por capilaridade.....	77
4.2 Escolha justificativa do resíduo a incorporar em betões.....	84
4.3 Betões.....	85
4.3.1 Caracterização no estado fresco.....	85
4.3.2 Caracterização no estado endurecido.....	86
4.3.2.1 Resistência à rotura por compressão.....	86
4.3.2.2 Absorção de água por imersão.....	91
4.3.2.3 Absorção de água por capilaridade.....	92
4.3.2.4 Coeficiente de difusão de cloretos.....	94
4.3.2.5 Resistência à carbonatação.....	98
4.3.2.6 Ensaio de retração.....	100
4.3.2.7 Ensaio potencial de reação álcalis-agregado.....	102
5. Considerações finais .....	105
5.1 Conclusões .....	105
5.2 Trabalhos futuros .....	107

Referências bibliográficas.....	109
6. Sites Consultados.....	117



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um ciclo total de materiais (Callister, W., 2000) ....	9
Figura 2 - Produção global de fundidos entre 1998 e 2009 (Casotti, B. <i>et al.</i> , 2011) .....	14
Figura 3 - Exemplo de modelo e molde de areia .....	17
Figura 4 - (a) Micrografia de uma areia sem bentonita (b) Micrografia mostrando a areia coberta por uma camada de bentonita (Pereira, D. <i>et al.</i> , 2000).....	19
Figura 5 - Resistência média à compressão das argamassas com 30% de resíduo e sem resíduo (Armange, L., 2005).....	22
Figura 6 - Microestrutura da amostra de cimento Portland sem resíduo mostrando os cristais de etringite (Armange, L., 2005) .....	23
Figura 8 - Comparação da resistência média à compressão dos pavimentos de betão com 30 dias de cura natural, fabricados por vibração e por vibro-compressão (Watanabe, F., 2004)..	25
Figura 9 - Formação do hidróxido de cálcio na interface pasta/agregado observada sobre os pavimentos fabricados por vibração com 25% de resíduo (Watanabe, F., 2004).....	26
Figura 10 - Morfologia do C-S-H e ausência de grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nos pavimentos fabricados por vibro-compressão com 25% de resíduo (Watanabe, F., 2004) .....	27
Figura 11 - Efeitos dos resíduos de areia de fundição no comportamento do betão em estado fresco - Slump test (Guney, Y. <i>et al.</i> , 2010) .....	28
Figura 12 - Efeito dos resíduos de areia de fundição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade (Guney, Y. <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figura 13 – Curvas granulométricas dos materiais utilizados .....	42
Figura 14 - Recipiente cilíndrico em aço.....	43
Figura 15 – Curvas granulométricas das areias de fundição.....	44
Figura 16 - Granulometria das escórias de fundição .....	46

Figura 17 – Curvas granulométricas escórias de fundição e areia.....	46
Figura 18 – Preparação do material para ensaio .....	48
Figura 19 – Equipamento utilizado.....	48
Figura 20 – Colocação da amostra no tambor juntamente com as esferas de aço .....	49
Figura 21 – Material recolhido após ensaio .....	49
Figura 22 – Lavagem da amostra.....	50
Figura 23 - Picnómetro .....	50
Figura 24 – Espalhamento da Ecc no tabuleiro .....	51
Figura 25 – Agregado completamente deformado.....	52
Figura 26 – Exemplo de fragmentos de escórias de fundição de ferrosos (Ece).....	53
Figura 27 – Britadeira utilizada .....	53
Figura 28 – Compactação em mesa vibratória.....	56
Figura 29 - Manómetro .....	57
Figura 30 – Realização do ensaio de espalhamento.....	58
Figura 31 – Medição dos diâmetros em direções perpendiculares .....	58
Figura 32 – Ensaio de abaixamento no Cone de Abrams .....	58
Figura 33 - Exemplo dos provetes utilizados para o ensaio de resistência à flexão .....	59
Figura 34 - Colocação dos provetes em água para ensaio de absorção por capilaridade .....	60
Figura 35 - Colocação dos provetes em água a uma profundidade de 5mm .....	61
Figura 36 - Impermeabilização com parafina .....	63
Figura 37 - Moldagem dos provetes .....	64

Figura 38 - Equipamento utilizado para medição da variação das extensões.....	64
Figura 39 - Formação de gel .....	65
Figura 40 - Resistência à flexão das argamassas aos 7 dias .....	71
Figura 41 - Resistência à flexão das argamassas aos 28 dias .....	72
Figura 42 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias.....	75
Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.....	76
Figura 44 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ece .....	77
Figura 45 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ecc .....	78
Figura 46 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ev .....	78
Figura 47 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Afa .....	79
Figura 48 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Afp .....	79
Figura 49 - Variação do coeficiente de absorção capilar em função da % de substituição .....	83
Figura 50 - Representação gráfica dos valores de resistência à compressão aos 28 dias .....	87
Figura 51 - Representação gráfica dos valores de resistência à compressão em 5 idades.....	89
Figura 52 - A/C vs Resistência à compressão.....	90
Figura 53 - Representação gráfica dos valores de absorção de água por imersão das formulações de betão .....	91
Figura 54 - Curvas médias de absorção capilar das formulações de betão.....	92
Figura 55 - Representação gráfica dos coeficientes de absorção capilar para as formulações de betão.....	93
Figura 56 - Representação gráfica dos valores do coeficiente de difusão de cloretos das formulações de betão .....	94

Figura 57 - A/C vs Coeficiente de difusão de cloretos .....	95
Figura 58 - Massa volúmica fresca vs Coeficiente de difusão de cloretos .....	96
Figura 59 - Absorção por imersão vs Coeficiente de difusão de cloretos .....	97
Figura 60 - Absorção por capilaridade vs Coeficiente de difusão de cloretos.....	97
Figura 61 - Representação gráfica dos valores da profundidade média de carbonatação para as formulações de betão .....	98
Figura 62 - Representação gráfica dos valores da resistência à carbonatação para as formulações de betão .....	100
Figura 63 - Retração total, autógena e por secagem ao longo do tempo .....	101
Figura 64 - Perda de massa média total e autógena ao longo do tempo .....	101
Figura 65 - Formação de gel na solução de NaOH (à direita) e fissuras nos provetes de argamassa com Ecc (à esquerda) .....	102

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Composição da areia de fundição (Armange, L. 2005).....	18
Quadro 2 - Resíduos de areias e escórias de fundição utilizados .....	39
Quadro 3 - Características químicas do cimento (Secil, 2004).....	40
Quadro 4 - Características mecânicas do cimento (Secil, 2004) .....	40
Quadro 5 - Características físicas do cimento (Secil, 2004).....	40
Quadro 6 - Caracterização física e mecânica dos agregados utilizados.....	43
Quadro 7 - Caracterização física e mecânica das areias de fundição .....	45
Quadro 8 - Características físicas e mecânicas das escórias de fundição .....	47
Quadro 9 - Resíduos utilizados no fabrico de argamassas e processo de transformação .....	52
Quadro 10 - Resultados do espalhamento das argamassas .....	67
Quadro 11 - Resultados dos valores da massa volúmica fresca.....	68
Quadro 12 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ece .....	69
Quadro 13 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ecc .....	69
Quadro 14 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ev .....	70
Quadro 15 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Afa .....	70
Quadro 16 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Afp .....	71
Quadro 17 - Resistência à compressão para argamassas com Ece .....	73
Quadro 18 - Resistência à compressão para argamassas com Ecc .....	73
Quadro 19 - Resistência à compressão para argamassas com Ev .....	74
Quadro 20 - Resistência à compressão para argamassas com Afa .....	74

Quadro 21 - Resistência à compressão para argamassas com Afp .....	75
Quadro 22 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ece.....	81
Quadro 23 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ecc.....	81
Quadro 24 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ev .....	82
Quadro 25 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Afa.....	82
Quadro 26 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Afp .....	83
Quadro 27 - Resultados dos ensaios de caracterização no estado fresco dos betões.....	85
Quadro 28 - Valores da resistência à compressão aos 28 dias.....	86
Quadro 29 - Valores da resistência à compressão para as várias formulações em 5 idades.....	88
Quadro 30 – Resultados médios da absorção de água por imersão das formulações de betão.	91
Quadro 31 - Resultados médios do coeficiente de difusão de cloretos das formulações de betão .....	94
Quadro 32 – Valores da profundidade média de carbonatação para as formulações de betão.	98
Quadro 33 - Valores da resistência à carbonatação para as formulações de betão.....	99
Quadro 34 - Valores médios da expansão por reação álcalis-agregado.....	102

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	99
----------------	----



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ASIC – Agregado Siderúrgico Inerte para Construção

Afa – Areia de fundição amarela

Afp – Areia de fundição preta

Ecc – Escória cinza clara

Ece – Escória cinza escura

Ev – Escória verde

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico

LER – Lista Europeia de Resíduos

EGF – Escória granulada de fundição

SiO<sub>2</sub> – Óxido de silício

MgO – Óxido de magnésio

K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio

TiO<sub>2</sub> – Dióxido de titânio

MPa – Mega Pascal

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

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

Ph – Potencial de hidrogénio

DRX – Difração de raios-X

FRX – Fluorescência de raios-X

MEV – Microscopia eletrónica de varrimento

VPU – Velocidade do pulso ultrassom

AFF – Areia de fundição de ferrosos

AF – Areia de fundição

$\mu\text{m}$  – Picómetro

mm – milímetro

LA – Los Angeles

g – gramas

$\rho$  – massa volúmica

v – volume

cm – centímetros

N/seg – Newton por segundo

NaOH – Hidróxido de sódio

mL – mililitros

l – litros

# 1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

## 1.1 Enquadramento

Todos os anos, grandes quantidades de subprodutos industriais são produzidas pelas mais variadas indústrias.

A crescente e ilimitada industrialização, conjugada a outros fatores tais como o crescimento populacional e a diversificação no consumo de bens e serviços, fez com que os resíduos se tornassem graves problemas ambientais, deixando os limites do planeta cada vez mais tangíveis no que diz respeito à extração de matéria-prima e ao uso dos recursos naturais. Assim, a necessidade de se encontrarem novas soluções para a enorme variedade de resíduos que se encontram atualmente em depósito é uma motivação permanente das sociedades atuais.

A indústria da construção é, provavelmente, a solução ideal para reutilizar milhões de toneladas de vários subprodutos industriais devido principalmente ao grande volume de matéria-prima que consome. As vantagens do uso desses resíduos como matéria-prima em produtos de construção são, essencialmente, a redução do consumo dos recursos naturais e, também, a redução do consumo de energia nos processos de extração dessa matéria-prima e no seu processamento, o que contribui para a diminuição da libertação de gases de efeito de estufa. Esta solução reduz também o depósito em aterro de grandes volumes de resíduos e ainda conduz, potencialmente, a produtos de menor custo.

Diante deste contexto, considerando o avanço da tecnologia e diversos estudos já realizados, quer em meio académico, quer em empresas nacionais e internacionais, vêm sendo realizadas pesquisas com a finalidade de atribuir um destino mais adequado e correto para estes resíduos.

Assim, a reciclagem e reutilização de resíduos sólidos industriais tem sido fundamental na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a preservação de recursos naturais não renováveis, através da substituição destes por materiais alternativos, com propriedades adequadas ao uso.

Um dos maiores problemas do setor de fundição é a geração de resíduos sólidos, constituídos principalmente pelas denominadas areias residuais ou areias de fundição e escórias. Atualmente existem empresas que reutilizam as areias de fundição nos diferentes processos das fábricas, através da regeneração da areia, sendo uma alternativa técnica e economicamente viável. Tem-se também a reciclagem de escórias e a sua incorporação como matéria-prima na

construção civil, podendo, quando adequadamente empregues, apresentar excelente desempenho técnico e económico além da importância ambiental associada.

Desta forma, substituir parte da areia natural (na produção de argamassas e betões), constitui uma aplicação mais nobre, sendo atrativo do ponto de vista económico, para além de que este emprego permite excelentes vantagens energéticas, com menor impacto ambiental, com a diminuição da formação de gases de efeito de estufa, especialmente de CO<sub>2</sub>, que é prejudicial à atmosfera, bem como permite contribuir para a economia de energia e preservação de recursos naturais, qualificando-se como uma prática sustentável.

Além disso, quando esta areia é lançada inadequadamente no aterro, ou este não é monitorado corretamente, pode haver alteração das características físicas, químicas e biológicas do solo e da água, originando um sério risco ambiental, para além de reduzir o espaço de áreas produtivas, agrícolas, habitáveis ou de preservação. Pode ainda acarretar um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais exigem que as empresas destinem os seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos e ficam as empresas sujeitas a todas as responsabilidades em caso de contaminação.

Para além dos aspetos ambientais e sustentáveis, podem, também, surgir vantagens a nível do melhoramento das propriedades físicas e químicas do betão, conseguidas com a introdução destes resíduos na sua composição. Assim, será como se se juntasse o útil ao agradável, criando-se uma aliança entre dois objetivos diferenciados, mas que interagem, com o propósito final de promover um desenvolvimento sustentável e uma gestão adequada dos resíduos.

Atualmente, o betão é constituído com cada vez mais adições minerais que possuem características que lhe conferem propriedades específicas. Este é um material estrutural versátil e muito difundido, devido às vantagens que apresenta como baixo custo, adequação a formas variadas, fácil execução, excelente resistência à compressão, entre outras. Apesar destas vantagens, que proporcionam o seu uso diversificado, pode apresentar alguns inconvenientes como a sua porosidade e permeabilidade que o podem tornar mais vulnerável à ação de agentes agressivos externos, podendo criar problemas quanto à sua durabilidade (Ferreira, A., 1999).

Até há poucos anos atrás, o principal enfoque dos projetistas de estruturas de betão armado era relacionado com as propriedades mecânicas do betão, designadamente a resistência à compressão. Porém, ultimamente, as preocupações com os custos de manutenção, reforço e

recuperação das estruturas têm provocado uma mudança nesse comportamento (Isaia, G., 1995 e Helene, P., 1993).

A tecnologia do betão concentrava-se na obtenção de altas resistências, pois acreditava-se que betões mais resistentes eram betões mais duráveis. No entanto, atualmente sabe-se que estas propriedades devem ser avaliadas com mais cuidado, considerando sempre as condições de exposição das estruturas de betão.

A penetração de água, cloretos e outros iões agressivos no betão são os fatores mais importantes nos processos de deterioração físicos e químicos, e, sobretudo, é a microestrutura do betão que controla os fenómenos físicos/químicos associados aos movimentos da água e ao transporte de iões no betão (Mehta, P. e Aïtcin, P., 1990, *apud* Oh, B. *et al.*, 2002).

Deste modo, são necessários e valorizáveis estudos que colaborem no conhecimento e desenvolvimento de materiais alternativos. A indústria da construção enquadra-se, então, neste contexto, como uma opção viável de destino para estes resíduos, uma vez que empregando-se adições minerais, consideradas resíduos de outras indústrias no betão, podem-se alterar essas propriedades menos favoráveis e, ao mesmo tempo, obter uma vantagem ecológica.

## **1.2 Objetivos**

A definição dos objetivos e o planeamento dos ensaios a realizar são as premissas que marcam o arranque de qualquer estudo mas, na verdade, são itens que nunca estão completamente definidos, sofrendo várias alterações com o decorrer do trabalho. As respostas que vão sendo obtidas com os resultados de determinados ensaios podem orientar o trabalho de modo diferente do definido inicialmente, pela razão de se querer compreender os comportamentos observados, e de forma a dar resposta a questões que entretanto passam a integrar a lista dos objetivos.

O tema proposto para a presente dissertação advém da necessidade de dar vazão à maior quantidade possível de resíduos, produzidos pelas indústrias e/ou outros setores, resultantes de processos de incineração/combustão de resíduos urbanos, fundição de minério ferroso, entre outros. Estes resíduos constituem uma enorme problemática ambiental, pois têm vindo a acumular-se em aterros, acabando por ter impactos indesejáveis a vários níveis.

Mais ainda, pretende-se avaliar as possibilidades de melhoria de uma areia granítica britada fina, geralmente empregue na constituição de betões, de fraca qualidade pois contém uma grande quantidade de finos e matéria friável. A utilização desta areia no betão leva ao aumento

da quantidade de água da amassadura, o que proporciona um decréscimo de desempenho dos betões, só atenuado por intermédio da adição de uma maior quantidade de cimento.

Deste modo, o objetivo será avaliar o efeito da incorporação de areias e escórias de fundição em argamassas e betões, prevendo-se a sua aptidão para produtos de construção de matriz cimentícia, demonstrando assim a potencialidade das diferentes soluções de valorização dos resíduos, que poderão ser usados em alternativa a recursos minerais naturais.

Com a execução de uma campanha experimental e respetiva avaliação dos resultados obtidos, analisar-se-ão as características do produto resultante e, assim, concluir se a incorporação dos resíduos na produção de betões acarreta benefícios ou desvantagens a vários níveis de avaliação e aplicação.

### **1.3 Organização do Documento**

Este documento está dividido em 5 capítulos, cada capítulo referente a uma etapa concluída do processo de avaliação do caso de estudo. Assim, cada uma destes capítulos contempla os seguintes objetivos:

O capítulo 1 refere-se à introdução ao tema, onde contextualiza o tema envolvido no caso de estudo, dando uma breve perspetiva da sua importância na engenharia civil. É neste capítulo que se clarificam os objetivos pretendidos na escrita desta dissertação e, por fim, disponibiliza ao leitor um resumo do que será apresentado ao longo deste documento.

O capítulo 2 é designado por “Incorporação de resíduos sólidos em matriz cimentícia” e refere-se a variados conceitos indispensáveis à concretização deste estudo, assim como investigações que já foram realizadas dentro do tema desta dissertação. Este capítulo auxilia na compreensão e discussão dos resultados.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados, bem como a respetiva caracterização geométrica, física e mecânica e os métodos de ensaio utilizados nesta investigação.

No capítulo 4 são exibidos os resultados obtidos, bem como uma análise dos mesmos de forma a entender se a inclusão de areias e escórias de fundição em argamassas e em betões em substituição da areia britada natural como agregado fino é vantajosa, que se classifica como objetivo principal desta investigação.

No capítulo 5 são abordadas de forma crítica as conclusões gerais sobre os resultados obtidos, tendo sempre por perto a intenção de clarificar e contribuir para um melhor entendimento no que diz respeito ao tema em questão. Este capítulo finaliza com sugestões para trabalhos futuros baseadas no desenvolvimento e conclusões da pesquisa, que possam esclarecer ou aprofundar as limitações agora encontradas.

No final do documento são apresentadas as referências bibliográficas e os sites consultados.



## 2. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA

### 2.1 Introdução

As economias modernas consomem recursos naturais (matérias-primas) de forma crescente na produção de bens e serviços. No betão, os agregados definem-se como sendo o seu “esqueleto”, ocupando cerca de 70 a 80% do seu volume. Os agregados são na sua maioria de origem natural, levantando sérias questões para uma sociedade do século XXI. Segundo a *European Aggregates Association* (UEPG, 2015) foram produzidos só na Europa, cerca de 2,66 biliões de toneladas de agregados em 2015, das quais 31 milhões geradas em Portugal. Tal exploração de recursos naturais provocará, a médio e longo prazo, uma debilidade ambiental comprometendo o ecossistema para as gerações futuras. A contabilização de fluxos de recursos naturais, incluindo processos de extração, produção, fabrico, reciclagem e deposição final revela também uma crescente preocupação pelo facto de o ambiente ser o destino final de todos os resíduos gerados (Pelino, M., 1997). Esta temática tem recebido grande atenção devido à integração entre a economia e o ambiente: Jänick, M. *et al.* (1989) referem que “a esperança para uma reconciliação entre a economia e ecologia reside, em grande medida, na premissa de que um decréscimo da entrada de recursos na economia irá conduzir a uma redução na quantidade de emissões e resíduos, e também nos custos de produção”.

Apesar de todos os esforços e das novas considerações económicas e políticas, a geração de resíduos sólidos tem vindo a aumentar em quantidade e diversidade nas últimas décadas, em todo o mundo. Só nos países europeus da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico) entre 1990 e 1995, a produção de resíduos sólidos aumentou em 11%. A quantidade total de resíduos gerados na Europa em 1995 foi estimada em 1,3 biliões de toneladas, prevendo-se que em 2010, caso não sejam implementadas novas medidas que controlem esse crescimento, a produção de resíduos de plásticos, papel e vidro seja 40 a 60% superior aos níveis de 1990 (Confederação das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal, 2016).

Os resíduos ou subprodutos decorrentes da atividade industrial são os que apresentam, à partida, maior dificuldade de manuseamento, pela sua complexidade e potencial toxicidade. Representam grandes perdas económicas e acarretam impactos negativos de natureza ambiental e social, dado que a sua reintrodução no processo produtivo é muitas vezes difícil ou mesmo impossível, destacando-se os resíduos resultantes do setor da fundição neste estudo.

Em Portugal, a situação atual destes tipos de resíduos é a seguinte (Castro, F. e Teixeira, T., 2014):

- Pós de forno a arco elétrico: são gerados cerca de 30 000 ton/ano. Se os preços do zinco são altos, são reciclados fora do país. Se os preços do zinco são baixos, são despejados em aterros para resíduos perigosos;
- Areias de fundição usadas: geraram cerca de 80 000 ton/ano, quase todas sendo enviadas para aterros, sendo apenas uma pequena parte incorporada na produção de clínquer;
- Escórias dos fornos de fundição: geradas em torno de 5 000 ton/ano, todas depositadas em aterro.

Contudo, estudos recentes demonstraram que uma ampla variedade de resíduos pode substituir os materiais convencionais. Tal facto tem alertado as indústrias para o desenvolvimento de alternativas tecnológicas, ao nível do processamento e até mesmo do consumo de matérias-primas, a fim de poupar recursos para as gerações futuras e preservar o ambiente. Em alguns casos, surgiu a oportunidade de desenvolver novos materiais e novos produtos, com características físicas e mecânicas semelhantes ou até mesmo melhoradas quando comparadas aos materiais e produtos convencionais (Nunes, P. *et al.*, 2012).

O reaproveitamento de resíduos pode passar por diferentes soluções em termos de destino final, tais como o recobrimento de aterros sanitários ou selagem de lixeiras (recuperação paisagística); reciclagem por incorporação em produtos existentes (por exemplo em matrizes cerâmicas ou vítreas) ou inovadores; incineração e coincineração (aproveitamento energético e incorporação da fração inorgânica num produto – exemplo clínquer); e co-compostagem com resíduos sólidos urbanos.

A reciclagem de resíduos industriais não é uma questão simples e focalizada em termos de conhecimento. Pelo contrário, requer conhecimentos multidisciplinares, que se baseiam em técnicas de engenharia, princípios de economia, das ciências sociais e das técnicas de planeamento urbano e regional (Pelino, M., 1997). Na busca de soluções viáveis tecnologicamente assume particular relevo o papel da área de conhecimento em Ciência e Engenharia de Materiais, pela abrangência de competências sobre produtos e processos produtivos (Callister, W., 2000). De facto, os materiais desempenham um papel crucial na problemática de relações entre tecnologia, economia e ambiente. A sua utilização atravessa diferentes fases, descritas na figura 1, naquilo que engloba o designado “Ciclo de vida dos

materiais”.

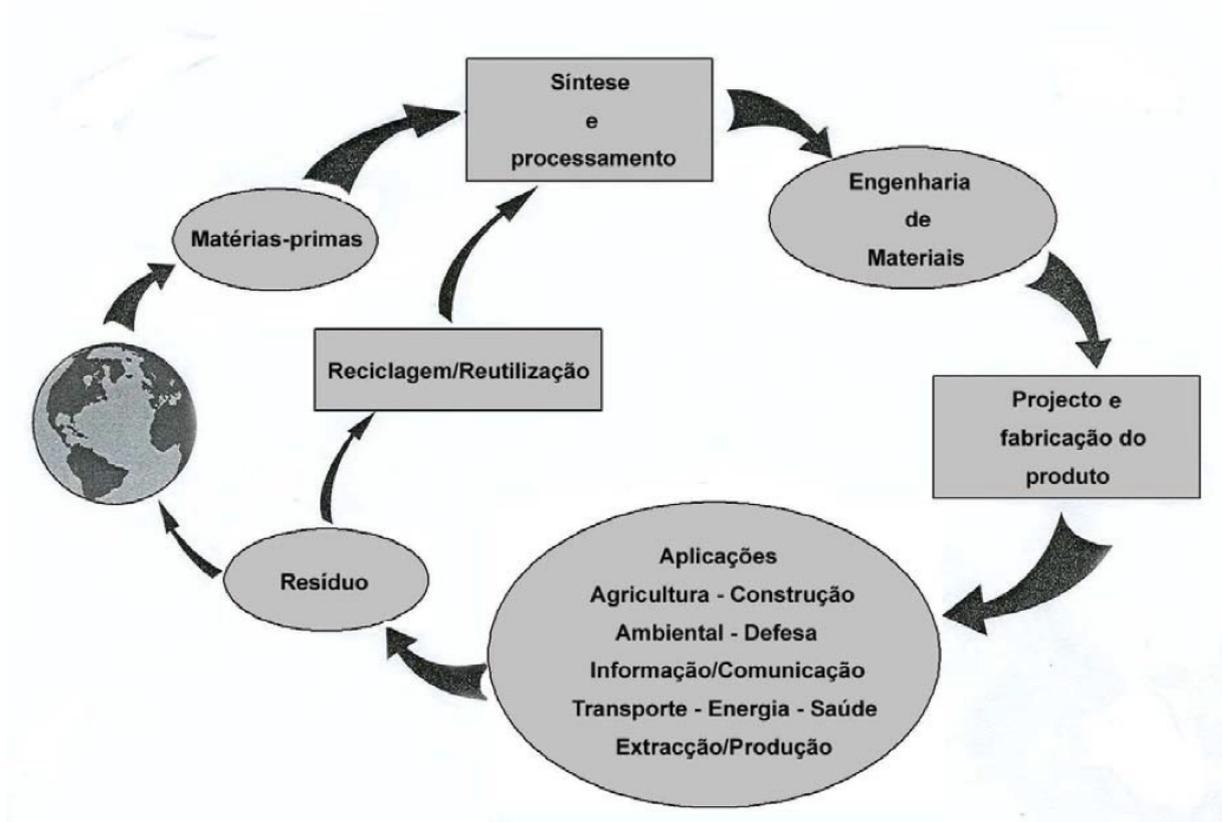


Figura 1 - Representação esquemática de um ciclo total de materiais (Callister, W., 2000)

Porém, existem ainda alguns requisitos para um agregado, porque o seu tipo influencia fortemente o desempenho do betão na sua função, quer a nível de resistência, durabilidade e segurança.

A nível físico é importante o agregado possuir uma granulometria e uma forma adequadas, uma vez que vai influenciar os níveis de trabalhabilidade, durabilidade e desempenho.

A noção de granulometria está fortemente relacionada com a noção de compactabilidade. É desejável que qualquer agregado possua uma granulometria o mais extensa possível para que no ato de amassadura, este se “funda” com a pasta do cimento de forma a tornar a peça estrutural o mais compacta possível.

Em termos mecânicos, é importante averiguar o valor da resistência do agregado de forma a prever, uma vez que o agregado é um dos principais agentes de resistência, as suas solicitações limite.

A nível químico, é necessário conhecer o tipo mineralógico dos constituintes dos agregados de forma a prever se estes terão, no futuro, reações adversas comprometendo a durabilidade e, até mesmo, a segurança da estrutura.

## **2.2 Resíduos sólidos industriais**

Os resíduos sólidos são substâncias, produtos ou objetos que ficaram incapazes de utilização para os fins que foram produzidos, ou são restos de um processo de produção, transformação ou utilização e, em ambos os casos, pressupõem que o detentor tenha que se desfazer deles (Formosinho, S., 2000). Tornaram-se um grande problema, atualmente, devido à sua inevitabilidade, à sua crescente multiplicação e às condições cada vez mais limitantes para o seu descarte final. Com o constante aumento populacional mundial, o consumo em geral é crescente e, portanto, a produção de resíduo também é crescente (Teixeira, E., 2000).

Resíduos industriais podem ser fontes de poluição de ar, água e solo. Também afetam o crescimento de plantas e vegetação, além de serem perigosos à saúde quando contêm metais radioativos e pesados além dos limites permitidos (Rai, A. *et al.*, 2002).

No caso da indústria de fundição, esta contribui para a limpeza do ambiente ao consumir as mais diversas sucatas metálicas, mas por outro lado gera apreciáveis volumes de resíduos sólidos não-metálicos, além de efluentes gasosos e líquidos, resultantes da degradação de materiais auxiliares empregados. Os resíduos sólidos gerados pelas fundições são compostos principalmente por escórias, restos de refratários, poeiras diversas (dos gases dos fornos, dos sistemas de rebarbagem, da grenalhagem) e areias de fundição (Mariotto, C., 2000).

Quanto à indústria siderúrgica, as escórias de alto-forno e aciaria correspondem a cerca de 75% do total dos resíduos de uma siderurgia. São as principais responsáveis pela tipificação dos resíduos siderúrgicos como volumosos e de baixa toxidez (Krüger, P., 1995).

Em função das restrições quanto a emissões e disposição de resíduos serem crescentes e tendendo a se irradiar para todo o mundo, a indústria siderúrgica caminha inexoravelmente para soluções de reciclagem dos resíduos por elas gerados (Krüger, P., 1995).

Nesta fase, colaboram as obras de engenharia, que utilizam grandes quantidades destes materiais, apresentando desta forma um potencial para a utilização dos mais diversos resíduos gerados pela indústria.

A possibilidade de reutilização de resíduos tem motivado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reaproveitar estes resíduos na construção, destacando-se o emprego das escórias verde, cinza escura e cinza clara e areias de fundição amarela e preta, todos empregues neste estudo.

### **2.2.1 Classificação**

O estudo da reutilização destes resíduos de fundição como matéria-prima total ou parcial dentro da construção civil leva inicialmente à necessidade de os caracterizar e quantificar, definindo as etapas de manuseio, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização e disposição final. Assim, torna-se necessário determinar as características físicas, químicas, biológicas ou infetocontagiosas presentes na sua constituição, através da avaliação dos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, concebendo manuseio e destinos adequados aos mesmos. De acordo com o DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, os resíduos definem-se de acordo com a sua origem (urbanos, industriais, agrícolas, hospitalares e de construção e demolição) e as suas características:

- a) Resíduos Sólidos Perigosos: São aqueles que apresentam, pelo menos, uma característica de perigosidade para a saúde ou para o ambiente. As principais características que conferem periculosidade a um resíduo são: explosão, combustibilidade, inflamabilidade, nocividade para a saúde (por inalação, ingestão ou penetração cutânea), irritabilidade, toxicidade; cancerígenos, infecciosos, corrosivos, entre outros;
- b) Resíduos Sólidos Inertes: São os resíduos que, quando depositados em aterro, não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não podem ser solúveis nem inflamáveis, nem terem quaisquer outros tipos de reações físicas ou químicas. Também não podem ser biodegradáveis, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entrem em contacto e cujos lixiviados não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e/ou subterrâneas;
- c) Resíduos Sólidos não Perigosos: resíduos que não apresentem características de perigosidade para o ambiente e para a saúde pública.

Os resíduos sólidos inertes e não perigosos podem ser incinerados ou dispostos em aterros sanitários, desde que preparados para tal fim e que estejam submetidos aos controlos e monitoramento ambientais. Os resíduos sólidos perigosos somente podem ser dispostos em

aterros construídos especialmente para tais fins, ou devem ser queimados em incineradores especiais.

Segundo a Lista Europeia de Resíduos - LER (Portaria n.º 209/2004), os resíduos sólidos industriais distribuídos por classe apresentam-se como:

- Classe I: Resíduos Sólidos Perigosos - 5%;
- Classe II: Resíduos Sólidos Inertes - 84%;
- Classe III: Resíduos Sólidos não Perigosos - 11%.

Destaca-se que do total de resíduos da classe I, encontram-se resíduos nos estados sólidos, líquidos e pastosos. Oriundos principalmente das indústrias metalúrgicas, vestuário, calçados e produtos de tecidos e têxtil, contendo metais pesados. As areias de fundição, que agregam aglomerantes e resinas, representam 20% do total dos resíduos classe I. Já para os resíduos da classe III, os principais componentes consistem nas areias de fundição e moldagem, nos resíduos inorgânicos e nas escórias de fundição, onde o setor metalúrgico aparece como principal gerador dos mesmos.

Esta classificação é uma etapa fundamental na caracterização dos resíduos gerados pelos diversos setores industriais, crucial para a seleção dos processos de tratamento e deposição final dos mesmos, principalmente devido a aspetos de ordem económica ou de responsabilidade ambiental.

### **2.2.2 Alternativas de utilização dos resíduos na construção civil**

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que consome entre 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (John, V. 2000).

Além de consumir grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, é geradora de poluição (para cada tonelada de clínquer produzido mais de uma tonelada de CO<sub>2</sub> é produzida) (Bilodeau, A. e Malhotra, V., 2000).

Ora, boa parte dos resíduos produzidos podem ser reutilizados ou reciclados, podendo assim ser reaproveitados possibilitando a redução do uso de recursos naturais, a redução de necessidade de energia para a sua extração, a redução de transporte dos mesmos, a redução do volume utilizado nos aterros sanitários e industriais (aprovados ou não, traduzindo-se num

elevado risco de acidentes ambientais), a redução dos custos totais, diretos ou indiretos na construção de habitações, infraestruturas ou obras sociais.

O sector da fundição de ferrosos tem como principais resíduos as areias de fundição, de moldagens ou de machos (vazados ou não vazados), as escórias dos fornos, os refratários usados e as poeiras (dos gases dos fornos, dos sistemas de rebarbagem, da grenalhagem). A generalidade destes resíduos é classificada como resíduos inertes ou não perigosos, sendo a sua forma de gestão mais usual, até ao presente, a deposição em aterros controlados, existindo então um grande interesse de se viabilizar a utilização destes resíduos industriais na construção civil. Alguns estudos já têm vindo a ser realizados, nomeando-se alguns deles de seguida.

Vale notar a contribuição de Mello, J. (2004) que analisou a avaliação e desempenho da possibilidade da incorporação de areia verde de fundição em argamassa colante externa para assentamento de material cerâmico. Realizaram-se ensaios físicos e químicos na areia de fundição e na argamassa com a substituição do resíduo. Além destes, efetuaram análises por estereoscópio, por microscópio eletrónico de varrimento da areia verde, para descobrir se este resíduo teria ou não alguma influência sobre as propriedades e características do produto final. Os provetes foram moldados com traços com incorporação de resíduo em 25%, 50% 75% e 100% em substituição à areia. Com estes provetes foram realizados os ensaios de resistência à compressão e de aderência, para determinação da percentagem a ser convencionada a passar por ensaios que visaram o comportamento da argamassa pelo ponto de vista ambiental, sendo determinado o teor de 50%.

Outro aspeto levantado por Mello, J. (2004) quanto aos resultados apresentados foi que à medida que a percentagem de areia verde incorporada aumentava, tanto a resistência à compressão como a de aderência diminuiu sensivelmente, também ocorrendo uma aumento na absorção e no índice de vazios. Quanto aos ensaios de lixiviação, todos os resultados dos produtos analisados enquadraram-se nos requisitos normativos.

O trabalho de Biolo, S. (2005) analisa a reutilização de areia de fundição na produção de blocos cerâmicos. Foram avaliadas diferentes misturas com adição deste resíduo na massa cerâmica, sendo produzidos traços com 5%, 10% e 20% e um traço de referência com 0% de adição de resíduo. As propriedades foram avaliadas através dos ensaios de retração linear, absorção de água, resistência à flexão em quatro pontos, composição química, todos conforme preconizam as normas respetivas. A queima dos blocos foi realizada em diferentes temperaturas. O estudo

em planta industrial foi realizado com blocos de seis furos na adição de 10% de areia de fundição. Os resultados de laboratório quanto à resistência mecânica foram às dosagens de 5% e 10% de adição de resíduo com a queima em temperatura de 900° C. Com os resultados da indústria comparados com regulamentações em norma, comprovou-se que para blocos com 10% de areia de fundição está apta a sua comercialização. A autora concluiu então que a reciclagem do resíduo mostrou-se possível para o fabrico de blocos de cerâmica vermelha para construção civil.

### 2.2.3 A Indústria Global de Fundição

Segundo estudos recentes, estima-se que a produção global de fundidos alcança hoje 90 milhões de toneladas, denotando-se um número colossal à escala global com tendência a crescer. A Figura 2 apresenta um gráfico com o volume da produção de fundidos entre os anos de 1998 a 2009. Durante os anos de 2000 até 2008, a indústria de fundição mostrou um crescimento consistente de 4,5% por ano, até a eclosão da crise financeira internacional, no fim de 2008. (Casotti, B. *et al.*, 2011).

Com a crise, a produção de fundidos apresentou um decréscimo de 2% frente a 2007 – a primeira queda em oito anos. A partir de 2010, no entanto, a produção de fundidos apresentou recuperação, principalmente em função do desempenho das economias emergentes que hoje é responsável pela maior parte da produção mundial. Nestes locais as pressões ambientais ainda não são tão fortes e a legislação não é tão restritiva (Casotti, B. *et al.*, 2011).

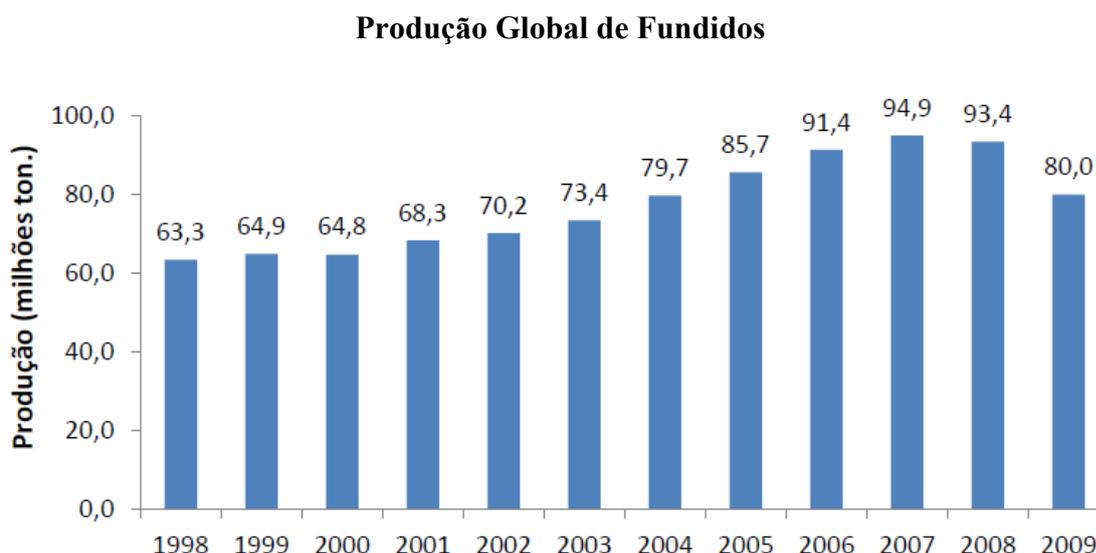


Figura 2 - Produção global de fundidos entre 1998 e 2009 (Casotti, B. *et al.*, 2011)

A China ocupa desde 2007 a posição de maior produtora mundial de fundidos, seguida pelos Estados Unidos e a Rússia. No fim da década de 1990 a liderança cabia aos Estados Unidos, seguido pelo Japão. O crescimento acelerado dos setores de infraestrutura, siderurgia e da indústria automotiva na China na última década impulsionou o aumento da produção chinesa de fundidos (Casotti, B. *et al.*, 2011).

### **2.3 Areia de fundição**

A areia de fundição é um subproduto de metais ferrosos e não ferrosos das indústrias de fundição, nas quais tem sido usada durante séculos como um material de moldagem devido à sua condutividade térmica. O setor da fundição recicla e reutiliza a areia várias vezes com sucesso. No entanto, quando esta já não pode ser reutilizada, por perda de volume ou descaracterização de alguns componentes da mistura, é removida da fundição e é denominada de areia de fundição (Siddique, R. *et al.*, 2011).

A areia de fundição é um produto composto pela mistura de alguns elementos, sendo o principal componente a “areia base”, que é constituída essencialmente por sílica (óxido de silício –  $\text{SiO}_2$ ) de formato sub-angular, com tamanhos de grão variando entre 0,15 mm e 0,6 mm. Areias revestidas com resina, areias de  $\text{CO}_2$ , etc. são alguns tipos comuns de areia ligada quimicamente (Siddique, R. & Singh, G., 2011; Singh, G. & Siddique, R., 2012). Além da areia base, pó de carvão, bentonita e água são adicionados à mistura. A bentonita é um silicato de alumina hidratado, formado por lamelas e que contém na sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio. O pó de carvão é formado por material volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre (Pereira, F. *et al.*, 2005).

Existem muitas receitas para a proporção de argila, mas todas são destinadas a atingir diferentes equilíbrios entre maleabilidade, acabamento superficial e capacidade de receber o metal fundido quente para reproduzir o desenho-de-produto (Singh, G. e Siddique, R., 2012), assim como compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos, expansividade volumétrica, permeabilidade e seja de perfeita desmoldagem (Bonin, A., 1995). Em função das suas características plásticas, a bentonita possibilita moldes uniformes, compactos e que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. A sua função coesiva confere resistência suficiente à caixa de moldagem, que possibilita que a mesma não se rompa durante o processo de vazamento (Carnin, R., 2008).

### 2.3.1 Processo de Fundição

“A indústria da fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários, fornecendo na sua maioria peças fundidas para diversas outras indústrias.” (Biolo, S., 2005).

A matéria-prima metálica para a produção de peças fundidas é constituída pelas ligas metálicas ferrosas (ligas de ferro e carbono) e não-ferrosas (ligas de cobre, alumínio, zinco e magnésio). Mais de 70% do total de subproduto material consiste em areia, pois os moldes são confeccionados geralmente em areia de fundição (a areia sintética, composta por uma mistura de areia, argila e água; a areia verde, que contém areia siliciosa; e a areia seca, utilizada quando se precisa de peças com melhor acabamento ou estabilidade dimensional, que contém aditivos que melhoram as suas propriedades), que é facilmente disponível, económica, resistente a danos causados pelo calor e facilmente colados com pasta e outros materiais orgânicos no molde. A indústria da fundição usa areia de sílica de alta qualidade de tamanho específico para a sua moldagem e processo de fundição (Singh, G. e Siddique, R., 2012).

Este é considerado o método de moldagem mais utilizado em todo o mundo e resume-se no processo pelo qual os metais ou ligas metálicas em estado líquido (fundido) são vazadas num molde para o fabrico dos mais variados tipos de peças, objetos decorativos, joias/bijuterias, carcaças de máquinas, lingotes e outros. Em muitos casos, a fundição é o processo mais simples e económico de se produzir uma peça, principalmente quando esta é de grande porte, de geometria intrincada ou com canais internos e cavidades. É um dos processos mais antigos e também um dos mais versáteis.

O processo de fundição inicia-se com a preparação da areia de moldagem para a confeção dos moldes, sucedido pelo escoamento do metal líquido nestes moldes, originando as peças metálicas, conforme projetadas inicialmente (Lima, G. *et al.*, 2013). Os procedimentos podem ser resumidos nas seguintes etapas:

- Confeção do modelo: Esta etapa consiste em construir um modelo com o formato aproximado da peça a ser fundida. A modelação é realizada com areia verde (areia ligada com argila) sendo compactada em torno do molde até uma determinada dureza. Esse modelo vai servir para a construção do molde e as suas dimensões devem prever a contração do metal quando este solidificar. Estes moldes são produzidos em duas metades, que são facilmente retiradas sendo confeccionados os canais de respiro, também

chamados de vazamento (Lima, G. *et al.*, 2013). Quando são montadas estas duas metades, origina-se uma peça, que no seu interior formam a cavidade onde deverá ser preenchida posteriormente pelo metal líquido (Biolo, S., 2005);

- Confeção dos machos: “a parte em que são fabricados os núcleos de areia. Os machos são dispositivos também feitos de areia e lingotes que são resistentes e duros para serem fixados dentro do molde” (Lima, G. *et al.*, 2013). Necessários para peças ocas a serem fabricadas, pois o macho irá impedir a propagação do metal fundido pelos vasos internos (Biolo, S., 2005);

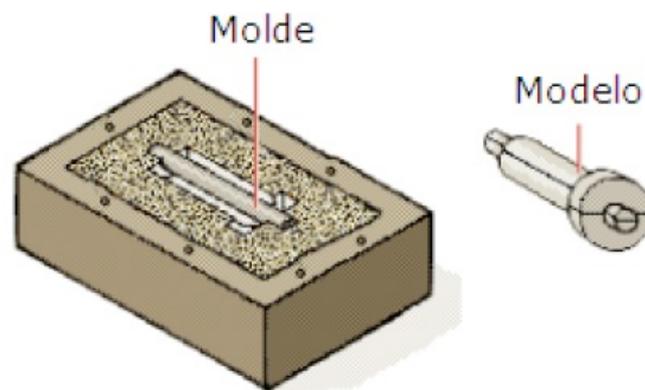


Figura 3 - Exemplo de modelo e molde de areia

- Fusão: aquecimento da matéria-prima até atingir o seu ponto de liquefação, gerando resíduos tais como escórias dos fornos, pós do sistema de exaustão dos fornos, sucatas metálicas impróprias para o processo e pó de matérias-primas (Lima, G. *et al.*, 2013);
- Vazamento: enchimento do molde com o metal líquido;
- Desmoldagem: após o arrefecimento, esta fase incide na quebra do molde, retirando a peça fundida, ainda no estado bruto (Lima, G. *et al.*, 2013);
- Quebra de canais: “Consiste na quebra do sistema de alimentação da peça fundida. Origina resíduos como sucatas e areias de fundição” (Lima, G. *et al.*, 2013);
- Acabamentos: os canais são cortados e os acabamentos são feitos através de cilindros rotativos e demais ferramentas que visam melhorar o aspeto visual (Lima, G. *et al.*, 2013);

- Tratamento térmico: este tratamento tem por objetivo melhorar a resistência mecânica e corrosiva dos materiais, tornando as estruturas de acordo com as especificações.

Posteriormente, as peças metálicas seguem para os processos de acabamento e controle de qualidade, onde são removidas as rebarbas existentes no acabamento e posteriormente encaminhadas para o processo de maquinagem, quando este é solicitado pelo cliente. Finalmente, as peças recebem uma proteção superficial pela aplicação de óleo ou pintura (Lima, G. *et al.*, 2013).

### 2.3.2 Composição da areia de fundição

Pereira, D. *et al.* (2000) ressalva que a areia por si só não tem resistência mecânica apropriada para formar o molde (no qual será vazado o metal líquido). Essa propriedade é aferida por um aglomerante que tanto pode ser orgânico como mineral. Entre eles, os mais frequentemente aplicados são as argilas e as bentonitas.

Segundo Carnin, R. *et al.* (2010), a areia de fundição é preparada por meio da descarga de areia nova e areia usada, com a quantidade de água calculada por meio de um controlador de compatibilidade, de maneira que a areia entre na máquina de moldar com a humidade final pretendida.

A quantidade de água certa para o teor de bentonita pode ser verificada no momento em que é efetuada a mistura, podendo esta ser corrigida (Schulz, 2005 *apud* Carnin, R. *et al.*, 2010). Os demais aditivos são injetados no recipiente de mistura, que funciona continuamente.

O misturador é o elemento principal para a preparação de areia de fundição, onde são misturadas a areia lavada e a areia de retorno, bentonita ativada e natural, pó de carvão e água.

Segundo Armange, L. (2005), a areia de fundição constitui na sua composição diferentes percentagens de cada componente, conforme o quadro 1.

Quadro 1 - Composição da areia de fundição (Armange, L. 2005)

Composto	Peso (%)
Areia de retorno	60
Areia base	34 a 37
Bentonita	1 a 4
Pó de carvão	0,2 a 2
Água	Quantidade necessária para trabalhabilidade da areia

Cada componente da areia de fundição tem a sua função. A areia de sílica é o material mais utilizado como areia base, sendo a porção maior em função da existência de grandes reservas deste material na natureza. Este material resiste a alta temperatura e quanto maior for a sua percentagem maior será a refratariedade da areia, sendo que o grau de refratariedade exigido de uma areia de moldagem depende do metal que se deseja vaziar. A argila bentonítica (ou bentonita) liga os grãos de areia entre si. A figura 4 apresenta a micrografia de uma areia sem bentonita (Figura 4a) e a micrografia da areia envolvida por bentonita (Figura 4b) (Pereira, D. *et al.*, 2000).

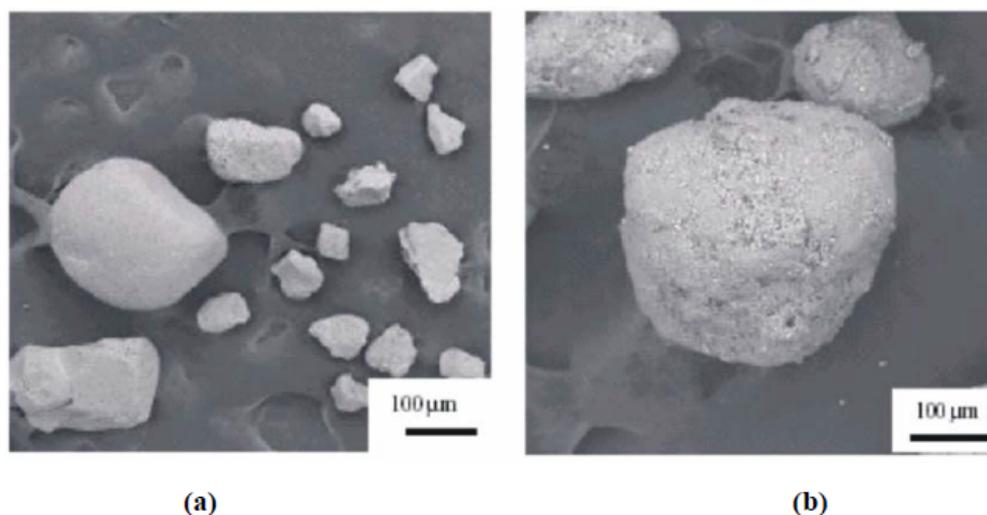


Figura 4 - (a) Micrografia de uma areia sem bentonita (b) Micrografia mostrando a areia coberta por uma camada de bentonita (Pereira, D. *et al.*, 2000)

As bentonitas são encontradas basicamente sob duas formas, a mais comum tendo o sódio como cátion trocável predominante (bentonita sódica) e outra com cátion trocável de cálcio ou magnésio (bentonita cálcica). As bentonitas sódicas possuem a propriedade de expandir até 20 vezes o seu volume quando molhadas, devido ao cátion sódio trocável (Santos, P., 1992). A bentonita sódica produz uma “estrutura aberta” na areia (propriedade peculiar de crescimento em presença de água) de onde advém maior permeabilidade do molde, que associada a uma menor humidade resulta em moldes com menores probabilidades de gerarem peças com defeitos (bolha de gás) (Watanabe, F., 2004).

Mas as propriedades mais importantes das argilas são a sua estrutura lamelar fina e a sua capacidade de adsorver iões metálicos (capacidade de troca de cátions  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{++}$ ).

A água ativa a ação de ligação das partículas de argila na areia, pelas ações de forças moleculares ou ligações polares, adicionando plasticidade. Essa ligação argila-água-sílica é a base da resistência a verde das misturas de moldagem areia-argila.

Além da areia base, argila e água costuma-se adicionar à areia de moldagem outros produtos a fim de melhorar algumas propriedades. A incorporação de aditivo tem a função de compensar deficiências no processo de mistura e conseqüente insuficiência da dispersão de argila e água sobre os grãos de areia, elevar a resistência a seco, modificar propriedades a altas temperaturas, resistência a quente e plasticidade a quente.

O aditivo carbonáceo evita a fusão de areia sobre a superfície de vazamento. Os ingredientes menores absorvem a humidade e melhoram a fluidez da areia. (Singh, G. e Siddique, R., 2012). O pó de carvão é composto basicamente de carbono e de aproximadamente 1,5% de enxofre (Armange, L., 2005).

### **2.3.3 Tipos de areia de fundição**

São dois os principais tipos de areias de moldagem (ou areias de fundição): “areia verde” e a “areia ligada quimicamente”, que são definidos de acordo com o processo ligante adotado.

Para confeccionar os moldes, que dão forma às superfícies externas da peça a ser fundida, utiliza-se a areia aglomerada com argila, e para confeccionar os machos, que conformam as superfícies internas das peças, utilizam-se as areias aglomeradas com resinas sintéticas, que geralmente são de origem fenólica.

De qualquer modo, um agente de ligação, de argila ou baseado quimicamente, é adicionado às areias para conservar a forma do molde e o arrefecimento durante o vazamento. As fundições de ferro fundido originam uma grande quantidade de resíduos: um quarto a uma tonelada de resíduos sólidos por fundição, sendo que destes resíduos 30-60% consistem de núcleo e areias de moldagem (Park, C. *et al.*, 2012).

#### **2.3.3.1 Areia verde**

Segundo Carnin, R. (2008), toda a areia aglomerada com argila e moldada no estado húmido designa-se de “areia verde” e, nestes casos, os moldes não sofrem secagem previamente ao vazamento. Estes moldes devem adquirir resistência suficiente para atender às solicitações que irão sofrer isto é, boa colapsibilidade, permeabilidade e reutilização.

A areia verde é composta de materiais de ocorrência natural, os quais são misturados, areia de sílica de alta qualidade (85-95%), argila de bentonita (4-10%) como um ligante, um aditivo carbonáceo (2-10%), para melhorar o acabamento da superfície de fundição e de água (2-5%), resultando em areia de cor preta, em decorrência do teor de carbono. As areias verdes também podem conter vestígios de produtos químicos, tais como MgO, K<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub> (Siddique, R. e Singh, G., 2011; Singh, G. e Siddique, R., 2012).

Conforme anteriormente mencionado, a argila mais usada como aglomerante da areia verde é a bentonita. As características coesivas e refratárias da bentonita são alteradas quando ocorre o vazamento do metal fundido. A alta temperatura elimina as moléculas de água que estão presentes entre as suas lamelas. A perda de tais características exige que haja constante reposição da bentonita (Carlin, R., 2008).

Mais de 70% da produção mundial de fundidos é realizada pelo processo de moldagem por areia verde. Este processo, além de permitir o fabrico de peças de tamanhos bem variados, permite também conformar praticamente todas as ligas metálicas, sendo um dos poucos processos que podem ser utilizados para metais de alto ponto de fusão, como aços, níquel e titânio (Adegas, R., 2007).

### **2.3.3.2 Areia ligada quimicamente**

Quando as peças a serem fundidas apresentarem cavidades ou detalhes, torna-se necessário colocar no interior dos moldes de areia, peças sólidas, denominadas machos, feitas de uma mistura compatível com o metal a ser vazado e com o tamanho da peça fundida. Como as características físicas dos machos e dos moldes são diferentes, exige-se que o seu sistema de fabrico também seja diferente. O sistema mais usado é o ligado quimicamente. Os machos devem ser fortes o suficiente para suportar o metal fundido e ter colapsibilidade suficiente para permitir a remoção da peça fundida após o arrefecimento. Geralmente, os machos são extraídos por impacto. (Hörlle, L. 2005 *apud* Adegas, R., 2007).

Segundo Siddique, R. e Singh, G. (2011), a areia ligada quimicamente consiste em 93-99% de sílica e 1-3% de ligante químico. Entre os vários tipos de sistemas de pasta química utilizada na indústria da fundição, os autores ressaltam que os produtos químicos mais comuns entre os sistemas aglutinantes usados são fenólico-uretanos, epóxi-resinas, furfíl-álcool, e silicatos de sódio. Singh, G. e Siddique, R. (2012) ainda mencionam dentre os vários sistemas de aglutinantes químicos utilizados na indústria de fundição, alguns ligantes tais como ácidos

fenólicos não cozidos, resoléster fenólicos, silicato de sódio, fosfato, resinas alquídicas (óleo) de uretano, etc.

### 2.3.4 Utilização de Areia de Fundição em Argamassas e Betões

Como alternativa para o destino final da areia de fundição, que não é reutilizada novamente no processo de fabrico dos moldes, diversas pesquisas e estudos têm sido desenvolvidos. A utilização deste resíduo deve-se principalmente pelo facto da areia de fundição apresentar granulometria com características similares aos dos agregados finos utilizados no setor construtivo.

Armange, L. (2005), numa dessas pesquisas, apresentou os resultados dos testes realizados com argamassas fabricadas com areia de fundição. Com a utilização desta areia a resistência mecânica dos provetes permaneceu praticamente constante até 100% de resíduo em substituição à areia convencional de construção civil. No entanto, quando a concentração de resíduo ultrapassou 40%, a dificuldade de moldagem dos provetes aumentou, além do desprendimento de enxofre, causando um odor desagradável. Assim, ficou estabelecido que não é recomendado o fabrico de argamassas com mais de 30% de resíduo. Facto também comprovado através do ensaio de lixiviação feito no estudo, que não recomenda usar o resíduo em concentrações acima de 40% na argamassa. Foi estabelecido um limite de 30% de utilização do resíduo em substituição do agregado convencional, demonstrando que os valores médios da resistência mecânica em compressão axial de ambas as argamassas são semelhantes e se estabilizam em torno de 21-22 MPa após seis meses de cura natural (Figura 5).

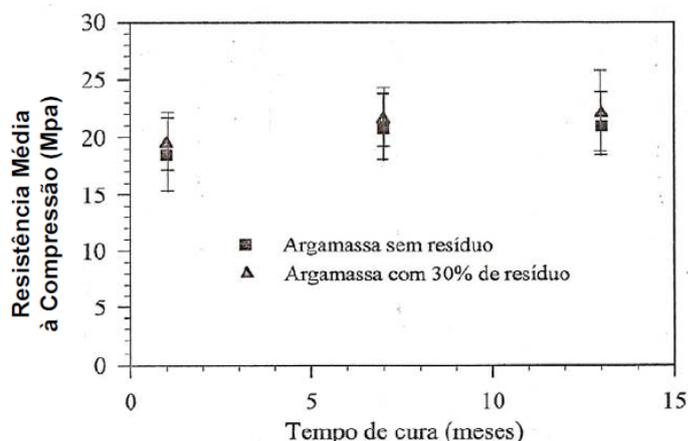


Figura 5 - Resistência média à compressão das argamassas com 30% de resíduo e sem resíduo (Armange, L., 2005)

Em relação à microestrutura, observou-se uma diferença. A mais marcante está na formação de cristais de etringite. Na argamassa sem resíduo praticamente não se observa a presença de etringite. Esta foi observada esporadicamente em lugares específicos, como o fundo de um poro conforme mostra a figura 6. Analisando o cimento puro constatou-se que o mesmo continha impurezas, principalmente cinzas, provavelmente provenientes de centrais termoeletricas ou incineradores. Essas impurezas podem, a princípio, inibir a germinação e crescimento dos cristais de etringite. Nos provetes com adição de resíduo, constatou-se a presença significativa de etringite. A figura 7 mostra a microestrutura de uma amostra com 60% de resíduo, em que foi possível observar a presença de etringite na forma de agulhas. Observou-se, também, que a quantidade de cristais de etringite tende a aumentar com a concentração de resíduo, demonstrando que o resíduo favorece a formação de etringite. A areia de fundição é composta basicamente de sílica, bentonita e pó de carvão. A sílica é um elemento considerado inerte. Por outro lado, a bentonita contém compostos formados por alumínio, silício e cálcio, e o pó de carvão contém enxofre. Esses elementos químicos, juntamente com o silício, são formadores de etringite. A dissolução, pelo menos parcial desses elementos, principalmente enxofre, durante a mistura com a água, pode efetivamente favorecer a precipitação de cristais de etringite durante a hidratação do cimento (Armange, L., 2005). Assim sendo, este estudo demonstrou juntamente com os ensaios de lixiviação e solubilização que é possível não somente encontrar um destino mais adequado do ponto de vista ecológico, mas também agregar valor a certos resíduos da indústria metalúrgica diminuindo assim o custo com a disposição de resíduos em aterros industriais.

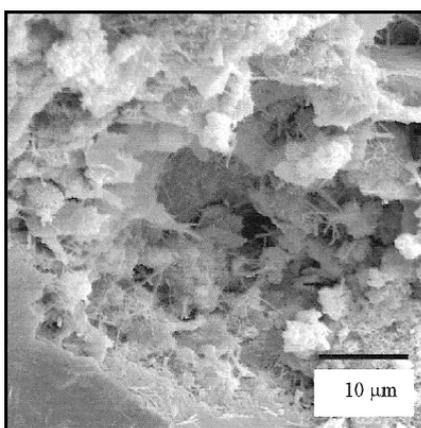


Figura 6 - Microestrutura da amostra de cimento Portland sem resíduo mostrando os cristais de etringite (Armange, L., 2005)

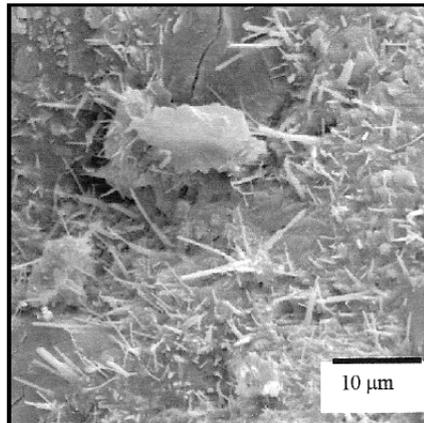


Figura 7 - Microestrutura da amostra de cimento Portland com 60% de resíduo mostrando os cristais de etringite (Armange, L., 2005)

Outro exemplo do reaproveitamento da areia de fundição foi analisado por Foguesatto, A. (2007), que estudou a substituição da areia natural pela areia residual do processo de fundição como agregado para betão. O autor avaliou a resistência à compressão em provetes com substituição de 25%, 50% e 75% de areia natural por areia de fundição, com e sem a utilização de um aditivo superplastificante, que teve como resultados, através dos ensaios laboratoriais, que a utilização de aditivo em betões com composições de areia de fundição teve uma eficiência elevada, dando alta trabalhabilidade a uma mistura que não apresentava boa trabalhabilidade. Porém, a resistência à compressão foi prejudicada, não alcançando a resistência pretendida. Já no betão sem o uso de aditivo superplastificante os resultados foram semelhantes e alguns casos melhores que a resistência de um traço com apenas areia natural (traço de referência).

Já Watanabe, F. (2004), em estudo realizado, demonstrou a viabilidade na utilização de areia de fundição em substituição ao agregado convencional no fabrico de pavimentos de betão, através de adensamento por vibração e vibro-compressão. O estudo mostra que é possível utilizar até 25% de areia de fundição em substituição do agregado convencional. Assim, a figura 8 mostra os valores médios da resistência à compressão após 30 dias de cura de 10 provetes fabricados com vibração e com vibro-compressão. De acordo com os resultados obtidos, a resistência dos pavimentos confeccionados com vibração diminuiu com o aumento da concentração de resíduo. Para os pavimentos sem resíduo, o valor da resistência média à compressão foi de 15,47 MPa. Para os pavimentos com 25% de incorporação de areia de

fundição em substituição à areia comum a resistência média à compressão foi de 12,37 MPa aos 30 dias de cura, ou seja, 20 % inferior. Desta forma, foi estabelecida a percentagem limite de 25% de areia de fundição no fabrico de pavimentos de betão.

Por outro lado, a resistência média dos pavimentos fabricados por vibro-compressão aumentou com o tempo de cura. Para os pavimentos sem resíduo, o valor da resistência média à compressão foi de 25,37 MPa. Para os pavimentos com 25% de incorporação de areia de fundição em substituição da areia comum, a resistência média à compressão atingiu 32,23 MPa aos 30 dias de cura (Watanabe, F., 2004).

Observou-se que a resistência mecânica depende do processo de fabrico, como demonstra a figura 8. A resistência média à compressão dos pavimentos confeccionados recorrendo a equipamento com vibro-compressão hidráulica foram superiores aos produzidos em equipamento com vibração, independentemente da incorporação de resíduo. A diferença representou 63,88 % de aumento de resistência para o pavimento sem areia de fundição e 160,55% com areia de fundição. Os equipamentos possuem concepção diferente. Com vibro-compressão hidráulica o equipamento promove, além da vibração, uma pressão de 1,1 MPa em cada pavimento por meio de um cilindro hidráulico. Este sistema permite a obtenção de um pavimento mais denso, ou seja, com menor porosidade (Watanabe, F., 2004).

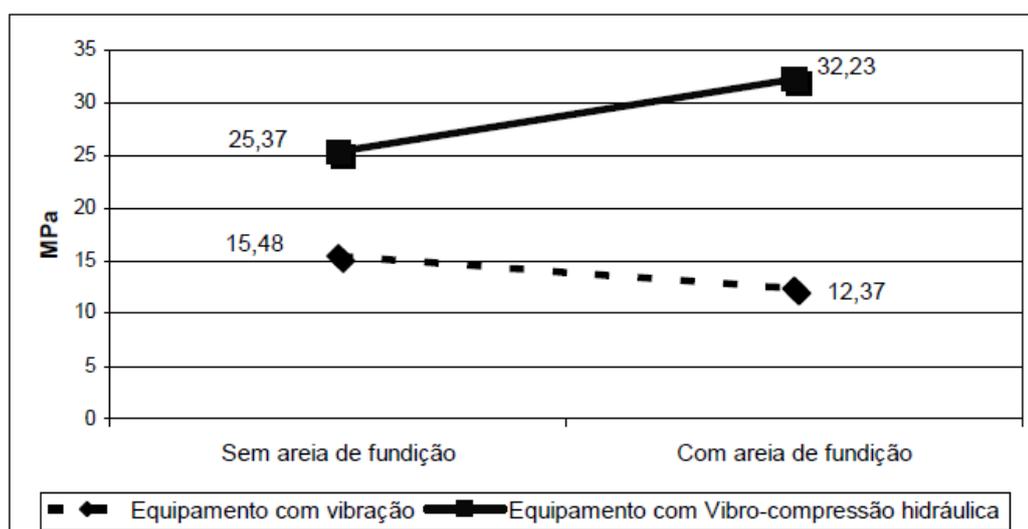


Figura 8 - Comparação da resistência média à compressão dos pavimentos de betão com 30 dias de cura natural, fabricados por vibração e por vibro-compressão (Watanabe, F., 2004)

Em relação à microestrutura, nos pavimentos fabricados por vibração observou-se uma formação maior de vazios na interface pasta/agregado. Como consequência, houve a formação

de grandes cristais de hidróxido de cálcio nessa zona como pode ser observado na figura 9. Essa zona de transição, que é a porção da pasta de cimento em contacto com o agregado, é caracterizada por ser uma região com maior porosidade decorrente da elevação da razão água/cimento devido ao filme de água que se forma em torno do agregado, principalmente nos agregados de maiores dimensões. Tendo em vista que os pavimentos foram compactados por vibração, a tendência é de aumentar essa zona de transição e, portanto a quantidade de água nessa região, favorecendo a precipitação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . De acordo com a figura 9, observou-se também que houve pouca formação de C-S-H entre os agregados prejudicando desta forma a integridade do pavimento. Portanto, conclui-se que o equipamento dotado apenas de vibração gerou a formação de grandes vazios em torno dos agregados, aumentando localmente a relação água/cimento e, conseqüentemente, proporcionando a formação de grandes cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Watanabe, F., 2004).

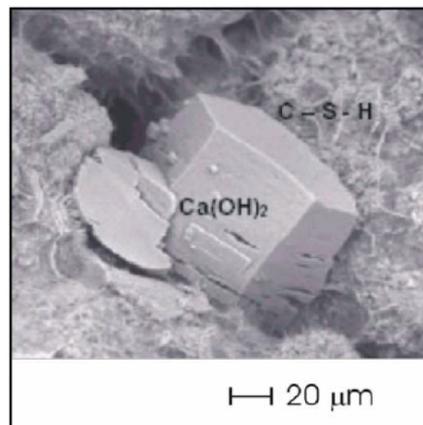


Figura 9 - Formação do hidróxido de cálcio na interface pasta/agregado observada sobre os pavimentos fabricados por vibração com 25% de resíduo (Watanabe, F., 2004)

Nos pavimentos fabricados com vibro-compressão hidráulica não foi observada a formação de cristais de hidróxido de cálcio. A combinação de vibração e compressão durante o fabrico dos pavimentos proporcionaram um material com menos porosidade e, conseqüentemente, sem vazios significativos para a formação de grandes cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Os silicatos hidratados C-S-H, que são os principais responsáveis pela resistência mecânica, apresentam uma morfologia bem desenvolvida entre os agregados, conforme se pode observar sobre o provete (Figura 10) (Watanabe, F., 2004).

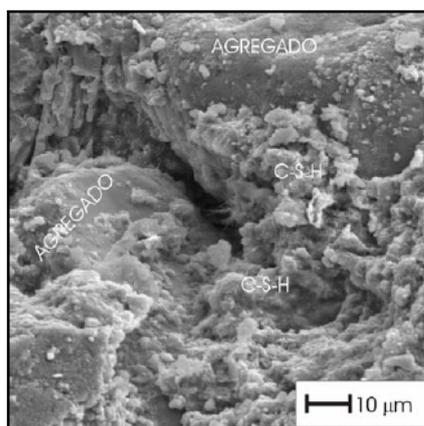


Figura 10 - Morfologia do C-S-H e ausência de grandes cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nos pavimentos fabricados por vibro-compressão com 25% de resíduo (Watanabe, F., 2004)

Sendo assim, através dos resultados obtidos conclui-se que o desempenho dos pavimentos teve como determinante a influência da energia de compactação do equipamento e a adição do resíduo.

Guney, Y. *et al.* (2010) investigaram a reutilização de areias de fundição de resíduos em betões de alta-resistência. Neste estudo, substituíram 5%, 10% e 15% de massa da areia natural fina por areia de fundição. A quantidade de cimento utilizado foi de  $500 \text{ kg/m}^3$  e razão água/cimento de 0,45 em massa de betão a ser exposto ao congelamento-descongelamento em condições húmidas. Os resultados do betão no estado fresco revelaram os efeitos dos resíduos de areia de fundição no ensaio de abaixamento (Figura 11), em que se observa que os resíduos de areia de fundição diminuíram a fluidez e o abaixamento do betão fresco. Tal foi atribuído pelos autores, provavelmente, devido à presença de materiais do tipo de argilas finas nos resíduos de areia de fundição, que são eficazes na diminuição da fluidez do betão fresco.

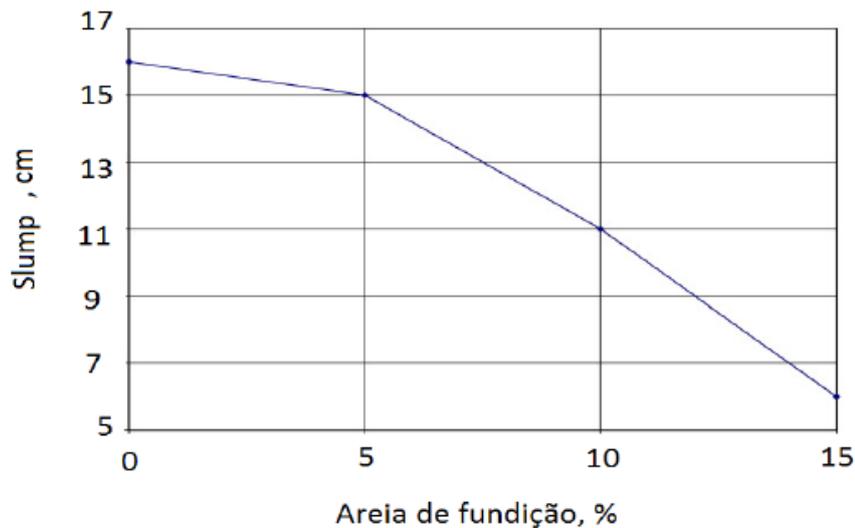


Figura 11 - Efeitos dos resíduos de areia de fundição no comportamento do betão em estado fresco - Slump test (Guney, Y. *et al.*, 2010)

Os módulos de elasticidade calculados por Guney, Y. *et al.* (2010) são apresentados na figura 12, na qual se observa que a resistência à compressão aumentou com a idade, para todas as misturas testadas. Segundo os autores, foi possível também verificar que a mistura com a dosagem de 10% de resíduos de areia de fundição apresentou maior resistência à compressão com a idade de 56 dias e que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de areia de fundição. O betão, com 10% de resíduos de areia de fundição apresentou quase a mesma resistência do que a mistura padrão de betão, enquanto todas as outras misturas de agregado de resíduos de fundição apresentaram valores mais baixos do que a padrão. Concluíram ainda que o betão com 5% de areia de fundição exibiu uma redução na absorção de água e no índice de vazios. Assim sendo, determinou-se que a areia de fundição pode ser utilizada com sucesso no fabrico de betão de alta resistência, se a distribuição do tamanho das partículas for cuidadosamente selecionada.

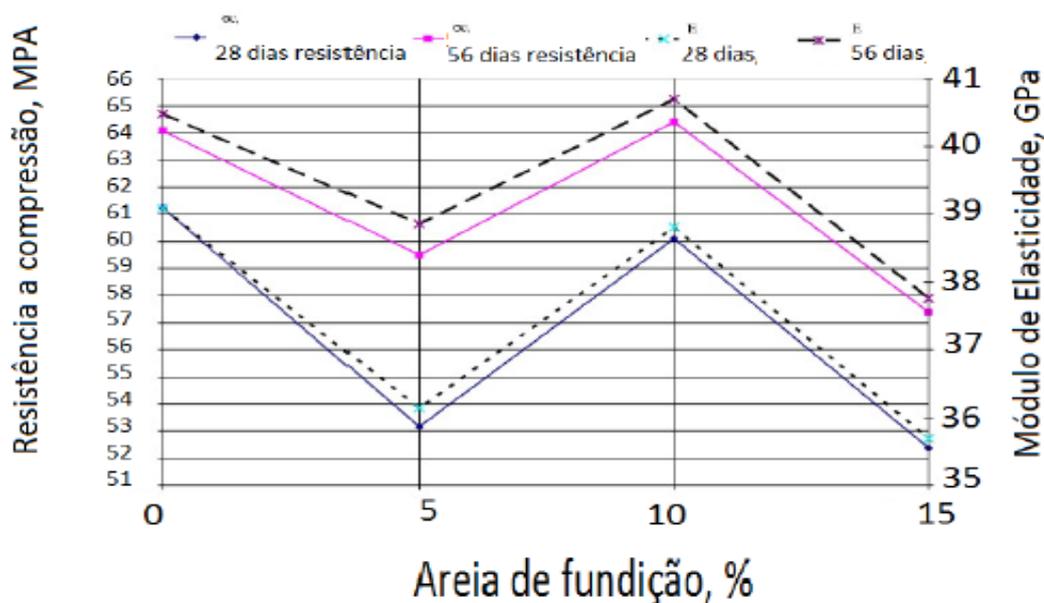


Figura 12 - Efeito dos resíduos de areia de fundição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade (Guney, Y. *et al.*, 2010)

Nos estudos de Siddique, R. *et al.* (2009), os valores de resistência à compressão aumentaram com o acréscimo da adição de areia de fundição, nos quais o agregado fino foi substituído por três percentagens (10%, 20% e 30% em massa) de areia de fundição. Foram realizados ensaios para as propriedades do betão no estado fresco, bem como no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, etc.) com idades de cura de 28, 56, 91 e 365 dias. Segundo os autores, os resultados dos testes apresentaram um aumento na resistência à compressão com a inclusão de areia de fundição, provavelmente, devido ao facto da areia de fundição ser mais fina do que a areia regular, resultando numa matriz de betão mais densa, e também devido ao teor de sílica presente na areia de fundição.

Singh, G. e Siddique, R. (2012) também observaram que as misturas de betão feitas com areia de fundição apresentaram resistência à compressão maior do que a mistura sem adição da mesma. A resistência à compressão do betão sem adição de areia de fundição foi de 40 MPa aos 28 dias. Estes autores avaliaram, também, que com o aumento da idade de cura de 28 para 91 dias houve um aumento da resistência à compressão das misturas. Estudo comparativo da resistência à compressão aos 28 e 91 dias indica que a percentagem de aumento na resistência à compressão decresce com o aumento do teor em areia de fundição aos 91 dias em comparação aos 28 dias, que foi reduzida em 7% a 1,98%.

Basar, H. e Aksoy, N. (2012) desenvolveram uma pesquisa em betões nos quais a areia foi substituída por areia de fundição com cinco concentrações (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) em massa. Foram estudadas a resistência mecânica, a lixiviação e as propriedades microestruturais. Os resultados indicaram que a adição de areia de fundição como substituição parcial de areia levou à redução no desempenho de resistência e densidade, e também aumentou a proporção de absorção de água do betão. No entanto, o betão com 20% de adição de areia de fundição apresentou resultados semelhantes aos do betão padrão. Por sua vez, as características de lixiviação de todas as amostras de betão em diferentes condições de pH, representando vários casos naturais também foram observados. Além disso, as investigações microestruturais, tanto na mistura padrão e mistura de betão com 20% de areia de adição também foram realizadas usando as técnicas DRX, FRX, MEV e EDS. Segundo Basar, H. e Aksoy, N. (2012), os resultados desta pesquisa sugeriram que a areia de fundição pode ser efetivamente utilizada como um substituto parcial dos agregados finos, sem impactos mecânicos, ambientais e microestruturais adversos. No entanto, a substituição parcial não deve exceder 20%.

No estudo de Khatib, J. *et al.* (2013), o agregado fino natural foi substituído por 0%, 30%, 60% e 100% de areia de fundição, e a proporção do teor de água, agregado grosso e do cimento permaneceu constante. Os betões foram ensaiados aos 1, 7, 28 e 90 dias de idade. As propriedades investigadas nos vários tempos de cura foram a absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassónico (VPU). Os resultados dos autores indicaram que houve um aumento sistemático na absorção de água por capilaridade e uma diminuição na resistência à compressão e VPU, à medida que a quantidade de areia de fundição no betão aumentou.

Khatib, J. *et al.* (2013) indicam que parece haver uma relação linear entre a resistência e a absorção de água por capilaridade, assim como também existe uma relação exponencial entre a resistência e a VPU. Geralmente, segundo os autores, existe uma maior quantidade de absorção de água com o aumento do teor de areia de fundição, no final do período de ensaio. Existiu uma pequena diferença na absorção de água, no trabalho de Khatib, J. *et al.* (2013), entre as diferentes misturas após 1 dia de cura e esta diferença tornou-se mais perceptível após 7 dias de cura e idades superiores. As misturas contendo 60% e 100% de resíduos de areia de fundição como substituto de areias naturais apresentam uma muito maior absorção de água no final do período de ensaio, em comparação com as misturas que continham 0 e 30% de areia de fundição. Os autores exemplificaram que aos 90 dias de cura, a absorção de água no final do

período de ensaio por meio da mistura, contendo 100% de areia de fundição foi cerca de 3 vezes mais do que a mistura de referência (isto é, 0% de areia de fundição).

Foi realizada uma investigação experimental levada por Singh, G. e Siddique, R. (2012) para avaliar as propriedades de resistência e durabilidade de misturas de betão, em que a areia natural foi parcialmente substituída por areias de fundição de ferrosas (AFF). A areia natural foi substituída em cinco percentagens diferentes (0%, 5%, 10%, 15%, e 20%) em massa. Os resultados dos ensaios indicam um aumento marginal na resistência e durabilidade do betão com incorporação de AFF como substituição parcial do agregado fino.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica, durabilidade e microestruturais em areias de fundição como substituto parcial dos agregados finos no betão indicam este como um material alternativo eficaz. A massa de areia foi substituída em seis percentagens (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%). A resistência à compressão aumentou de forma linear para percentagens de substituição até 50%, com valores superiores ao betão de referência a partir de 30%. A incorporação de areia de fundição aumentou a profundidade de carbonatação. A microestrutura estudada por microscopia eletrónica de varrimento (MEV) para betões com areia de fundição mostrou vazios reduzidos e que a pasta de gel C-S-H não foi tão amplamente difundida, quando comparada com a microestrutura da mistura de controlo (Siddique, R. *et al*, 2011).

Também Siddique, R. *et al*. (2007) estudaram a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade aos 28 e 56 dias. A percentagem de substituição de areia fina natural por areia de fundição foi de 10%, 20% e 30%. Com base nos resultados dos ensaios eles concluíram que (a) a resistência à compressão aumentou ligeiramente com o aumento da incorporação de areia de fundição em todas as percentagens de substituição; (b) a resistência à compressão aumentou em 4,2%, 5,2% e 9,8% aos 28 dias, quando comparado com a mistura de betão padrão, assim como 1,0%, 5,18% e 14,3% de aumento à idade de 56 dias; (c) a resistência à tração aumentou com um aumento na areia de fundição e (d) o módulo de elasticidade do betão com areia de fundição em todas as idades foi superior do que o betão padrão.

Por fim, Prabhu, G. *et al*. (2014) avaliaram a utilização de areia de fundição como material substituto para o agregado fino na produção de betão em percentagens de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Vários testes, incluindo densidade, abaixamento, resistência à tração, resistência à flexão, velocidade de pulso ultrassónico (VPU) e testes de resistência à compressão foram realizados para compreender os efeitos da areia de fundição no comportamento do betão.

Os resultados dos ensaios revelaram que as propriedades de resistência das misturas de betão contendo areia de fundição até 20% eram relativamente próximas do valor da resistência da mistura de controlo e a diminuição média da resistência foi de apenas 2,1%. A diminuição da resistência é atribuída à finura da areia de fundição e à presença de poeiras, de argila e farinha de madeira. Dos resultados dos ensaios obtidos, concluiu-se que uma taxa de substituição até 20% pode ser eficazmente utilizada em boa produção de betão, sem afetar os padrões de betão, e um grau de substituição acima de 20% não é benéfico.

## **2.4 Escórias de fundição**

A escória é um material inorgânico, não-metálico, vítreo e polifásico, resultante da indústria do ferro e do aço, que pode ser gerado ou incorporado aos processos metalúrgicos (como as escórias sintéticas). Dentre as principais funções de uma escória sintética estão a proteção do revestimento da panela, refinamento do aço, captação de inclusões e melhoria da limpeza do aço.

As transformações sentidas na siderurgia, como consequência da globalização, visam buscar inovação para atender as necessidades dos clientes (Nilles, P., 1999). Assim, a qualidade do aço produzido, em especial pelo refino secundário, é de importância relevante, e aquela relaciona-se com a quantidade, tamanho médio e distribuição de inclusões, assim como a presença de impurezas. Quanto à origem, essas inclusões podem ser endógenas (provenientes das reações de desoxidação) e exógenas (da escória, pós fluxantes e refratários) (Martins, A. *et al.*, 2002). Em geral, o tipo de escória a ser empregada vai depender do tipo de aço a ser fabricado, pois envolve uma série de variáveis como a composição do aço, a composição da escória sintética, método de fabrico e propriedades dessa escória (basicidade, viscosidade, temperatura, etc.) (Assis, P. *et al.*, 2000). A escória sintética pode ser fabricada através de processos como a fusão, pelletização, sinterização, briquetagem ou simplesmente utilizando-se uma mistura de matérias-primas.

Segundo Calleja, J. (1982), as escórias siderúrgicas começaram a ser utilizadas como materiais de construção na Inglaterra no final do século XVIII.

Atualmente, na siderurgia nacional são produzidas escórias de forno elétrico, que depois de sujeitas a um determinado processamento, originam o Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC).

As escórias siderúrgicas podem agregar valor quando empregues na construção como substituição de matérias-primas em estradas, betão e cimento. As suas possibilidades de reciclagem podem ser as seguintes (Viklund, C. *et al.*, 1999; García, C. *et al.*, 1999): base e sub-base de pavimentos, lastro de ferrovias, agregado grosso em revestimento asfáltico, agregado em betão, matéria-prima na produção de cimento e matéria-prima para a indústria cerâmica.

As aplicações práticas das escórias siderúrgicas em diversos setores da construção têm-se tornado soluções de baixo custo, além de boa qualidade técnica. Segundo Burnier *et al.* (1988), o agregado siderúrgico conta com as seguintes vantagens sobre o agregado pétreo (brita): menor custo, já que não requer explosivos para desmonte, maior resistência à abrasão, estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizado em drenos e lastros ferroviários, forma de grão (cúbica), que confere ótima consistência e adesividade aos ligantes (já a brita geralmente apresenta forma lamelar) e maior massa específica resultando em economia de material no dimensionamento de contenções e lastros, assegurando grande estabilidade.

#### **2.4.1 Processo de produção**

Os resíduos siderúrgicos denominados de escórias, possuem diferentes denominações e características consoante o modo de produção do qual foram geradas, influenciando a composição química e as demais propriedades físico-químicas da escória (Machado, A., 2000). De modo a perceber a origem deste material, descrever-se-á resumidamente, neste capítulo, o modo de produção da escória em estudo.

Numerosos tipos de fornos empregando a eletricidade como fonte de energia para a fusão e refinamento do metal têm sido desenvolvidos. Entretanto, em termos de utilização, o forno a arco e o forno de indução são os mais comuns. Como o emprego de escória no forno de indução é difícil, estes fornos encontram maior emprego em fundições e praticamente 100% da tonelagem produzida em aciarias elétricas provém de fornos a arco.

No entanto, neste trabalho irá ser focado apenas o processo de produção da escória proveniente do forno de indução, uma vez que é desse processo que o material em estudo provém.

## 2.4.2 Forno de indução elétrica

O desenvolvimento de fornos de aquecimento por indução começa com Michael Faraday, que enunciou o princípio da indução eletromagnética no início do século XIX. No entanto, só no final de 1870 o engenheiro britânico Sebastian de Ferranti começou com experiências aplicando a teoria de Faraday para o aquecimento de metais. Em 1890, Edward Allen Colby patenteou o primeiro forno de indução para fusão de metais. O primeiro uso prático foi em 1900 em Gyslinge (Suécia) por Kjellin. O primeiro forno de indução trifásico foi construído na Alemanha em 1906 por Röchling-Rodenhauser. Em 1907, foi produzido o primeiro aço num forno de indução nos Estados Unidos (Gandhewar, V., 2011).

O aquecimento indutivo tem-se tornado uma solução cada vez mais viável na área siderúrgica, pois apresenta grande eficiência energética, alta taxa de aquecimento, reduzido nível de oxidação do material processado, baixa emissão de poeiras, ruídos e gases, além de proporcionar melhor ambiente de trabalho e fácil controlo do processo de produção.

O forno de indução é um tipo de forno elétrico cujo funcionamento se baseia na indução eletromagnética. Consiste basicamente num transformador onde a bobina (com ou sem núcleo) funciona como o primário, e banho metálico como o secundário do sistema. As correntes induzidas no material (correntes de Foucault) produzem grande elevação de temperatura devido à resistência à sua passagem através do banho. Este tipo de equipamento possui a vantagem de possuir uma alta taxa de aquecimento, necessária à rápida fusão das escórias sintéticas.

Os fornos de indução são hoje equipamentos muito importantes no processo de fundição, sobretudo pela qualidade das peças produzidas por este processo. Por ser um processo de aquecimento sem contacto, não ocorre contaminação do material a ser tratado. Isso proporciona melhor qualidade do produto final e um menor custo de energia elétrica quando comparado com outros métodos de aquecimento e tratamento térmico.

As novas tecnologias melhoraram o fornecimento de energia para o sistema de indução, introduziram sistemas de recuperação de calor e controlo geral do sistema. Isso fez com que a utilização deste tipo de aquecimento aumentasse em mais de 20% ao ano, tornando-se a tecnologia de maior crescimento na produção de metais. Com o tempo, a indução pode até mesmo superar o uso dos fornos convencionais elétricos e a arco, tanto em toneladas de produção quanto em quilowatt horas de uso de energia (EPRI, 1999).

### 2.4.3 Betão contendo escórias

A utilização de agregados naturais no betão possui impactos ambientais em termos de extração de recursos não renováveis e de consumos de energia necessários para o efeito, mas também, os relativos à destruição da biodiversidade existente nos locais de extração de agregados (Torgal, F. e Jalali, S., 2011). A ambição de tornar viável a utilização de escórias como substituto do agregado natural em misturas de betão é um objetivo atual pertinente. Assim, para além de valorizar os resíduos, reduz-se o emprego de agregados naturais e, conseqüentemente diminui-se o impacto negativo resultante da exploração das pedreiras.

Neste âmbito, várias pesquisas têm sido realizadas ao longo dos tempos, por forma a encontrar uma solução viável na incorporação destes resíduos no betão, enunciando-se algumas delas de seguida.

Pagnussat, D. (2004) avaliou as potencialidades de utilização de escória granulada de fundição (EGF) no fabrico de pisos intertravados de betão (*pavers*). Teve como objetivo analisar as vantagens da escória granular de fundição na substituição parcial do cimento e do agregado fino nas misturas do produto, com teores de 10%, 30% e 50% na substituição, em comparação ao bloco de referência de traço natural. Para as duas situações, foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água. Ao término dos ensaios, os resultados mostraram que a substituição parcial de cimento por 10% de EGF teve uma aproximação maior aos resultados do bloco de referência. Além deste, os ensaios também comprovaram que não houve diferenças significativas entre os diferentes tipos de blocos nos ensaios de desgaste por abrasão e absorção de água.

Shoya, M. *et al.* (1999) estudaram as propriedades de betão auto-compactável produzido com escórias de cobre e escórias de níquel, em percentagens de substituição de 0%, 50% e 100% do agregado fino. Pelas propriedades mecânicas e de durabilidade estudadas, em que observaram a semelhança de desempenhos entre estes betões e o betão de referência, consideraram estas escórias não ferrosas como promissoras na aplicação em betão auto-compactável durável.

Nesta linha de considerações, Moura, W. (2000) também estudou o efeito da escória de cobre como agregado fino em argamassas. Os seus resultados revelaram valores de resistência à compressão, em argamassas com 100% de escória de cobre como agregado fino, 25% superiores à da argamassa de referência com areia normalizada. Este investigador também estudou a influência destes resíduos como agregado fino em betões. Realizou misturas de betões

com 30%, 40% e 50% de escória de cobre e concluiu que com até 40% em volume de escória ocorre um melhor desempenho dos betões, tanto no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) como no estado endurecido (propriedades mecânicas, massa específica e durabilidade).

Morino, K. e Iwatsuki, E. (1999) estudaram betões produzidos com quatro escórias oxidantes diferentes de aciaria elétrica, sujeitas a um arrefecimento brusco, semi-brusco e lento, e que tiveram a fração de ferro removida. Os resultados obtidos foram satisfatórios para a utilização das escórias oxidantes de aciaria elétrica como agregados, visto que a diferença entre a resistência à compressão do betão com agregado de escória e do betão com agregado de rocha não foi significativa.

Akinmusuru (1991), citado por Almeida, A. (2009), estudou a escória de aciaria como agregado fino e grosso em betões, avaliando o desempenho mecânico e a durabilidade dos betões quando comparados a um betão de referência. Segundo o autor, a escória utilizada foi exposta ao ambiente por mais de três meses, na tentativa de minimizar futuras reações de hidratação dos óxidos. Os resultados dos betões com escória foram superiores aos de referência.

Outro estudo realizado por Ramos, T. *et al.* (2012) foi realizado com aplicação do agregado ASIC, um subproduto da indústria do aço, em betões de ligantes hidráulicos como substituto do agregado natural. Os autores concluíram que o betão contendo este resíduo possui resistências mecânicas muito satisfatórias, quando comparadas com o betão de controlo, nomeadamente na resistência à compressão. No que se refere à durabilidade do betão, os resultados foram similares nos dois casos, apresentando-se como um agregado alternativo ao agregado natural.

De uma forma geral, as experiências realizadas com escórias como agregado, tanto fino como grosso, têm apresentado como resultado um bom desempenho.

## 2.5 Conclusões finais face aos estudos desenvolvidos

Os autores mencionados ao longo de toda a pesquisa realizada e abordada neste documento estudaram a utilização de diversos resíduos de areias e escórias de fundição através de ensaios variados realizados em laboratório. Assim, apresenta-se neste subcapítulo um breve resumo de toda essa pesquisa.

Relativamente à utilização de areias de fundição em substituição do agregado convencional no fabrico de argamassas e betões, os autores concluíram que estes resíduos, de uma forma geral, devem ser substituídos em 20% a 30%, citando que a sua substituição em concentrações superiores a estas não é benéfica, traduzindo-se em impactos mecânicos, ambientais e microestruturais adversos.

Em termos mecânicos, considerando as percentagens de substituição anteriormente referidas, não existe grande variação na resistência à compressão entre as misturas realizadas com areias de fundição e as misturas de referência. Os resultados obtidos pelos vários autores não são unânimes, porém, como já foi referido, não apresentam uma grande dispersão entre eles. As variações nos valores da resistência à compressão (aumentos e quedas) com incorporação destes resíduos não ultrapassaram os 20%. O mesmo aconteceu no que diz respeito à absorção de água: os resultados dividem-se. É sabido que toda esta temática envolve variados fatores que influenciam os respetivos resultados finais. A granulometria dos agregados é um deles. Um dos autores justifica a diminuição da resistência à compressão através da finura da areia e da presença de poeiras, argilas e etc. Por outro lado, outro autor utiliza o mesmo argumento para justificar um aumento verificado na resistência à compressão, fundamentando essa hipótese com o facto de uma areia mais fina originar uma matriz mais densa do betão. Ora, ambas as hipóteses são viáveis, pois a partir deste ponto já existem outras condicionantes. À partida, uma areia mais fina terá um maior número de grãos por unidade de volume. Consequentemente, a área de superfície desses grãos será maior. Assim, será necessária uma maior quantidade de água para envolver todos esses grãos e manter o “slump” pretendido. Quanto maior for a razão A/C menor será a resistência da mistura. Por outro lado, o segundo autor poderá ter utilizado um agregado menos poroso resultando num aumento da resistência à compressão. Embora a razão água/cimento seja o fator mais importante na determinação da porosidade do betão e, consequentemente, da sua resistência, outros fatores podem ter um efeito importante sobre esta, como a densidade, condições de cura (grau de hidratação do cimento), utilização de adjuvantes, velocidade de carregamento, mineralogia e forma do agregado, etc. Este último fator é também

determinante, uma vez que influencia a trabalhabilidade das misturas. Grãos mais arredondados e menos irregulares requerem uma menor quantidade de água, além de conferir à mistura um aspeto menos áspero, aumentando assim a respetiva resistência à compressão. Esta segunda apreciação, feita pelo autor que diz existir um aumento na resistência à compressão por haver uma maior quantidade de finos pode, ainda, ser justificada da seguinte forma: uma maior quantidade de finos presente nesta mistura preenche os poros do sistema granular, enquanto a menor dimensão dos agregados reduz o tamanho crítico do defeito desses materiais. Desta forma, poderá haver um melhor desempenho mecânico observado ao longo do tempo. O teor de sílica presente na areia de fundição pode, também, provocar esse mesmo efeito.

Em relação à microestrutura, observou-se uma diferença num dos estudos: a formação de cristais de etringite. Observou-se que a quantidade de cristais de etringite tende a aumentar com a concentração de resíduo. Tendo a areia de fundição sílica, bentonita e pó de carvão na sua constituição, é, efetivamente possível, que ocorra essa formação aquando da dissolução dos elementos químicos que a compõem em água, durante a hidratação do cimento.

No que concerne à utilização de escórias provenientes da indústria da fundição o cenário parece ser mais apelativo, na medida em que não existem limitações intermédias na substituição destes agregados pelos agregados convencionais, no que toca ao desempenho mecânico dos betões. Todos os estudos realizados pelos diversos autores mostraram que os valores da resistência à compressão das misturas realizadas com escórias foram superiores aos das misturas de referência. Em relação à durabilidade do betão, um dos estudos mostra que os resultados foram similares nos dois casos, apresentando-se as escórias como promissoras na aplicação em betão.

De notar que nem todos estes resultados englobam o uso de escórias do mesmo tipo, isto é, provenientes do mesmo processo de fundição, do mesmo tipo de forno, tipo de liga e resíduos dos mesmos materiais, aspetos esses que podem influenciar os demais resultados obtidos, quer sejam de caracterização no estado fresco ou endurecido. Para além disso, nenhum dos estudos apresentados faz referência à reatividade das escórias, sendo este um parâmetro essencial para viabilizar a sua incorporação em betões.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

#### 3.1 Introdução

O estudo experimental levado a cabo comporta várias fases de trabalho laboratorial. Na perspetiva de estudar os efeitos e a viabilidade da incorporação de areias e escórias de fundição em betões desenvolveu-se, inicialmente, um programa experimental envolvendo argamassas produzidas com 5 resíduos em substituição da areia natural. A avaliação da influência destes resíduos nas propriedades mecânicas de misturas cimentícias é menos laboriosa e tecnicamente mais simplificada pelo seu estudo em argamassas, devido ao menor volume de materiais envolvidos, entre outras razões. Considera-se que, numa primeira abordagem, esta analogia é aceitável. As elações retiradas do estudo destes materiais em argamassas facultam linhas orientativas para uma definição mais acertiva de programas experimentais em betão que, entretanto, irão também surgir neste estudo, para dar continuidade à definição de soluções para esta problemática.

Assim, este capítulo apresenta de forma detalhada os materiais utilizados bem como as respetivas caracterizações, todos os procedimentos de ensaios adotados na investigação, assim como todas as composições das amassaduras utilizadas.

Numa fase inicial foram pré-selecionadas 3 escórias e 2 areias de fundição (ver Quadro 2). Os aglomerados de escórias foram britados para a granulometria pretendida.

Quadro 2 - Resíduos de areias e escórias de fundição utilizados

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>Simbologia</b>
Escória de ferro (cinza escura)	Ece
Escória do forno (cinza claro)	Ecc
Escória do Neiva (verde)	Ev
Areia de fundição (cor amarelada)	Afa
Areia de fundição (cor preta)	Afp

## 3.2 Materiais utilizados

### 3.2.1 Cimento

No presente programa experimental foi utilizado o Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5R, estando em conformidade com as especificações da NP EN 197-1 (2012). De acordo com as especificações presentes na ficha técnica (Secil, 2003) este cimento, constituído por clínquer e filer calcário, proporciona betões de elevada resistência e boa trabalhabilidade. As principais características são apresentadas nos quadros 3, 4 e 5 de acordo com os dados fornecidos na ficha técnica.

Quadro 3 - Características químicas do cimento (Secil, 2004)

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento

Quadro 4 - Características mecânicas do cimento (Secil, 2004)

Resistência à compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
2 dias	7 dias	28 dias	NP EN 196-1
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Quadro 5 - Características físicas do cimento (Secil, 2004)

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

### 3.2.2 Água

Relativamente à água, foi utilizada a disponível no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, proveniente da rede de abastecimento pública de Guimarães.

### **3.2.3 Adjuvantes**

Na preparação das amassaduras e das misturas foram utilizados um adjuvante superplastificante Glenium C313 e um adjuvante polifuncional redutor de água Pozzolith 476N, ambos provenientes da empresa BASF.

### **3.2.4 Areias e britas naturais**

A escolha e o estudo dos agregados têm especial importância uma vez que são os constituintes maioritários do betão e têm grande influência no seu desempenho. Neste estudo foram utilizados quatro agregados: uma areia fina 0/2 e meia areia 0/4, enquanto as britas utilizadas foram a brita 8/16 e a brita 11/22. Todos estes materiais são de origem granítica, cedidos por uma pedreira situada no norte de Portugal. Os ensaios de caracterização (geométrica, física e mecânica) dos materiais foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, utilizando os ensaios abaixo relacionados, conforme as normas preconizadas.

#### **3.2.4.1 Análise granulométrica**

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das mais importantes características, com bastante influência no comportamento de betões, nomeadamente na rigidez, na estabilidade, na durabilidade e na permeabilidade. Foi determinada de acordo com a NP EN 933-1 (2012), sendo que as curvas granulométricas das britas são as fornecidas pelo catálogo. A peneiração das areias foi feita sem lavagem do material. Na figura 13 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados.

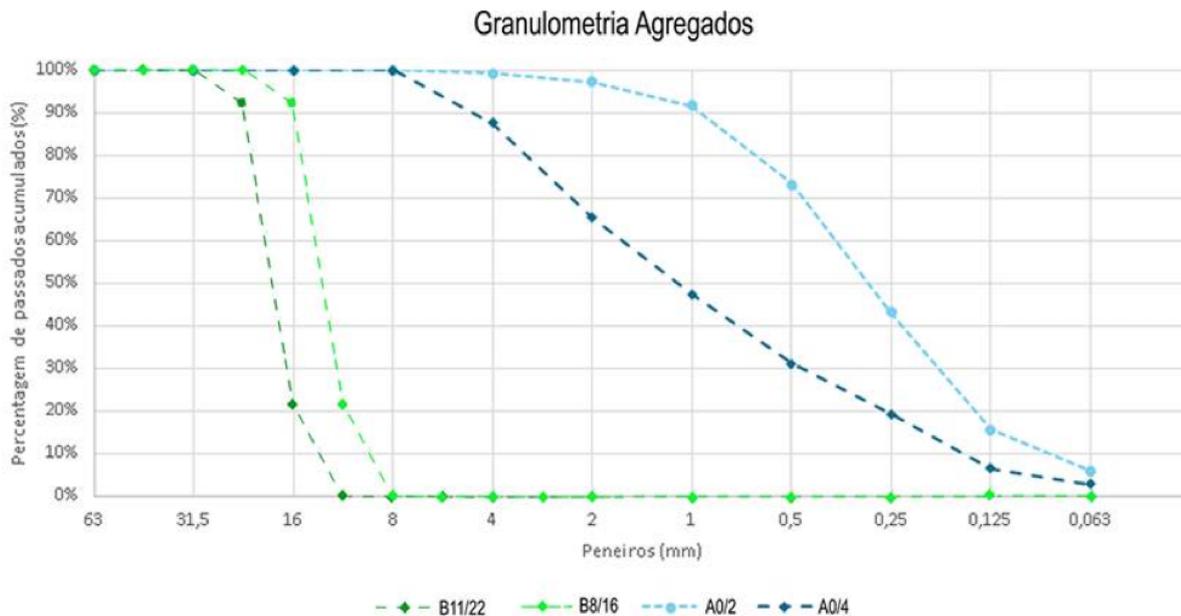


Figura 13 – Curvas granulométricas dos materiais utilizados

### 3.2.4.2 Massa volúmica aparente

A baridade, ou massa volúmica aparente, de um agregado define-se como sendo a razão entre a massa seca por unidade de volume do agregado contido num recipiente. Esse volume é aparente, porque inclui o volume das partículas e o volume de vazios entre estas e as paredes do recipiente.

A baridade depende de inúmeros fatores tais como a granulometria do agregado, o arranjo das partículas, da forma e da angulosidade.

Para a determinação destas características, foi realizado o ensaio de acordo com a norma NP EN 1097 – 3 (2002). O ensaio é realizado num contentor cilíndrico estanque (Figura 14), em aço inoxidável, no qual se faz o registo das massas do recipiente vazio e cheio com o agregado em estudo e através das fórmulas presente na norma, calculam-se os valores da baridade e do volume de vazios.



Figura 14 - Recipiente cilíndrico em aço

Quadro 6 - Caracterização física e mecânica dos agregados utilizados

	<b>Areia fina 0/2</b>	<b>Meia areia 0/4</b>	<b>Brita 8/16</b>	<b>Brita 11/22</b>
Massa volúmica das partículas (g/cm <sup>3</sup> ) *	2,64	2,61	2,62	2,68
Absorção de água (%) *	0,36	0,39	0,98	1,26
Módulo de finura *	3,83	5,39	-	-
Finos (%) *	13,9	4,6	-	-
Massa volúmica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,38	1,531	-	-

\*Ficha técnica do produto

### 3.2.5 Areias de fundição

Foram seleccionadas duas areias de fundição: uma de cor preta e outra de cor amarelada, que daqui em diante se designarão por areia de fundição preta e areia de fundição amarela, respetivamente. Os ensaios de caracterização (geométrica, física e mecânica) do material foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção, utilizando os ensaios abaixo relacionados, conforme as normas preconizadas.

### 3.2.5.1 Análise granulométrica

Tal como aconteceu nas areias naturais, a granulometria das areias de fundição (0/2) foi determinada de acordo com a NP EN 933-1 (2012), estando as respetivas curvas granulométricas apresentadas na figura 15. Comparando a granulometria destas areias com a granulometria das areias naturais verificou-se que as curvas se apresentam bastantes semelhantes à exceção do peneiro 0,5mm.

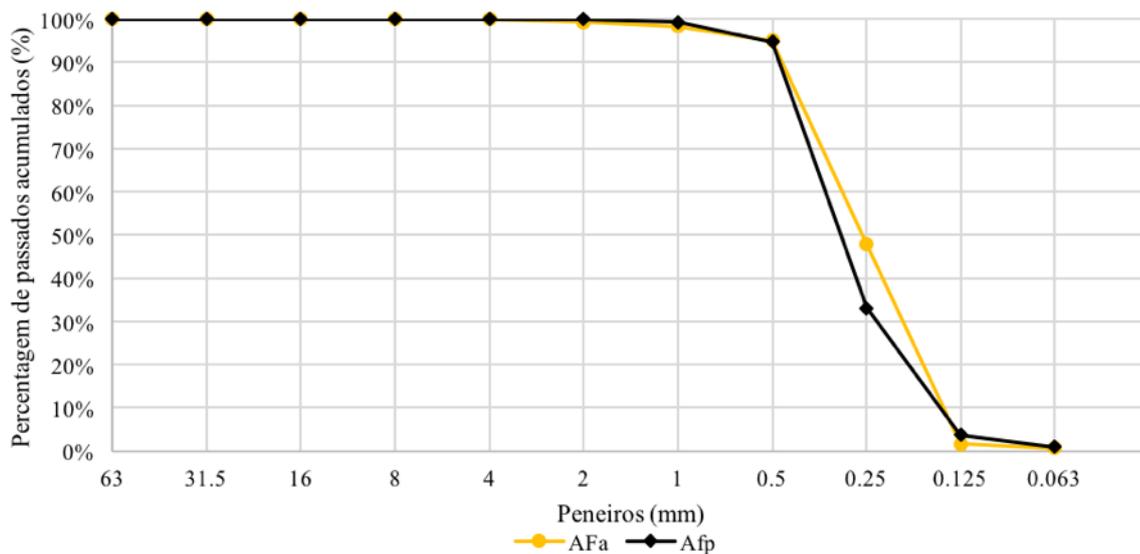


Figura 15 – Curvas granulométricas das areias de fundição

### 3.2.5.2 Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica define-se como sendo o quociente entre a massa e o volume do material, indicando a quantidade de material existente por unidade de volume.

Relativamente à absorção de água de um agregado, esta é importante uma vez que um elevado nível de absorção desta pelo agregado, poderá trazer um impacto negativo a níveis de durabilidade e mecânicos.

Os ensaios para determinação destas duas características, foram baseados nas especificações da norma NP EN 1097 – 6 (2000).

### 3.2.5.3 Baridade e volume de vazios

Para a determinação destas características, foi realizado o ensaio de acordo com a norma NP EN 1097 – 3 (2002).

Quadro 7 - Caracterização física e mecânica das areias de fundição

	<b>Afa</b>	<b>Afp</b>
Massa volúmica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,478	1,099
Massa volúmica das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,39
Absorção de água (%)	0,46	1,4
Módulo de finura	3,57	3,68

### 3.2.6 Escórias de fundição

No que diz respeito às escórias de fundição foram selecionadas três: uma escória de ferro, uma escória de forno e a escória do Neiva, denominadas daqui em diante por escória cinza escura (Ece), escória cinza clara (Ecc) e escória verde (Ev), respetivamente. Tal como para as areias de fundição, todos os ensaios de caracterização do material foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção, utilizando os ensaios abaixo relacionados, conforme as normas preconizadas.

#### 3.2.6.1 Análise granulométrica

Como para todos os agregados anteriormente mencionados, este ensaio foi realizado de acordo com a NP EN 933-1 (2012). A figura 16 representa uma primeira análise, realizada para estudar o comportamento em argamassas. Comparativamente aos resultados obtidos na análise granulométrica das areias naturais verificou-se que as escórias em estudo apresentaram maior quantidade de material grosso.

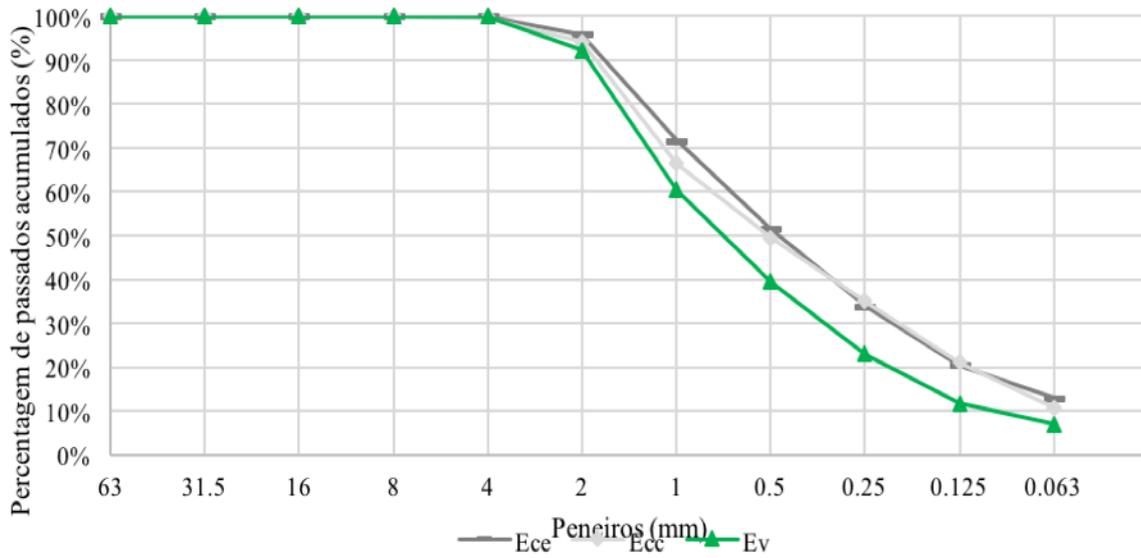


Figura 16 - Granulometria das escórias de fundição

Com o avanço do estudo da incorporação da Ecc em betões, foi feita nova análise comparando a granulometria desta (0/2 e 0/4) com a granulometria da areia natural. De notar que houve necessidade de britagem de mais quantidade de escória. A análise granulométrica desta segunda britagem demonstrou-se bastante semelhante à da escória britada na primeira remessa, resultando nas curvas granulométricas representadas na figura 17.

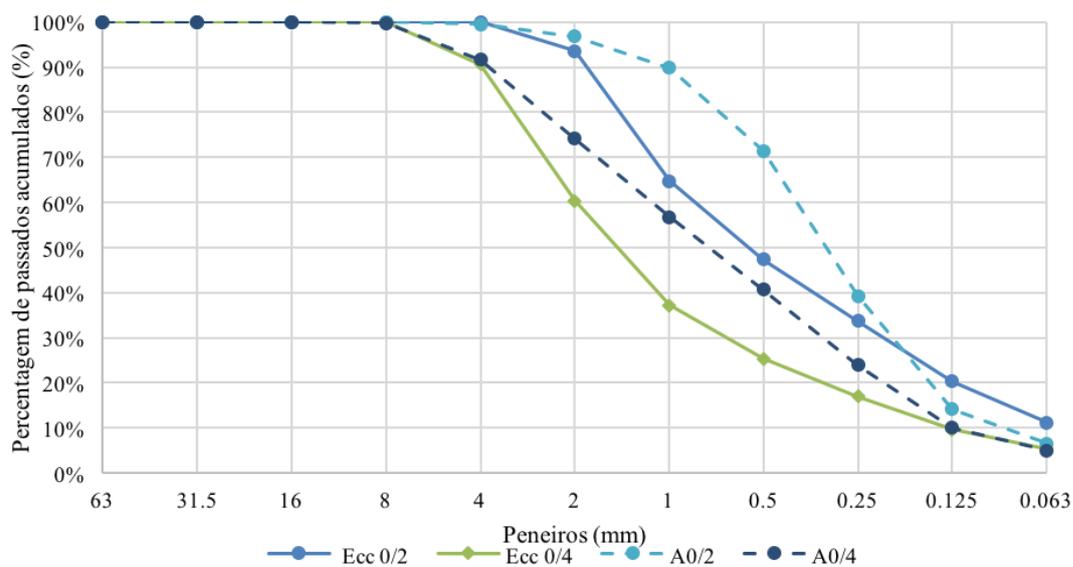


Figura 17 – Curvas granulométricas escórias de fundição e areia

O resultado obtido permite concluir que se conseguiu obter uma granulometria bastante idêntica à da areia natural, embora esta tenha uma quantidade relativamente maior de finos como se pode observar nos peneiros de 1mm e 0,5mm.

### 3.2.6.2 Massa volúmica e absorção de água

Os ensaios para determinação destas duas características foram baseados nas especificações da norma NP EN 1097 – 6 (2000).

### 3.2.6.3 Baridade e volume de vazios

Para a determinação destas características, foi realizado o ensaio de acordo com a norma NP EN 1097 – 3 (2002).

Quadro 8 - Características físicas e mecânicas das escórias de fundição

	<b>Ece</b>	<b>Ecc</b>	<b>Ev</b>
Massa volúmica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,707	1,525	1,431
Massa volúmica das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	3,37	2,65	2,78
Absorção de água (%)	1,4	1,58	1,3
Módulo de finura	4,13	4,23	4,65

Da análise do quadro pode-se observar que não existe grande variação quando se comparam os valores das escórias.

### 3.2.6.4 Resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles

Uma das principais características mecânicas que um agregado deve possuir é uma boa resistência à fragmentação, porque são indicativos da boa qualidade e de boa resistência de um agregado. Estes devem ser resistentes ao choque, ser inalteráveis e possuírem boa resistência à abrasão.

A resistência à fragmentação foi determinada para a Ecc, escória selecionada para aplicação em betões após concluídos e analisados os estudos em argamassas. Este ensaio foi realizado pelo método de Los Angeles sobre uma amostra processada de agregado passando no peneiro de 14 mm e retido no peneiro de 10 mm. O material recolhido foi lavado e peneirado no peneiro de 1,7mm. Tendo como base a especificação da norma NP EN 1097-2 (2002), a classe obtida foi LA 50.

O ensaio de Los Angeles é realizado num equipamento constituído por um cilindro de chapa de aço, fechado nas extremidades, com um diâmetro e comprimento interiores de cerca de  $711\pm 5$  mm e  $508\pm 5$  mm, respetivamente. O tambor realiza um movimento rotacional em torno de um eixo horizontal. A rotação é imposta por um motor, sendo a sua velocidade de 31 a 33 rotações por minuto. Para simular a carga abrasiva, são utilizadas 11 esferas de aço (Figura 20), que perfazem uma massa total compreendida de entre 4690 g e 4860 g.



Figura 18 – Preparação do material para ensaio



Figura 19 – Equipamento utilizado



Figura 20 – Colocação da amostra no tambor juntamente com as esferas de aço



Figura 21 – Material recolhido após ensaio

### 3.2.6.5 Massa volúmica real

A massa volúmica define-se como sendo o quociente entre a massa e o volume do material, indicando a quantidade de material existente por unidade de volume.

O ensaio para determinação deste parâmetro, foi baseado nas especificações da norma NP EN 1097 – 6 (2003).

A massa é determinada a partir da pesagem do provete com as partículas saturadas com superfície seca e a partir de uma outra pesagem do mesmo provete, após secagem em estufa. Por sua vez, o volume é determinado pela massa de água deslocada, podendo ser determinado ou por redução da massa no método do cesto de rede metálica, ou por pesagens no método do picnómetro. Para este estudo, aplicou-se o método do picnómetro para as partículas de agregado de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm.

Para as partículas de Ecc entre 0,063 mm e 4 mm, iniciou-se o ensaio realizando uma lavagem da amostra sobre o peneiro de 4 mm e sobre o de 0,063 mm (Figura 22), de modo a rejeitar as partículas mais finas e rejeitando as partículas retidas no peneiro de 4mm, até obter uma massa de 1000g.



Figura 22 – Lavagem da amostra

Deixou-se escorrer a amostra, imergiu-se o material no picnómetro com água a  $(22\pm 3)$  °C (Figura 24) e eliminou-se o ar ocluso, fazendo rodar e agitando o picnómetro em posição inclinada. De seguida, e de acordo com a norma, foi colocado o picnómetro em banho-maria a  $(23\pm 3)$  °C, durante  $(24\pm 0,5)$  h.



Figura 23 - Picnómetro

Posteriormente, fez-se transbordar o picnómetro por adição de água, colocou-se a tampa sem deixar ar no picnómetro, limpando-se por fora e registou-se a massa, denominada de  $M_2$  e a temperatura da água.

O agregado foi removido do picnómetro, voltando a encher-se de água e colocou-se a tampa como anteriormente, limpou-se o picnómetro por fora, registou-se o seu peso ( $M_3$ ) e a temperatura da água.

Segundo a norma, a diferença de temperatura da água dentro do picnómetro nas duas pesagens não deverá exceder os 2 °C.

Após o agregado ser retirado do picnómetro, é espalhado de forma uniforme na base de um tabuleiro (Figura 24), deixando-se arrefecer até à evaporação da água à superfície, mas encontrando-se o agregado com um aspeto húmido. É registado o valor de  $M_1$ , sendo de seguida colocado numa estufa ventilada à temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C, até massa constante ( $M_4$ ).



Figura 24 – Espalhamento da Ecc no tabuleiro

Para se avaliar se o estado da superfície seca foi atingido, é utilizado um molde troncocónico de metal, com a maior abertura virada para baixo, sobre a base do tabuleiro. Este molde é cheio livremente e apilado com 25 pancadas sobre a abertura do molde. Tal processo é realizado até que o cone de agregado se deforme quando desmoldado (Figura 25).



Figura 25 – Agregado completamente deformado

Com o valor das massas  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$ , calculam-se as massas volúmicas das partículas, seguindo o método preconizado na NP EN 1097-6 (2003).

### 3.3 Preparação da matéria-prima, composições e cura

#### 3.3.1 Processo de britagem dos resíduos

Neste estudo foram utilizados resíduos que necessitaram de transformação para poderem ser aplicados em betões. Os resíduos foram utilizados com a menor transformação possível para evitar custos desnecessários.

Para o estudo em argamassas pretendia-se, com todos os resíduos usados, substituir o agregado fino de dimensão 0/2. Os resíduos com necessidade de britagem foram processados para essa dimensão. O facto do agregado britado 0/2 ter apresentado excelentes resultados nas resistências mecânicas das argamassas, levou a que se tenha optado por também reproduzir a areia de dimensão 0/4 no estudo de desenvolvimento de novas formulações em betão. No quadro 9 apresentam-se os resíduos utilizados e o correspondente processo de transformação.

Quadro 9 - Resíduos utilizados no fabrico de argamassas e processo de transformação

Resíduos utilizados	Simbologia	Processo de transformação
Escórias	Ece	Britagem
	Ecc	Britagem
	Ev	Britagem
Areias de fundição	Afa	Sem processamento
	Afp	Sem processamento

Os “agregados” artificiais grossos de escórias foram alvo de um processo de fragmentação por britagem, levando-os a granulometria compatíveis para utilização como agregado fino em argamassas e betões. Na figura 26 apresentam-se diferentes tamanhos dos fragmentos da Ece.



Figura 26 – Exemplo de fragmentos de escórias de fundição de ferrosos (Ece)

O processo de britagem dependeu do tipo de equipamento disponível (Figura 27) e da origem do resíduo a processar. No caso das escórias, devido à existência de metais ferrosos e não ferrosos na Ece e Ecc, o processo de britagem desenvolveu-se em fases variadas de fragmentação. A granulometria final da escória britada 0/2 obteve-se após britagens sucessivas com espessuras do mecanismo de fragmentação de 20 mm, 10 mm, 5 mm e 0 mm, esta última equivalente a 2 mm. Para se obter a escória britada 0/4 foi necessário realizar a mistura de frações, 60% e 40%, obtidas por britagem com espessuras do mecanismo de fragmentação de 2 mm e 0 mm, o equivalente a 4 mm e 2 mm. O material ferroso foi parcial e maioritariamente removido por passagens sucessivas de um ímã antes e após o processo de britagem. As percentagens de remoção variaram entre os 3% e 11% para a escória Ecc e Ece, respetivamente.



Figura 27 – Britadeira utilizada

### 3.3.2 Formulações e metodologia

A seleção dos resíduos será realizada após estudos paramétricos iniciais em argamassas fabricadas em laboratório (fase 1) com o intuito de estimar o desempenho dos resíduos quando incorporados em betões (fase 2).

#### 3.3.2.1 Argamassas

Na formulação das argamassas foram utilizados 450g de cimento CEM II 42,5R; 1350g de areia fina 0/2, num traço em peso aproximado de 1:3, e foi, também, incorporado o adjuvante Pozzolith 476-N (1% da dosagem de cimento em massa).

Foram realizadas amassaduras, moldagem e conservação de 3 provetes 40x40x160 mm<sup>3</sup> por idade (7 e 28 dias), resultando em cerca de 42 misturas com areias e escórias de fundição preparadas de acordo com a norma NP EN 196-1 (2006): 2 misturas padrão com 100% de areia, 40 misturas com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição da areia natural pelo resíduo (em volume).

Os provetes foram conservados em água a  $(20,0 \pm 1,0)$  °C, sendo todo o processo de cura realizado de acordo com a norma NP EN 196-1 (2006).

As metades dos provetes provenientes dos ensaios de flexão foram utilizadas para ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade.

A massa volúmica fresca das misturas foi controlada para verificar eventuais desvios no volume da mistura final fresca.

O parâmetro de controlo das misturas frescas será a trabalhabilidade, usando-se misturas com razão A/C constantes e outras variando A/C dependendo do espalhamento obtido. A consistência foi avaliada pela mesa de espalhamento, devendo ser plástica com diâmetros de espalhamento entre 140 mm e 170 mm (40 % e 70 %), ou seja,  $155 \pm 15$ mm ( $55 \pm 15$ %).

A caracterização química será realizada após seleção dos resíduos com bom desempenho nas argamassas. Alguns destes ensaios podem não ser necessários dependendo dos resultados obtidos.

### 3.3.2.2 Betões

Na formulação dos betões foram utilizados 324,44 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II 42,5R; 243,56 kg/m<sup>3</sup> de areia fina 0/2, 568,22 kg/m<sup>3</sup> de meia areia 0/4, 304,67 kg/m<sup>3</sup> de brita 8/16, 618,89 kg/m<sup>3</sup> de brita 11/12, 237,78 kg/m<sup>3</sup> de água e com incorporação de Pozzolite 476-N (1% da dosagem de cimento em massa).

Foram realizadas misturas, moldagem e conservação de diferentes provetes consoante os ensaios pretendidos, resultando em 3 provetes de mistura, por composição, para as 5 idades (3, 7, 28, 56 e 90 dias), 3 provetes por composição para os 28 dias (os mesmos), 6 provetes por composição para os 28 dias (2 cilindros de 100mm de diâmetro e 150mm de altura) e 2 vigas por composição para os 28 dias (100×100×500 mm<sup>3</sup>).

Após a moldagem, os provetes ficaram no molde, protegidos de choques ou vibrações e desidratação à temperatura, durante cerca de 20h. Após a remoção dos moldes, os provetes foram colocados em água a uma temperatura de (20,0 ± 2) °C, conforme a NP EN 12390-2 de 2009.

Face aos resultados alcançados com a aplicação das escórias em argamassas, 0/2, propôs-se incorporar a escória britada 0/2 e 0/4 no betão de referência, nas seguintes quantidades:

Ref. – referência;

E2 (100%) – 100% de substituição de areia 0/2;

E4 (100%) – 100% de substituição de areia 0/4;

E2-4 (100%) – 100% de substituição de areia 0/2 + 0/4;

E2-4 (100%-25%) – 100% de substituição de areia 0/2 + 25% de substituição de areia 0/4;

E2-4 (100%-50%) – 100% de substituição de areia 0/2 + 50% de substituição de areia 0/4.

O parâmetro de controlo das misturas frescas será a trabalhabilidade, usando-se misturas com razão A/C constantes e outras variando A/C dependendo do abaixamento obtido.

### 3.4 Métodos de ensaio

#### 3.4.1 Massa volúmica fresca

##### 3.4.1.1 Betões

A massa volúmica do betão fresco reflete a massa volúmica de cada um dos seus componentes (com particular ênfase dos agregados, por representarem a maior parte do seu volume) e o grau de compactação.

A determinação da massa volúmica fresca das misturas de betão foi determinada conforme a norma NP EN 12350-6 (2009).

Depois do recipiente ter sido calibrado, este foi pesado e registou-se a sua massa ( $m_1$ ). Posteriormente, o betão foi colocado neste recipiente, em duas camadas e foi compactado numa mesa vibratória, o tempo mínimo necessário para atingir a completa compactação.

Uma vez compactada, a camada superior foi nivelada com a ajuda de uma rasoira, ao nível da parte superior do recipiente e enxugou-se bem o exterior do recipiente. De seguida, pesou-se o recipiente e o seu conteúdo e registou-se a massa ( $m_2$ ).

A massa volúmica ( $\rho$ ) é calculada pela razão entre a massa da amostra e o volume do recipiente que a contém ( $v$ ).



Figura 28 – Compactação em mesa vibratória

### 3.4.1.2 Argamassas

A determinação da massa volúmica fresca das argamassas foi realizada de igual modo ao descrito anteriormente, de acordo com a NP EN 12350-6 (2009).

### 3.4.2 Teor de ar

#### 3.4.2.1 Betões

A determinação do volume de ar no betão fresco tem como finalidade determinar a quantidade de ar presente na amassadura, cujo valor é um indicativo da moldabilidade do betão fresco.

De acordo com a norma NP EN 12350-7 (2009), determinou-se o teor de ar das misturas de betão realizadas, através do método do manómetro, ilustrado na figura 29.



Figura 29 - Manómetro

### 3.4.3 Ensaio de abaixamento

#### 3.4.3.1 Argamassas

O espalhamento é um ensaio de controlo de qualidade das argamassas frescas, nomeadamente da sua consistência e fluidez. A consistência das amassaduras de argamassa foi determinada segundo a norma NP EN 1015-3 (1999).



Figura 30 – Realização do ensaio de espalhamento



Figura 31 – Medição dos diâmetros em direções perpendiculares

### 3.4.3.2 Betões

A avaliação da trabalhabilidade foi realizada pela determinação da consistência do betão que, por sua vez, foi estimada através do ensaio de abaixamento, executado de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009).



Figura 32 – Ensaio de abaixamento no Cone de Abrams

### 3.4.4 Resistência à rotura por flexão

#### 3.4.4.1 Argamassas

O ensaio da resistência à flexão tem como objetivo determinar qual a resistência à tração das composições por flexão, valor importante para o comportamento de elementos à flexão em estados limites últimos de utilização.

De acordo com a norma NP EN 196-1 (2006), determinou-se a resistência à rotura por flexão das amassaduras realizadas. Os ensaios incidiram sobre 3 provetes prismáticos com a secção transversal de  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}^2$  e com 160 mm de comprimento, simplesmente apoiados, cuja carga foi aplicada com uma velocidade de 50 N/seg.

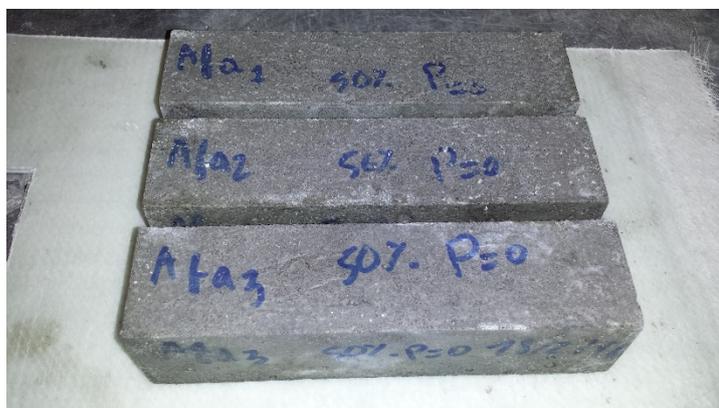


Figura 33 - Exemplo dos provetes utilizados para o ensaio de resistência à flexão

### 3.4.5 Resistência à rotura por compressão

#### 3.4.5.1 Argamassas

A resistência à compressão é um dos parâmetros que tem sido estudado com maior incidência, cuja determinação foi realizada segundo a norma NP EN 196-1 de 2006, tendo sido aplicada uma carga constante com uma velocidade de 2,7 kN/seg. Foram utilizadas as metades dos provetes depois de sujeitos ao teste de resistência à flexão.

#### 3.4.5.2 Betões

Foi determinada a resistência à compressão dos provetes de betão de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2003). Esta propriedade é medida através de ensaios de compressão axial, em provetes cúbicos de 15 cm de aresta, para 28 dias de idade. Por vezes pode ser útil estimar ou

avaliar a resistência à compressão a idades diferentes dos 28 dias (menores ou superiores) no sentido de se obter a curva de endurecimento do betão ou por outros motivos específicos como para reforço de estruturas em idades avançadas.

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga axial uniforme vertical, neste caso em estudo, às velocidades constantes de 13,5 kN/seg e 7 kN/seg para provetes cúbicos de 150 mm e 100 mm de aresta (estes últimos com o objetivo de estudar a progressão da resistência à compressão ao longo do processo de cura dos provetes), respetivamente, registando-se a carga máxima atingida (carga de rotura).

### 3.4.6 Absorção de água

#### 3.4.6.1 Por capilaridade, em argamassas

A determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade nos provetes de argamassa foi cumprida de acordo com a NP EN 1015-18 (2002). Foram utilizadas as metades dos provetes resultantes dos ensaios de resistência à flexão que não foram utilizados para os ensaios de resistência à rotura por compressão. Em todos os provetes optou-se por sujeitar à penetração de água por capilaridade uma das faces resultantes da operação de corte dos provetes prismáticos utilizados nos ensaios de flexão. Os provetes foram impermeabilizados lateralmente com silicone.



Figura 34 - Colocação dos provetes em água para ensaio de absorção por capilaridade

### 3.4.6.2 Por capilaridade, em betões

A absorção de água do betão endurecido é uma das propriedades diretamente relacionadas com a sua durabilidade. Este parâmetro traduz a facilidade com que a água penetra pelos poros e fendas do betão. Sendo a água o principal meio de transporte de substâncias nocivas para o betão, é importante efetuar a avaliação da absorção de água, particularmente por capilaridade.

A nível físico esta absorção dá-se devido à diferença de pressão entre a superfície livre do betão e no interior dos poros capilares e divide-se em duas fases: na primeira fase, dá-se uma absorção rápida que corresponde à entrada da água nos poros mais facilmente acessíveis; na segunda fase, ocorre uma absorção mais lenta devido à entrada de água em poros de reduzida dimensão.

No que refere a este ensaio, foi seguida a Especificação LNEC E393 (1993). Os provetes utilizados para ensaio de absorção de água por capilaridade foram os mesmos que os usados para ensaio de absorção de água por imersão. Após deixados em cura até a uma idade mínima de 28 dias, os provetes foram secos em estufa a  $\pm 100$  °C até massa constante, e conservados em estufa a 50 °C para ensaio aos 42 dias de idade. Em determinados períodos de tempo, os provetes foram pesados e mediu-se a altura de água atingida desde a face inferior do provete até perfazerem 72 horas. De modo a conseguir manter apenas a face inferior do provete em contacto com a água do recipiente, este foi impermeabilizado com uma faixa de silicone, colocada em água a uma profundidade de 5 mm, como mostra a figura 35.



Figura 35 - Colocação dos provetes em água a uma profundidade de 5mm

### **3.4.6.3 Por imersão, em betões**

A absorção de água por imersão à pressão atmosférica nos provetes de betão foi determinada segundo a especificação do LNEC E394 (1993), por imersão total das misturas realizadas. Esta medição permite indiretamente determinar a porosidade aberta do betão em estudo.

Os ensaios incidiram sobre provetes cúbicos com 100 mm de aresta. Os provetes permaneceram totalmente imersos para ensaio até aos 28 dias de idade.

Após 28 dias de cura húmida, os provetes foram pesados e colocados em estufa de forma a perderem humidade, considerando-se secos quando a variação do seu peso em dias consecutivos foi inferior a 0,1%. Após a secagem, os provetes foram introduzidos num recipiente, no qual se adicionou água sucessivamente, até ficarem totalmente submersos e saturados.

Considerou-se que foi alcançada uma massa constante do provete saturado, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, foi inferior a 0,1% da média das duas leituras. Antes de cada pesagem, o provete foi limpo com um pano absorvente, de modo a remover a água superficial.

Após alcançada a massa constante, o provete foi pesado dentro de água, registando-se a sua massa hidrostática ( $M_2$ ).

De seguida, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , até obter massa constante ( $M_3$ ).

## **3.4.7 Coeficiente de difusão de cloretos**

### **3.4.7.1 Betões**

A penetração de cloretos foi conduzida e calculada de acordo com a Especificação LNEC E463 de 2004.

O método requer provetes cilíndricos com um diâmetro de 100 mm e uma altura de 50 mm, obtidos, neste caso, por corte a partir de cilindros moldados com um comprimento de 100 mm. Os provetes cilíndricos realizaram-se conforme os requisitos descritos na NP EN 12390-2 (2009).

### 3.4.8 Resistência à carbonatação

#### 3.4.8.1 Betões

A determinação da resistência à carbonatação dos provetes de betão foi obtida conforme a norma E391 (1993) da Especificação LNEC.

O ensaio foi realizado em amostras de betão provenientes de provetes moldados em laboratório para o efeito, com secção transversal de 100 mm × 100 mm e comprimento de 500 mm. Os provetes foram previamente curados em água a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 14 dias e posteriormente curados em ar a uma humidade relativa de  $50 \pm 5\%$  e temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , até atingir 28 dias de idade. Os topos dos provetes foram protegidos com um revestimento selante (parafina aquecida com uma pequena percentagem de vaselina) para que o acesso do  $\text{CO}_2$  se fizesse unicamente por duas superfícies laterais (ver figura 36). De seguida, os provetes foram colocados na câmara que se encontrava a  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , humidade relativa de 55%-65% e uma alimentação de ar com  $5 \pm 0,1\%$  de  $\text{CO}_2$ .



Figura 36 - Impermeabilização com parafina

### 3.4.9 Ensaio de retração

#### 3.4.9.1 Argamassas

O ensaio de determinação da retração foi efetuado com base na norma NP-1381 (1976).

As misturas utilizadas para a realização deste ensaio foram produzidas de acordo com a norma ASTM C305.

Foram realizadas duas misturas com 3 provetes de dimensões  $25 \times 25 \times 250 \text{ mm}^3$ , uma contendo uma fração de Ecc entre 0/4,75mm em substituição da areia e outra com areia 0/2. A

compactação das misturas foi realizada por um pilão até atingir homogeneização. As composições das argamassas seguem o descrito na norma, isto é, a massa total de agregado é de 990g, repartidas em frações correspondentes às aberturas dos peneiros de 4,75/2,36 mm, 2,36/1,18 mm, 1,18mm/600  $\mu\text{m}$ , 600/300  $\mu\text{m}$  e 300/150  $\mu\text{m}$ , obtendo de cada uma 10%, 25%, 25%, 25% e 15% de agregado em massa, respetivamente, perfazendo assim 990g. A quantidade de cimento é de 440g e a razão água/cimento de 0,47.

Para cada composição produziram-se 6 provetes, uma vez que se avaliaram os resultados de dois processos de cura distintos e distintos do referido na norma: um deles envolve a selagem dos provetes com embalagens de plástico com fecho hermético, por forma a medir a retração autógena, e o outro consistiu na cura numa câmara climatizada à temperatura de 19°C e humidade relativa de 75% medindo-se assim a retração global, possibilitando estimar a retração por secagem.



Figura 37 - Moldagem dos provetes



Figura 38 - Equipamento utilizado para medição da variação das extensões

### 3.4.10 Ensaio potencial de reação álcalis-agregados

#### 3.4.10.1 Argamassas

A reatividade alcalis-sílica no betão é uma variedade particular da reação química que ocorre entre a sílica reativa existente em alguns constituintes mineralógicos do agregado com os hidróxidos alcalinos (sódio e potássio) presentes na água dos poros no cimento Portland.

Esta reação pode provocar a formação de um gel higroscópico expansivo (Figura 39), que absorve água e se expande, exercendo pressões internas no betão.



Figura 39 - Formação de gel

Nesse sentido, realizou-se o ensaio para a verificação destas reações seguindo-se o procedimento especificado na norma ASTM C1260-01. O agregado foi peneirado até se obter a quantidade suficiente que cumprisse os requisitos da tabela 1 da mesma.

Para a realização deste ensaio foram realizadas três composições: uma contendo areia 0/2, outra contendo escória, Ecc, e por último outra com substituição parcial de 47% de escória, de modo a verificar a reatividade da argamassa resultante, em conformidade com a composição do betão definido no estudo deste trabalho. As composições das argamassas foram as mesmas que as utilizadas no ensaio de retração, tendo sido feitas as respetivas correções para a composição com 47% de escória.

Os provetes foram conservados em estufa, dentro dos moldes, a uma temperatura de 19°C e 75% de humidade relativa, durante 24 horas. Após a desmoldagem, os provetes de cada composição foram colocados num recipiente contendo água, de modo a ficarem totalmente submersos e armazenados em estufa à temperatura de 80°C durante 24 horas. Após medição,

foram colocados num recipiente com solução de NaOH, ficando totalmente submersos e armazenados novamente em estufa. Após 14 dias da leitura zero, aproximadamente à mesma hora, foi realizada outra leitura. As extensões foram determinadas pela razão entre a diferença da leitura de cada provete e a da barra padrão, ao fim de um tempo (t), pelo comprimento de medida.

Relativamente à solução de NaOH, esta foi preparada de forma a cada litro de solução conter 40,0g de hidróxido de sódio em 900mL de água, diluída com água destilada adicional para obter 1,0l de solução, até perfazer a quantidade suficiente para assegurar a imersão de todas as barras de argamassa.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Argamassas

#### 4.1.1 Caracterização no estado fresco

A consistência das argamassas foi avaliada pela mesa de espalhamento para todas as composições realizadas. À partida, o aumento da razão água/cimento faz aumentar o espalhamento das argamassas. Neste estudo, a dosagem de água foi sendo ajustada à medida que se aumentava a percentagem de substituição do resíduo, de modo a obter-se aproximadamente a mesma consistência em todas as argamassas, devendo esta ser plástica com diâmetros de espalhamento entre 140mm e 170mm. Nas misturas em que o limite inferior foi verificado adicionou-se mais água e repetiu-se algumas das percentagens com adição de superplastificante e menos quantidade de água. Nos casos em que o limite superior foi ultrapassado prescindiu-se do uso de plastificante.

Quadro 10 - Resultados do espalhamento das argamassas

		Ece		Ecc		Ev		Afa		Afp	
		A/C	E (mm)								
% Substituição	0%	0,67	154,75	0,67	154,75	0,67	154,75	0,67	154,75	0,67	152,50
	25%	0,67	161,25	0,67	173,75	0,67	169,75	0,67	177,25	0,72	151,50
	50%	0,67	176,00	0,63	153,00	0,63	172,50	0,59	168,75	0,72	140,50
	75%	0,63	149,25	0,58	162,00	0,58	146,50	0,53	161,25	0,76	150,00
	100%	0,63	142,50	0,56	165,50	0,58	171,38	0,53	172,00	0,81	142,50
	50% P=0%							0,59	137,00		
	50% SP=2%									0,67	146,00

Os valores da massa volúmica fresca das argamassas estudadas encontram-se no quadro 11.

Quadro 11 - Resultados dos valores da massa volúmica fresca

		Massa volúmica fresca (kg/m <sup>3</sup> )				
		Ece	Ecc	Ev	Afa	Afp
%	0%	2062,0	2062,0	2062,0	2062,0	2062,0
	25%	2147,0	2064,0	2084,0	1889,0	2023,0
	50%	2195,0	2079,0	2150,0	1718,0	1979,0
	75%	2248,0	2103,0	2142,0	1728,0	1934,0
	100%	2289,0	2120,0	2144,0	1677,0	1880,0
	50% - P=0%				2004,0	
	50% - SP=2%					1966,0

Da análise da mesma é possível observar que nas composições com substituição por escórias, os valores da massa volúmica fresca aumentam com o acréscimo da percentagem de substituição. Este desenvolvimento seria espectável uma vez que, sendo as escórias resultantes da indústria de fundição de ferrosos, apresentam massas volúmicas superiores às do agregado convencional. Nas argamassas realizadas com Ece esse aumento chega aos 11%; nas argamassas incorporando Ecc esse aumento é inferior e chega aos 2,74%, e nas argamassas com Ev o aumento da massa volúmica fresca é coerente com a razão A/C e com a maior massa volúmica real da escória, chegando aos 3,84%. Relativamente às composições contendo areias de fundição, o processo é inverso, o que significa que estas apresentam massa volúmica inferior comparativamente com as areias naturais utilizadas. Assim, para as argamassas realizadas com Afa existe uma diminuição da massa volúmica fresca da mistura até cerca de 19% e para as realizadas com Afp uma diminuição gradual até cerca de 9%.

## 4.1.2 Caracterização no estado endurecido

### 4.1.2.1 Resistência à rotura por flexão

Os resultados da resistência à flexão obtidos nas argamassas de todas as séries produzidas estão apresentados nos quadros 12 a 16, onde constam os valores médios e respetivos coeficientes de variação, resultantes do ensaio de três provetes de cada amassadura e para cada uma das idades de ensaio (7 e 28 dias).

Quadro 12 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ece

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à flexão	
		Rf (MPa)	C. variação (%)
Ece 0%	7	5,32	6,58
	28	6,11	2,45
Ece 25%	7	5,42	2,58
	28	6,02	3,82
Ece 50%	7	5,40	4,26
	28	6,31	5,23
Ece 75%	7	6,15	2,93
	28	6,64	4,82
Ece 100%	7	5,90	1,36
	28	6,23	1,61

Quadro 13 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ecc

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à flexão	
		Rf (MPa)	C. variação (%)
Ecc 0%	7	5,32	6,58
	28	6,11	2,45
Ecc 25%	7	5,22	0,00
	28	6,44	2,17
Ecc 50%	7	5,78	0,00
	28	6,61	3,03
Ecc 75%	7	6,24	1,44
	28	7,39	4,06
Ecc 100%	7	5,98	2,68
	28	7,39	4,06

Quadro 14 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Ev

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à flexão	
		Rf (MPa)	C. variação (%)
Ev 0%	7	5,32	6,58
	28	6,11	2,45
Ev 25%	7	5,51	2,18
	28	6,49	3,08
Ev 50%	7	5,81	4,65
	28	6,27	2,07
Ev 75%	7	5,60	4,46
	28	6,42	3,27
Ev 100%	7	5,38	6,13
	28	6,73	1,04

Quadro 15 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Afa

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à flexão	
		Rf (MPa)	C. variação (%)
Afa 0%	7	5,32	6,58
	28	6,11	2,45
Afa 25%	7	3,93	4,07
	28	4,70	2,55
Afa 50%	7	3,15	5,08
	28	3,65	0,00
Afa 75%	7	2,81	0,36
	28	3,77	6,37
Afa 100%	7	1,48	0,00
	28	3,52	0,28
Afa 50% - P=0%	7	-	-
	28	5,52	1,63

Quadro 16 - Valores de resistência à flexão para argamassas com Afp

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à flexão	
		Rf (MPa)	C. variação (%)
Afp 0%	7	5,32	6,58
	28	6,11	2,45
Afp 25%	7	5,03	4,17
	28	5,81	0,17
Afp 50%	7	4,13	2,18
	28	5,53	2,35
Afp 75%	7	4,13	2,20
	28	5,11	4,11
Afp 100%	7	3,81	3,80
	28	5,49	5,65
Afp 50% - SP=2%	7	4,60	3,38
	28	5,33	2,81

O desenvolvimento das curvas de evolução da resistência à flexão para os 5 resíduos em função da percentagem de substituição, nas idades de 7 e 28 dias, pode ser observado nas figuras 40 e 41.

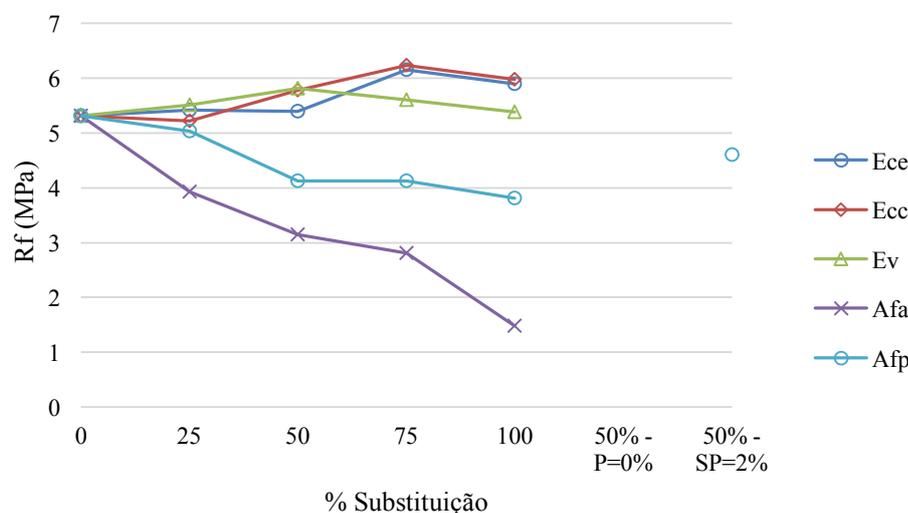


Figura 40 - Resistência à flexão das argamassas aos 7 dias

Através da figura 40, verifica-se que aos 7 dias de idade as amassaduras com substituição da areia natural por areias de fundição, no geral, apresentam valores de resistência à flexão inferiores aos da mistura de referência (0% substituição). Mais ainda, estes valores diminuem à medida que se vai aumentando a quantidade do resíduo na amassadura. Verifica-se ainda que

a adição de 2% de superplastificante permitiu um aumento na resistência à flexão pouco significativo. Relativamente à substituição por escórias, verifica-se uma grande aproximação entre as composições contendo Ece e Ecc, tendo para estas se observado o valor de resistência à flexão máxima com 75% de substituição de agregado e para a composição com Ev esse mesmo valor obtido com 50% de substituição.

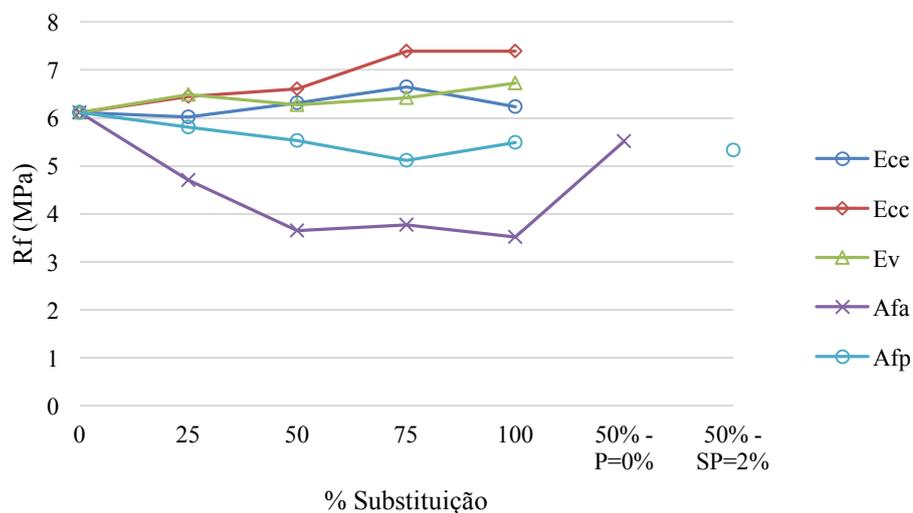


Figura 41 - Resistência à flexão das argamassas aos 28 dias

Aos 28 dias de idade o mesmo se pode concluir para as areias de fundição no geral. Verifica-se ainda que a adição de superplastificante (Glenium C313) e respetiva redução da razão A/C na composição com areia de fundição preta não surtiu qualquer efeito no valor da resistência à flexão, ao contrário do que aconteceu na composição com areia de fundição amarela. Nesta, a eliminação do plastificante fez surgir uma redução menos acentuada da resistência à flexão, podendo-se associar que existe uma reação deste plastificante (Pozzolith 476-N) com a areia de fundição amarela, introduzindo ar na mistura. No que refere à substituição por escórias de fundição, observa-se que existe uma grande aproximação entre elas, destacando-se a amassadura com Ecc, cuja resistência à flexão aumenta até uma substituição de 75%, mantendo-se constante até 100%. Aliás, para todas as composições realizadas, verifica-se que existe uma tendência de estabilização dos valores da resistência à flexão a partir de uma percentagem de substituição de 75%.

#### 4.1.2.2 Resistência à rotura por compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão obtidos nas argamassas de todas as séries produzidas apresentam-se nos quadros 17 a 21 onde constam os valores médios e respetivos coeficientes de variação, resultantes do ensaio de três provetes de cada amassadura e para cada uma das idades de ensaio (7 e 28 dias).

Quadro 17 - Resistência à compressão para argamassas com Ece

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. variação (%)
Ece 0%	7	20,52	3,61
	28	22,66	0,75
Ece 25%	7	20,94	3,16
	28	24,01	2,13
Ece 50%	7	21,79	3,62
	28	27,64	5,40
Ece 75%	7	23,94	3,18
	28	28,64	4,23
Ece 100%	7	23,98	1,54
	28	29,31	0,82

Quadro 18 - Resistência à compressão para argamassas com Ecc

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. variação (%)
Ecc 0%	7	20,52	3,61
	28	22,66	0,75
Ecc 25%	7	20,77	2,36
	28	26,54	2,42
Ecc 50%	7	21,68	5,16
	28	28,37	3,03
Ecc 75%	7	26,83	3,62
	28	35,79	1,76
Ecc 100%	7	31,44	3,15
	28	38,10	1,81

Quadro 19 - Resistência à compressão para argamassas com Ev

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. variação (%)
Ev 0%	7	20,52	3,61
	28	22,66	0,75
Ev 25%	7	20,01	4,70
	28	26,44	1,86
Ev 50%	7	20,84	2,50
	28	28,36	3,87
Ev 75%	7	24,77	3,87
	28	31,33	6,87
Ev 100%	7	29,21	6,37
	28	34,55	2,14

Quadro 20 - Resistência à compressão para argamassas com Afa

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. variação (%)
Afa 0%	7	20,52	3,61
	28	22,66	0,75
Afa 25%	7	13,37	1,49
	28	17,15	3,95
Afa 50%	7	9,56	6,98
	28	12,98	2,62
Afa 75%	7	9,21	10,00
	28	14,01	3,50
Afa 100%	7	9,86	2,32
	28	12,84	1,41
Afa 50% - P=0%	7	-	-
	28	19,94	5,38

Quadro 21 - Resistência à compressão para argamassas com Afp

Argamassa	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. variação (%)
Afp 0%	7	20,52	3,61
	28	22,66	0,75
Afp 25%	7	17,60	3,95
	28	21,90	0,80
Afp 50%	7	17,10	4,12
	28	20,60	0,80
Afp 75%	7	14,30	5,95
	28	20,00	6,34
Afp 100%	7	13,50	3,24
	28	19,50	5,50
Afp 50% - SP=2%	7	17,50	3,21
	28	22,80	6,34

O desenvolvimento das curvas de evolução da resistência à compressão para os 5 resíduos em função da percentagem de substituição pode ser observado nas figuras 42 e 43.

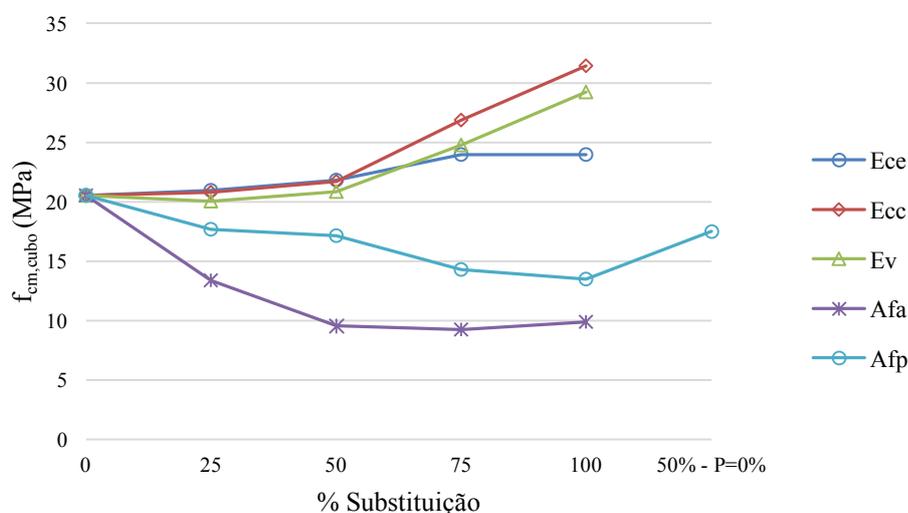


Figura 42 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias

Verifica-se, por intermédio da análise da figura 42, que aos 7 dias de idade os provetes com substituição de areia natural por areias de fundição apresentam valores de resistência à compressão inferiores à mistura de referência (0% substituição). Verifica-se, ainda, que a eliminação de plastificante na mistura com areia de fundição preta com 50% de substituição aumentou ligeiramente o valor da resistência à compressão. Este aumento, ainda que marginal,

não seria de esperar, uma vez que a incorporação de plastificante faz reduzir a quantidade de água utilizada na amassadura e, conseqüentemente, deveria provocar um incremento na resistência.

Relativamente às composições realizadas com escórias, observa-se que a composição com Ev e Ecc apresentam um aumento quase que paralelo da resistência à compressão à medida que se aumenta a percentagem de substituição, embora aquela última apresente valores superiores, sendo portanto, a que se destaca.

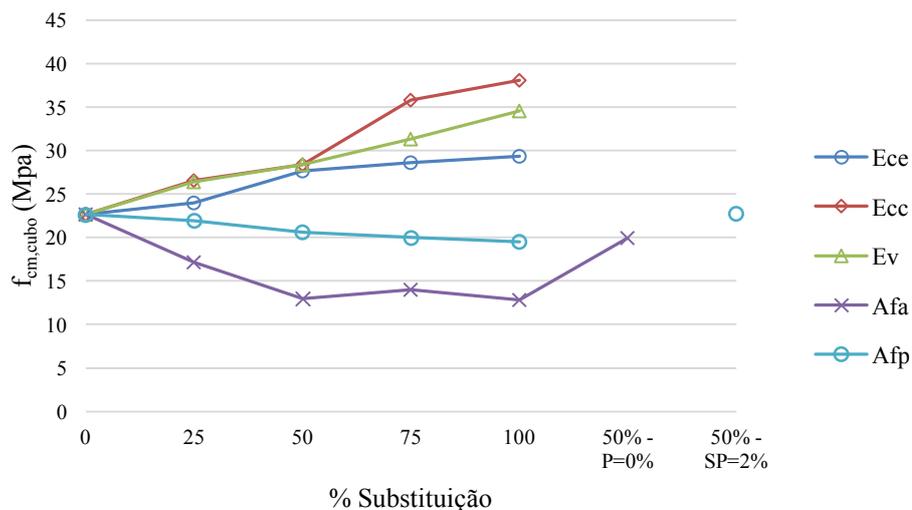


Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias

No que concerne à resistência à compressão aos 28 dias, todas as composições com escórias apresentam valores superiores à composição de referência e crescentes com o aumento da percentagem de substituição. Ainda assim, mais uma vez, a composição com Ecc é a que apresenta os valores mais elevados.

Relativamente às composições com areias de fundição, estas apresentam, no geral, um decréscimo nos valores da resistência à compressão à medida que a percentagem de substituição de resíduo aumenta. Mais ainda, a inclusão de superplastificante na composição com areia de fundição preta (Afp) provocou um aumento na resistência à compressão significativo para valores da mesma ordem de grandeza das outras composições, o que seria de esperar uma vez que este aditivo reduz a quantidade de água de amassadura necessária, aumentando assim a resistência à compressão dessa mistura. O contrário seria de esperar com a eliminação de plastificante na composição com areia de fundição amarela (Afa) uma vez que o adjuvante em

questão é também redutor de água. No entanto, isso não aconteceu, verificando-se que a Afa reage com o plastificante introduzindo ar no interior, tanto maior quanto maior for a % de substituição. Existe também uma tendência de estabilização dos valores da resistência à compressão para percentagens de substituição superiores a 75%.

### 4.1.2.3 Absorção de água por capilaridade

Nas figuras 44 a 48 representam-se as curvas médias de absorção capilar total correspondentes aos valores obtidos através do ensaio de dois provetes de cada composição. Estas curvas apresentam um desenvolvimento esperado e refletem a existência de três fases: a primeira parte da curva, com a maior inclinação, representa o preenchimento dos capilares de maior dimensão; a segunda representa o processo mais lento, de preenchimento dos capilares mais finos; a terceira e última fase corresponde à estabilização da água absorvida devido ao preenchimento da rede capilar.

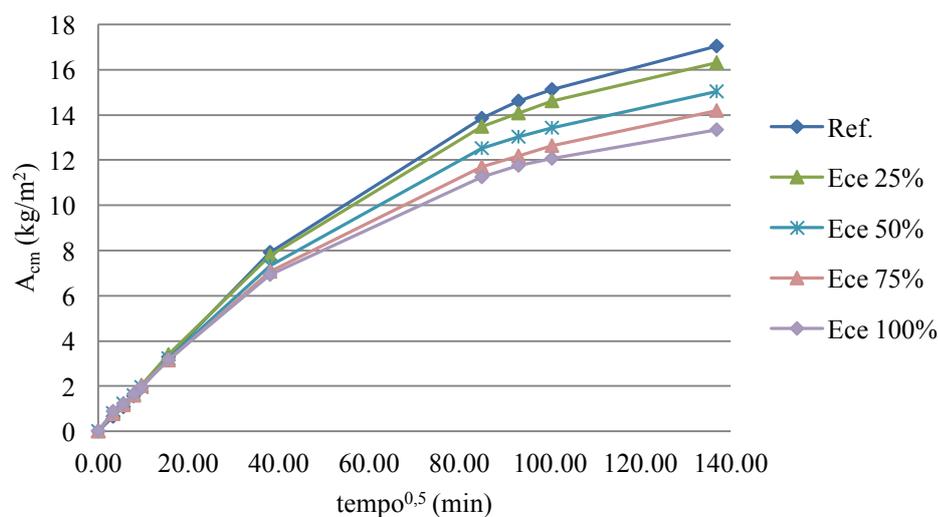


Figura 44 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ece

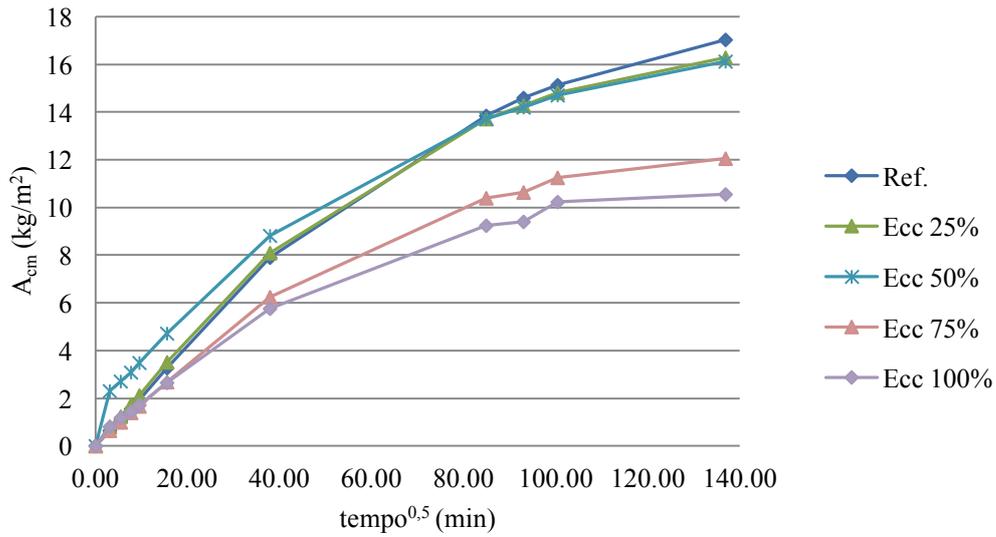


Figura 45 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ecc

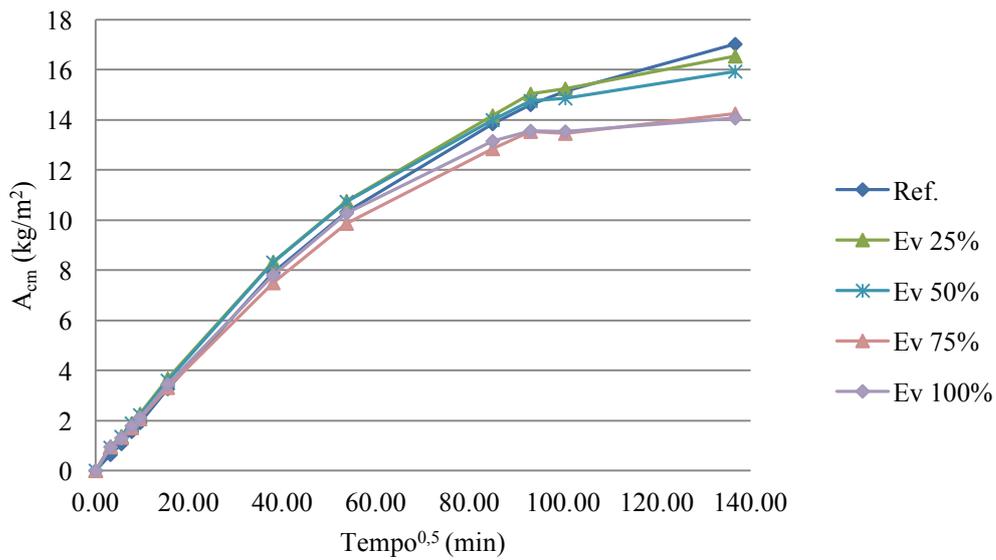


Figura 46 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Ev

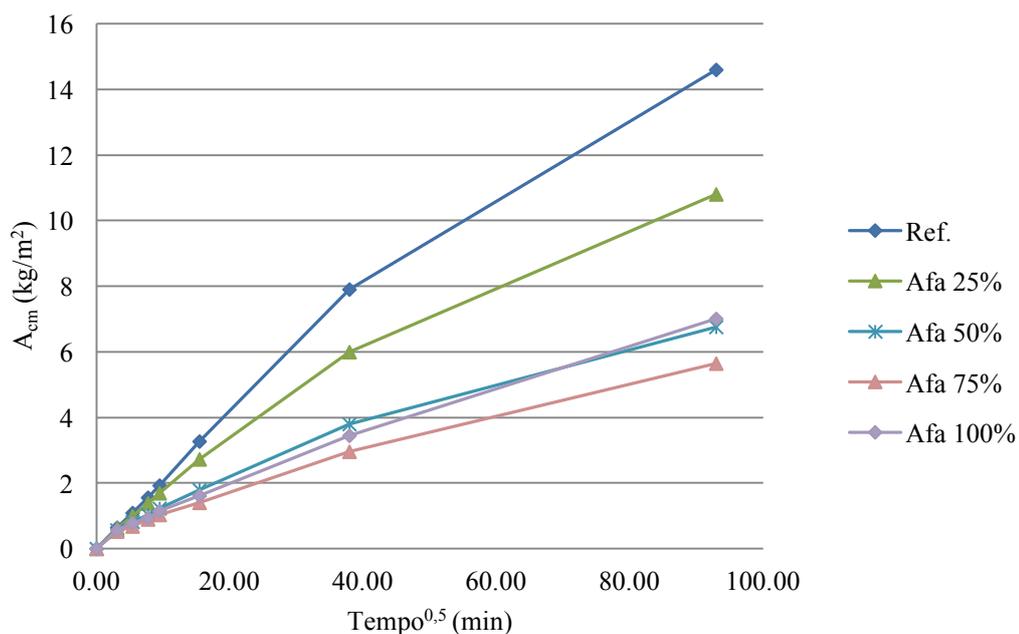


Figura 47 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Afa

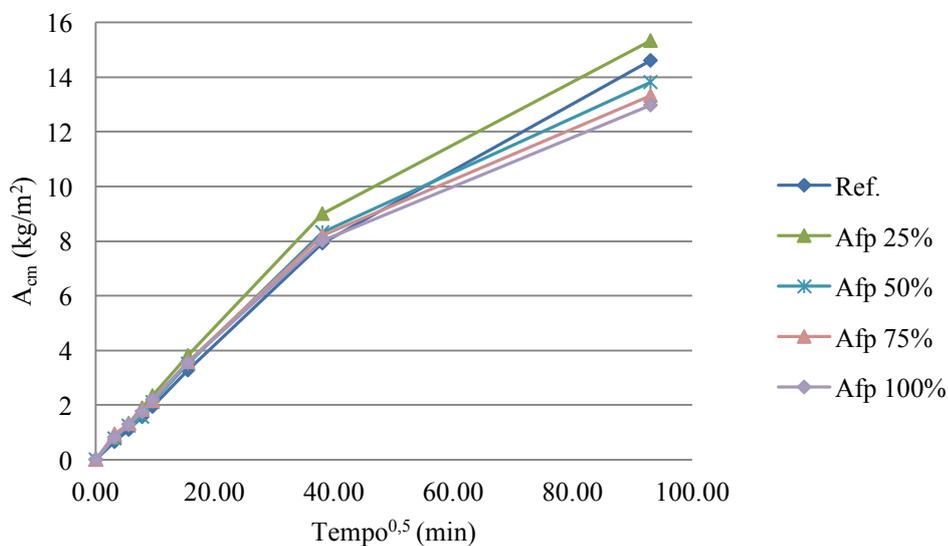


Figura 48 - Curvas médias da absorção capilar das composições com Afp

Da observação das figuras 44 a 48, é possível analisar os efeitos associados à presença de diferentes quantidades de resíduo substituído na cinética de absorção capilar das argamassas estudadas.

As curvas de absorção capilar obtidas apresentam desenvolvimentos semelhantes, contudo demonstram comportamentos distintos entre resíduos utilizados. No que diz respeito às argamassas realizadas com Ece, verifica-se que todas as composições apresentam menor absorção por capilaridade em relação à composição de referência. Verifica-se ainda que à medida que se faz aumentar a percentagem de substituição de resíduo, a absorção tende a diminuir. O mesmo se observa para as argamassas realizadas com Ecc e Ev, o que demonstra que a inclusão das escórias nas misturas contribuiu para a diminuição da porosidade capilar, principalmente para as percentagens de substituição de 75% e 100%.

Relativamente às misturas com areias de fundição, a mesma conclusão se pode tirar para argamassas realizadas com Afa; no entanto, para os provetes com Afp conclui-se que a substituição de 25% de areia não é benéfica.

Um dos parâmetros utilizados correntemente para caracterizar a durabilidade do betão é o respetivo coeficiente de absorção capilar, que corresponde ao declive inicial da curva de absorção capilar e, em geral, é calculado para as primeiras quatro horas de ensaio. A importância da quantificação deste parâmetro é justificada pelo facto de ele refletir o período de absorção capilar dos poros de maior diâmetro que podem ser considerados como meios para a penetração de fluidos (gasosos e líquidos) no betão.

Os coeficientes de absorção capilar,  $S$ , foram determinados de acordo com o método dos mínimos quadráticos, considerando apenas as primeiras quatro horas de ensaio. As aproximações realizadas revelaram-se adequadas, sendo disso demonstrativo o facto de os respetivos coeficientes de correlação linear,  $R^2$ , atingirem valores muito elevados. Os resultados médios obtidos apresentam-se nos quadros 22 a 26. A variação de  $S$  com a percentagem de substituição da quantidade de resíduo representa-se na figura 49.

Quadro 22 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ece

<b>Designação do Provete</b>	<b>S (kg/m<sup>2</sup>/min<sup>0.5</sup>)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Padrão	0,19	0,9972
	0,21	0,9927
Ece 25%	0,19	0,9963
	0,20	0,9992
Ece 50%	0,18	0,9979
	0,17	0,9959
Ece 75%	0,20	0,9842
	0,19	0,9998
Ece 100%	0,16	0,9901
	0,18	0,9945

Quadro 23 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ecc

<b>Designação do Provete</b>	<b>S (kg/m<sup>2</sup>/min<sup>0.5</sup>)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Padrão	0,19	0,9972
	0,21	0,9927
Ecc 25%	0,22	1,0000
	0,20	0,9951
Ecc 50%	0,18	0,9894
	0,19	0,9979
Ecc 75%	0,18	0,9993
	0,14	0,9857
Ecc 100%	0,14	0,9928
	0,13	0,9943

Quadro 24 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Ev

Designação do Provete	S (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>
Padrão	0,19	0,9972
	0,21	0,9927
Ev 25%	0,21	0,9959
	0,21	0,9931
Ev 50%	0,20	0,9951
	0,21	0,9924
Ev 75%	0,18	0,9987
	0,17	0,9959
Ev 100%	0,19	0,9963
	0,19	0,9853

Quadro 25 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Afa

Designação do Provete	S (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>
Padrão	0,19	0,9972
	0,21	0,9927
Afa 25%	0,17	0,9995
	0,17	0,9995
Afa 50%	0,10	0,9972
	0,12	0,9969
Afa 75%	0,08	0,9823
	0,08	0,9993
Afa 100%	0,08	0,9659
	0,10	0,9972

Quadro 26 - Coeficientes de absorção capilar, S, das argamassas com Afp

Designação do Provete	S (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>
Padrão	0,19	0,9972
	0,21	0,9927
Afp 25%	0,22	0,9919
	0,25	0,9999
Afp 50%	0,21	0,9978
	0,20	0,9338
Afp 75%	0,20	0,9931
	0,19	0,9951
Afp 100%	0,21	0,9978
	0,22	0,9919

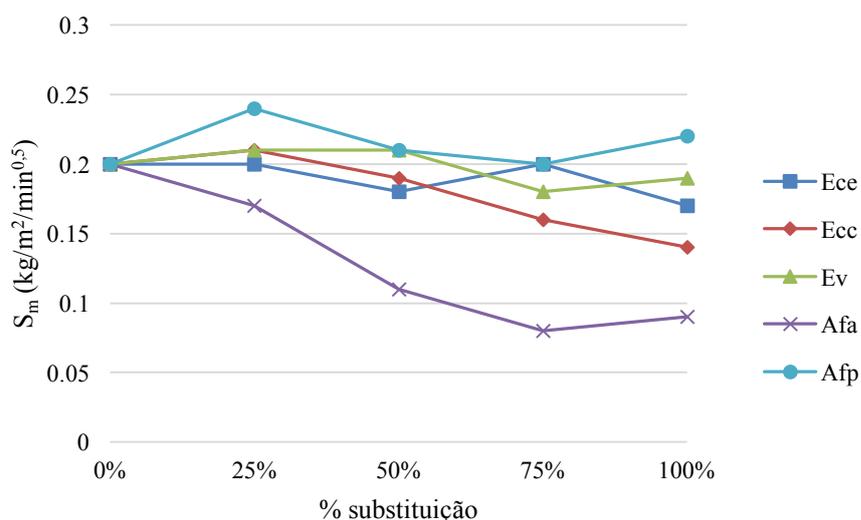


Figura 49 - Variação do coeficiente de absorção capilar em função da % de substituição

Conforme se pode constatar através da análise da figura 49, todas as argamassas realizadas com Afa apresentam coeficiente de absorção capilar inferior à composição de referência, e decrescente com o aumento da percentagem de substituição. Relativamente aos outros resíduos utilizados, existe uma grande aproximação entre as respetivas argamassas, destacando-se a argamassa realizada com Ecc, cujos valores de S diminuem com o acréscimo de percentagem de substituição por escória, o que significa o aumento da durabilidade dos respetivos betões. Verifica-se ainda que os valores dos coeficientes de absorção para as argamassas estudadas tendem a estabilizar para percentagens de substituição superiores a 75%.

## 4.2 Escolha justificativa do resíduo a incorporar em betões

Tal como já foi referido anteriormente, os estudos paramétricos iniciais em argamassas fabricadas em laboratório com a incorporação de cinco resíduos visavam a seleção de um deles com o intuito de estimar o desempenho do mesmo quando incorporado em betões.

No que refere às características mecânicas, com a substituição da areia 0/2 por escórias britadas Ece, Ecc e Ev verifica-se um aumento significativo nas resistências à compressão e flexão para todas as idades.

Relativamente à Afa, verifica-se que esta reage com o plastificante Pozzolith 476-N, introduzindo ar no interior, tanto maior quanto maior for a % de substituição. Apesar da redução da razão A/C verifica-se que as resistências mecânicas à compressão e flexão diminuem para as idades de 7 e 28 dias.

Com o aumento da % de substituição da Afp pela areia 0/2 verifica-se um aumento da razão A/C com consequência para a perda de resistência à compressão e flexão. Para aumentar a resistência à compressão, mantendo a trabalhabilidade dentro da consistência pretendida, na percentagem de substituição de 50% foi necessário adicionar 2% de superplastificante Glenium C313, facto este que poderá ter implicações no custo do betão.

Os resultados mais promissores foram obtidos nas argamassas com Ecc, com maior ganho na resistência à compressão, cerca de 68% (38,1 MPa) em comparação com a mistura de referência, e na maior percentagem de substituição 100%.

Para além disso, tiveram-se também em conta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo este um fator também importante na durabilidade do betão. Os resultados do ensaio demonstram que o coeficiente de absorção de água  $S_m$  é, dentro de todos os resíduos estudados, inferior nas argamassas com substituição de areia natural por areia de fundição amarela. No entanto, uma vez que este resíduo apresentou fraco desempenho nas resistências à flexão e compressão, sendo esta última um fator caracterizante da qualidade do betão, ficou excluída a hipótese da sua incorporação em betões. Assim sendo, verificou-se que, mais uma vez, as argamassas com escória Ecc foram as que apresentaram menor coeficiente de absorção de água, destacando-se esta para o efeito.

## 4.3 Betões

### 4.3.1 Caracterização no estado fresco

Os valores dos ensaios de caracterização no estado fresco encontram-se apresentados no quadro 27. Relembra-se que a formulação de referência não engloba a incorporação de escórias, a formulação E2 (100%) representa uma substituição de 100% da areia natural por escória 0/2, a E4 (100%) uma substituição de 100% por escória 0/4, na formulação E2-4 (100%) ambas as areias (0/2 e 0/4) foram totalmente substituídas por escórias, na formulação E2-4 (100%-25%) substituiu-se totalmente a areia natural 0/2 por escória e 25% da areia natural 0/4 por escória 0/4, e, por último, a formulação E2-4 (100%-50%) representa uma substituição de 100% de areia natural 0/2 por escória 0/2 e uma substituição parcial de 50% por escória 0/4.

Quadro 27 - Resultados dos ensaios de caracterização no estado fresco dos betões

Formulações	A/C	Massa volúmica fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar (%)	Abaixamento (mm)
Ref.	0,70	2274,0	2,8	95,0
E2 (100%)	0,70	2277,0	2,5	105,0
E4 (100%)	0,60	2302,0	2,5	95,0
E2-4 (100%)	0,65	2305,0	2,5	95,0
E2-4 (100%-25%)	0,63	2300,0	2,4	100,0
E2-4 (100%-50%)	0,60	2312,0	2,35	100,0

A massa volúmica dos materiais cimentícios, quando corretamente compactados, depende essencialmente da massa volúmica dos agregados, uma vez que a dosagem destes é normalmente superior à dos outros constituintes. Depende ainda da quantidade do ligante, do nível de compactação do material e da razão água/cimento.

A modificação dos betões com escórias afeta diretamente a sua massa volúmica, uma vez que, por um lado, reduz a água total a adicionar (pelo efeito de superplastificante), contribuindo para aumentar a massa volúmica, isto é, o aumento da razão água/cimento tem tendência para provocar uma diminuição na massa volúmica fresca das misturas. Por outro lado, o aumento do teor de ar incorporado das argamassas contribui para reduzir a massa volúmica, tal como foi observado.

Relativamente ao abaixamento, é de esperar que o aumento da razão água/cimento provoque espalhamentos superiores, não dispensando a influência da massa volúmica que quanto mais elevada for contribui para um maior abaixamento do cone de Abrams. Tal facto pode ser comprovado comparando, por exemplo, os valores do espalhamento da formulação de referência e da formulação com 100% de substituição da areia 0/2. Para a primeira, o abaixamento obtido foi de 95mm. Para a mesma razão água/cimento (0,70), a formulação 2 obteve um espalhamento superior. Este resultado pode ser explicado pelo valor da massa volúmica fresca mais elevado que esta apresenta.

### 4.3.2 Caracterização no estado endurecido

#### 4.3.2.1 Resistência à rotura por compressão

A resistência à compressão média obtida do ensaio de três provetes de cada mistura encontra-se apresentada no quadro 28, para as formulações de betão aos 28 dias, assim como os respetivos coeficientes de variação.

Quadro 28 - Valores da resistência à compressão aos 28 dias

Formulações	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		$f_{cm,cubo}$ (MPa)	C. Variação (%)
Ref.	28	27,7	0,83
E2 (100%)		28,8	1,49
E4 (100%)		37,8	0,19
E2-4 (100%)		38,1	2,41
E2-4 (100%-25%)		33,2	2,08
E2-4 (100%-50%)		36,8	1,17

Os respetivos valores gráficos encontram-se representados na figura 50, através da qual se pode observar que a formulação E2-4 (100%) é a que apresenta a máxima resistência à compressão. Ainda assim, todas as formulações com substituição de escória apresentam resistências à compressão superiores à formulação de referência. É possível, também, reter que as formulações com maior adição percentual do agregado de escória 0/4 exibem melhor comportamento à compressão, o que pode ser justificado pela presença de menor quantidade de finos na granulometria desta escória.

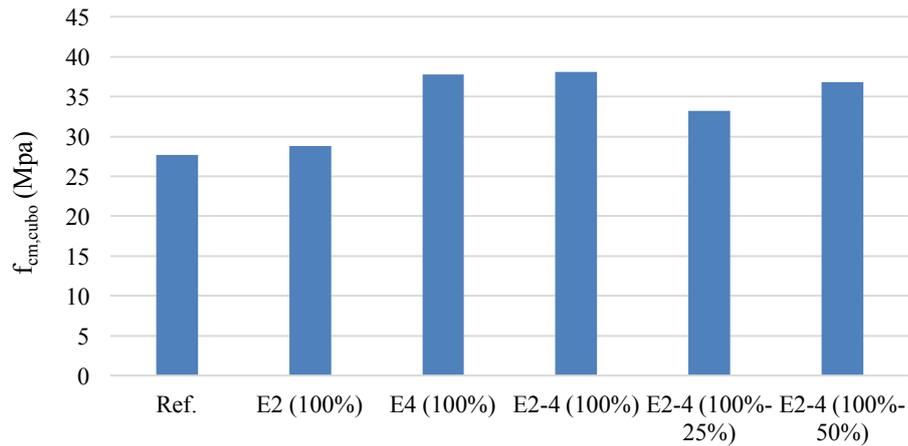


Figura 50 - Representação gráfica dos valores de resistência à compressão aos 28 dias

#### 4.3.2.1.1 Efeito da idade sobre a resistência à compressão do betão

Apesar da razão água/cimento ser considerada o fator de maior importância na determinação da resistência do betão, fatores como a idade podem também ter um efeito importante sobre a resistência, como será visto a seguir.

Os valores das resistências à compressão para todas as formulações, aos 3, 7, 28, 56 e 90 dias, estão apresentados no quadro 29, bem como os respetivos coeficientes de variação.

Quadro 29 - Valores da resistência à compressão para as várias formulações em 5 idades

Formulações	Idade (dias)	Resistência à compressão	
		Rc (MPa)	C. Variação (%)
Ref.	3	17,5	2,44
	7	23,6	2,52
	28	28,6	0,49
	56	29,5	8,77
	90	30,3	0,19
E2 (100%)	3	17,7	1,36
	7	23,0	1,06
	28	28,4	4,23
	56	29,7	2,23
	90	30,7	0,96
E4 (100%)	3	25,7	1,52
	7	33,5	2,05
	28	40,1	1,53
	56	42,8	1,74
	90	43,4	1,82
E2-4 (100%)	3	24,1	6,17
	7	31,7	1,43
	28	38,6	1,67
	56	43,8	2,32
	90	45,3	0,68
E2-4 (100%- 25%)	3	20,7	2,49
	7	25,9	1,45
	28	31,9	0,40
	56	36,0	1,25
	90	37,6	1,97
E2-4 (100%- 50%)	3	24,1	1,50
	7	30,7	1,81
	28	37,4	1,37
	56	40,2	2,60
	90	41,6	3,10

A tendência de comportamento da resistência à compressão do betão, sob a influência do efeito da idade, pode ser visualizada na figura 51.

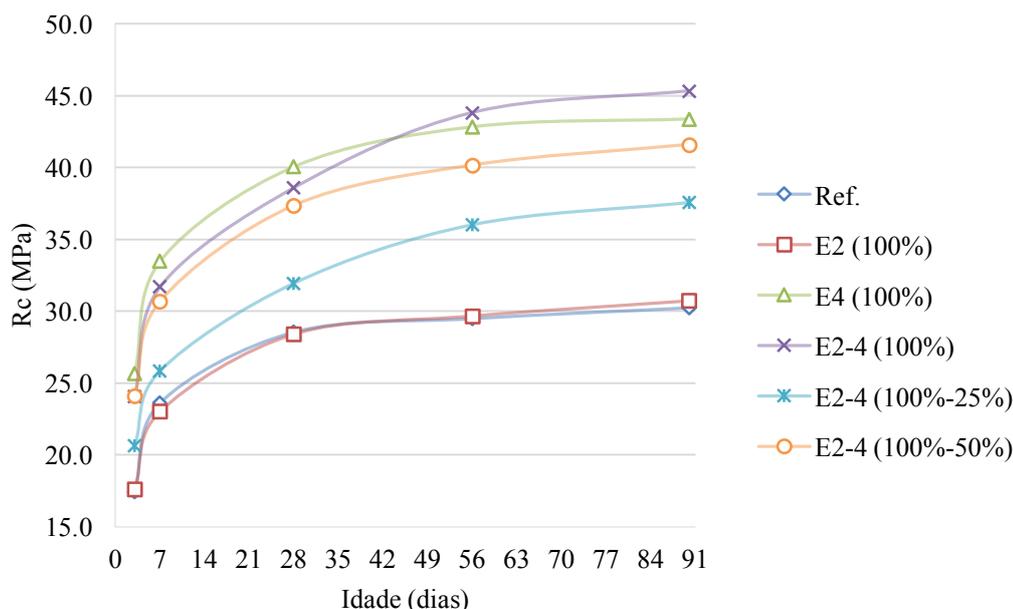


Figura 51 - Representação gráfica dos valores de resistência à compressão em 5 idades

Verifica-se que a resistência à compressão axial dos betões produzidos aumenta com a idade. Isto ocorre porque a hidratação das partículas de cimento anidro continua a ocorrer, diminuindo o volume de poros de grandes dimensões na pasta de cimento hidratada. Essa tendência já era esperada, pois é consenso na tecnologia do betão.

Constata-se também que há um crescimento maior da resistência até aos 56 dias e que, a partir desta idade, o ganho de resistência não é tão grande quando comparado com as idades menores. Sabir, B. e Wild, S. (2000), estudando o efeito da idade na resistência de betões, constataram que até aos 28 dias de idade a resistência aumenta consideravelmente e, após esse valor, e até aos 90 dias, a resistência cresce mais lentamente. Para Ramezaniapou, A. e Malhotra, V. (1995), comportamento semelhante foi encontrado, onde as resistências dos betões produzidos crescem substancialmente a pequenas idades e com o decorrer do tempo este aumento vai-se tornando menor.

Mais ainda, pode-se concluir que a inclusão de escória 0/4 faz surgir um aumento na resistência à compressão ao contrário do que acontece com a introdução da escória 0/2 na mistura. No entanto, todas as formulações apresentam valores de resistência à compressão superiores à formulação padrão em todas as idades, exceto a formulação com 100% de substituição com escória 0/2, que apresenta um desenvolvimento similar à formulação de referência.

#### 4.3.2.1.2 Efeito da razão A/C sobre a resistência à compressão do betão

A figura 52 apresenta a tendência do comportamento do efeito isolado da razão água/cimento sobre a resistência à compressão axial do betão. Os valores da escala à direita são referentes à razão A/C e neste caso, são os únicos que aludem à curva A/C, assinalada a laranja.

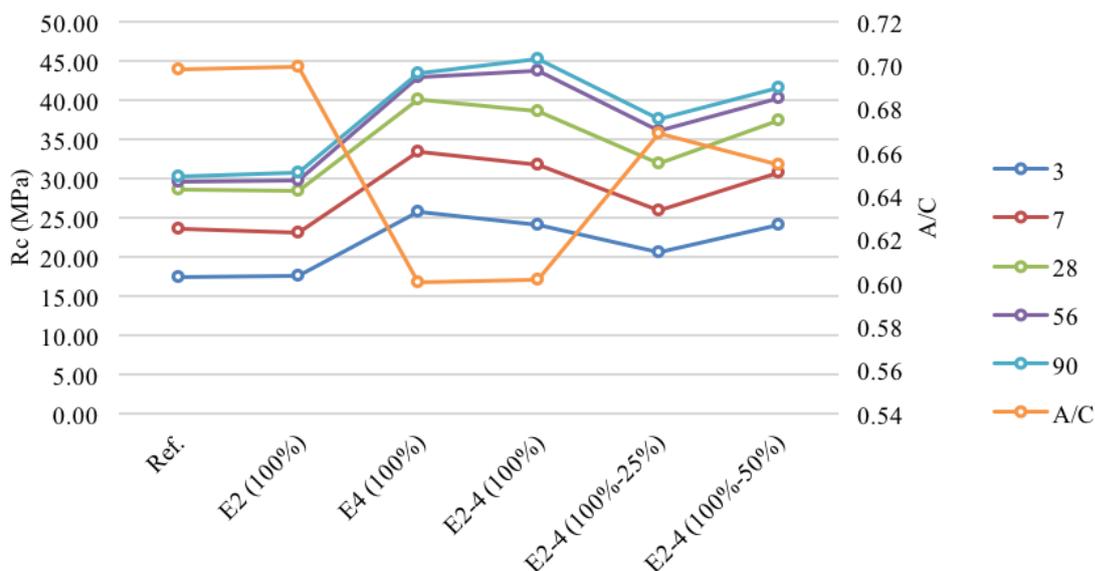


Figura 52 - A/C vs Resistência à compressão

Através do gráfico é possível analisar que o desenvolvimento da razão água/cimento é inversamente proporcional ao desenvolvimento da resistência à compressão de todas as formulações estudadas, para todas as idades, conforme o esperado. Tal vem confirmar a teoria de Abrams (1918) que refere que a resistência à compressão apresenta um comportamento inverso ao da razão água/cimento.

De acordo com Mehta, P. e Monteiro, P. (1994), a razão água/cimento é o fator mais importante a influenciar a resistência à compressão dos betões, por afetar a porosidade da pasta de cimento como a zona de transição entre a pasta e o agregado. Segundo os mesmos autores, a fonte principal da resistência é a atração das forças de Van Der Waals entre as partículas, que são inversamente proporcionais às distâncias. Assim, menores distâncias levam a forças mais intensas que culminam em resistências mecânicas maiores.

### 4.3.2.2 Absorção de água por imersão

Os resultados médios da absorção de água por imersão, resultantes dos ensaios de três provetes por formulação,  $A_{im}$ , estão indicados no quadro 30, assim como os respetivos coeficientes de variação.

Quadro 30 – Resultados médios da absorção de água por imersão das formulações de betão

Formulação	Idade (dias)	Absorção de água por imersão	
		$A_{im}$ (%)	C. Variação (%)
Ref.	28	19,11	1,46
E2 (100%)		19,10	0,89
E4 (100%)		16,64	1,94
E2-4 (100%)		17,32	2,42
E2-4 (100%-25%)		18,12	0,88
E2-4 (100%-50%)		17,27	1,09

A análise dos resultados obtidos nestes ensaios permite evidenciar que a dispersão de resultados foi reduzida (coeficiente de variação médio de 1,45% e máximo de 2,42% verificado na formulação E2-4 (100%)), o que indica ser suficiente o recurso a três provetes para caracterizar o comportamento dos betões relativamente a este parâmetro de durabilidade.

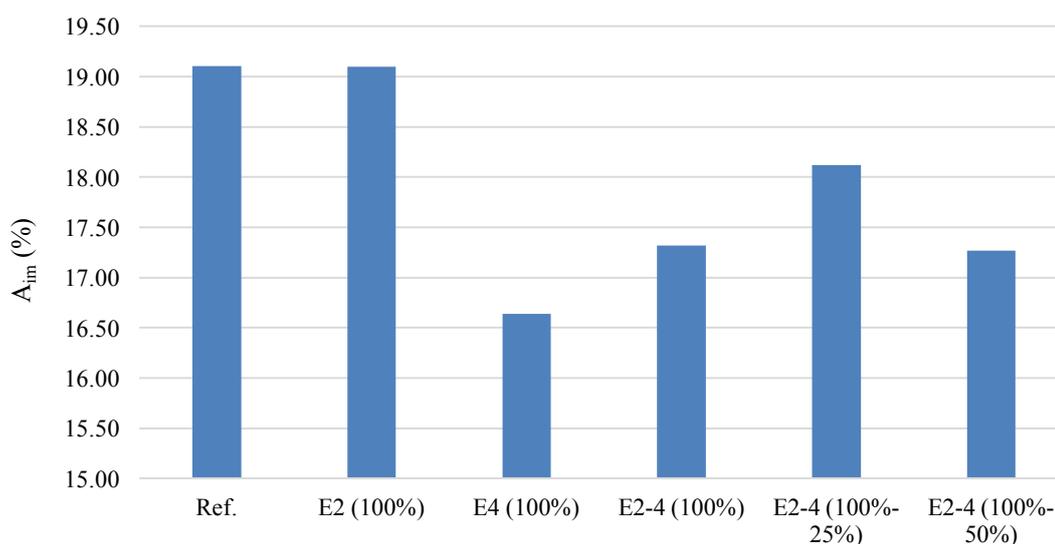


Figura 53 - Representação gráfica dos valores de absorção de água por imersão das formulações de betão

Observa-se, também e mais uma vez, que o ensaio revelou grande sensibilidade relativamente à substituição de areia 0/4 por escória, que provocou uma diminuição acentuada do valor da absorção de água média por absorção nas formulações. A formulação com 100% de substituição de areia 0/4 por escória 0/4 é a que apresenta melhor comportamento face à absorção de água por imersão.

As principais diferenças poderão e parecem estar relacionadas com a razão água/cimento. É sabido que a porosidade aumenta com o acréscimo deste fator e que está intimamente relacionada com o volume de material cimentício formado. Quanto mais elevada for a razão água/cimento maior será o volume de poros da matriz cimentícia. A granulometria da escória utilizada parece também ser um fator determinante na avaliação deste parâmetro.

#### 4.3.2.3 Absorção de água por capilaridade

Na figura 54 representam-se as curvas médias de absorção capilar obtidas através do ensaio de três provetes de cada formulação. Tal como no ensaio em argamassas, estas curvas refletem a existência de três fases, uma primeira parte da curva com maior inclinação, representando o preenchimento dos capilares de maior diâmetro; a segunda representa o preenchimento dos capilares mais finos e a terceira corresponde à estabilização da água absorvida devido ao preenchimento da rede capilar.

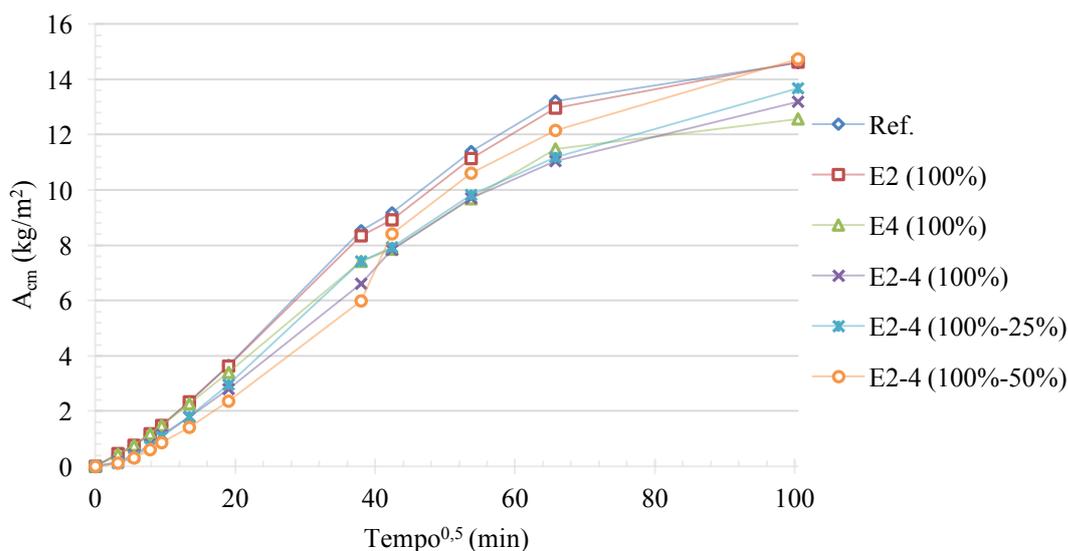


Figura 54 - Curvas médias de absorção capilar das formulações de betão

Conforme se pode constatar, todas as formulações apresentam um desenvolvimento semelhante, destacando-se as que integram escórias, com valores de absorção média inferiores aos da formulação de referência. Esse facto pode estar relacionado com o melhor preenchimento e distribuição dos vazios no betão com escórias e também com a massa volúmica mais elevada que favorecem uma maior densidade do betão.

O coeficiente de absorção por capilaridade foi calculado pelo mesmo método utilizado nas argamassas. Os valores gráficos apresentam-se na figura 55.

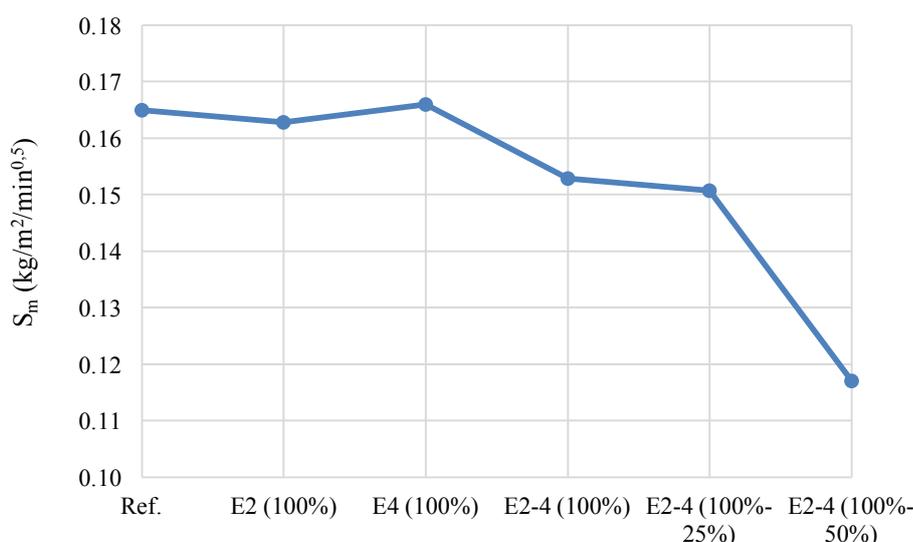


Figura 55 - Representação gráfica dos coeficientes de absorção capilar para as formulações de betão

Quanto à resistência capilar, observa-se que houve um melhor desempenho dos betões com escória. Esse comportamento está também relacionado com a porosidade do betão, que por sua vez é influenciada pelo teor de escória. Isso significa que betões com substituição parcial de areia natural por escória oferecem maior resistência à passagem de líquidos. Por outro lado, a resistência capilar diminui quando aumenta a razão água/cimento.

É possível reter que a formulação com 100% de substituição da areia 0/2 e 50% de substituição da areia 0/4 é aquela que apresenta menor coeficiente de absorção, destacando-se assim para o efeito. O uso combinado de escória 0/2 e escória 0/4 contribui para a diminuição do valor representativo da absorção de água, demonstrando melhor desempenho do que quando se utilizam estas escórias separadamente.

### 4.3.2.4 Coeficiente de difusão de cloretos

No quadro 31, estão representados, para as diferentes composições testadas, os valores médios do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário,  $D_{NSSM}$ , calculados.

Quadro 31 - Resultados médios do coeficiente de difusão de cloretos das formulações de betão

Formulações	Idade (dias)	Coeficiente de difusão de cloretos
		$D_{NSSM} (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$
Ref.	28	41,45
E2 (100%)		41,82
E4 (100%)		29,95
E2-4 (100%)		32,47
E2-4 (100%-25%)		36,03
E2-4 (100%-50%)		32,58

Na figura 56 apresentam-se, sob a forma gráfica, os resultados obtidos, de forma a pôr em evidência os efeitos da adição de Ecc nas composições.

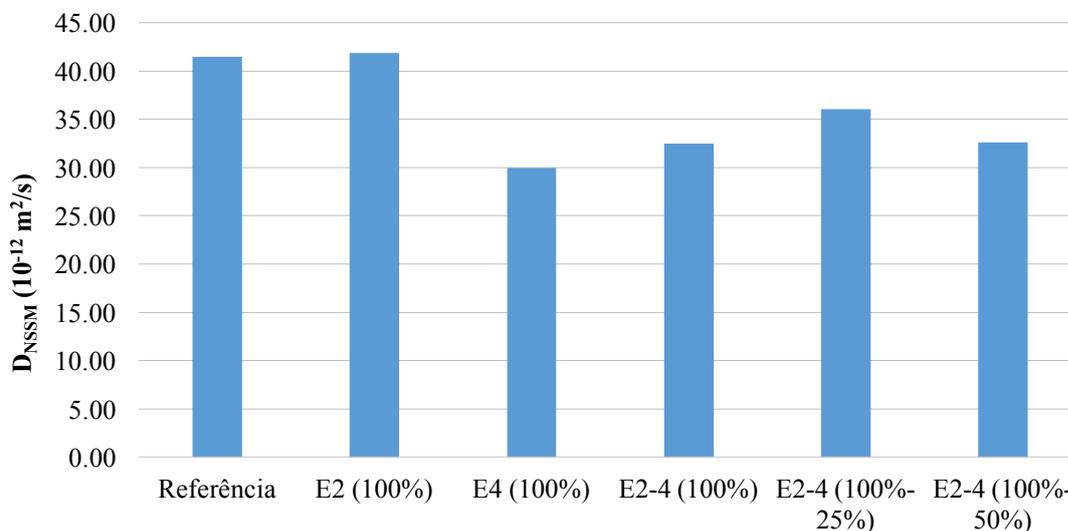


Figura 56 - Representação gráfica dos valores do coeficiente de difusão de cloretos das formulações de betão

Para as formulações testadas, os resultados obtidos demonstram que a inclusão de Ecc por substituição à areia natural não faz surgir grandes variações na resistência dos betões à migração

de iões de cloro. Ainda assim, as maiores variações verificam-se nas formulações com maior percentagem de substituição de areia 0/4.

Tal como nos casos da absorção de água por imersão ou capilaridade, a migração dos iões de cloro através dos betões está condicionada pela porosidade das respetivas matrizes. Neste contexto, é de esperar que o  $D_{NSSM}$  diminua com o decréscimo da relação A/C.

#### 4.3.2.4.1 Efeito da razão água/cimento sobre a migração de cloretos no betão

A razão água/cimento desempenha um papel fundamental nas características do betão pois influencia, entre outras propriedades, o tamanho e a interconectividade dos poros do betão, facilitando ou impedindo o deslocamento dos iões de cloro no mesmo. Na figura 57 pode ser observado o efeito isolado da variável razão água/cimento sobre o coeficiente de difusão de cloretos, para as várias composições estudadas. A escala à direita apenas reverte para os valores da razão água/cimento (curva a laranja), enquanto a esquerda pertence aos valores do coeficiente de difusão de cloretos, representados pela curva assinalada a azul. Os valores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 que se encontram no eixo horizontal correspondem às formulações Ref., E2 (100%), E4 (100%), E2-4 (100%), E2-4 (100%-25%) e E2-4 (100%-50%) respetivamente.

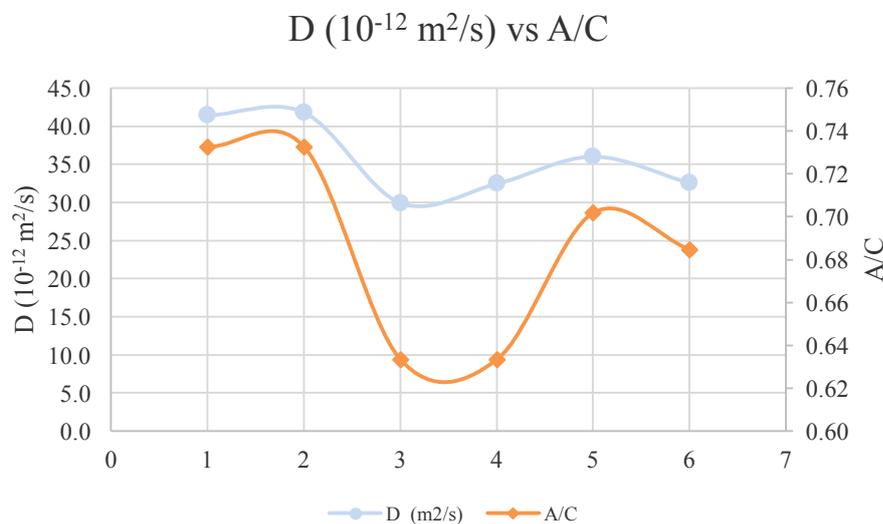


Figura 57 - A/C vs Coeficiente de difusão de cloretos

Observa-se que à medida que a razão água/cimento aumenta o coeficiente de difusão de cloretos também aumenta, e vice-versa. Tal pode ser explicado pelo facto de quando a relação água/cimento é alta a composição terá alta porosidade capilar, contendo um número

relativamente elevado de poros grandes e bem conectados, o que ocasionará um aumento no coeficiente de difusão de cloretos.

#### 4.3.2.4.2 Efeito da massa volúmica fresca sobre a migração de cloretos no betão

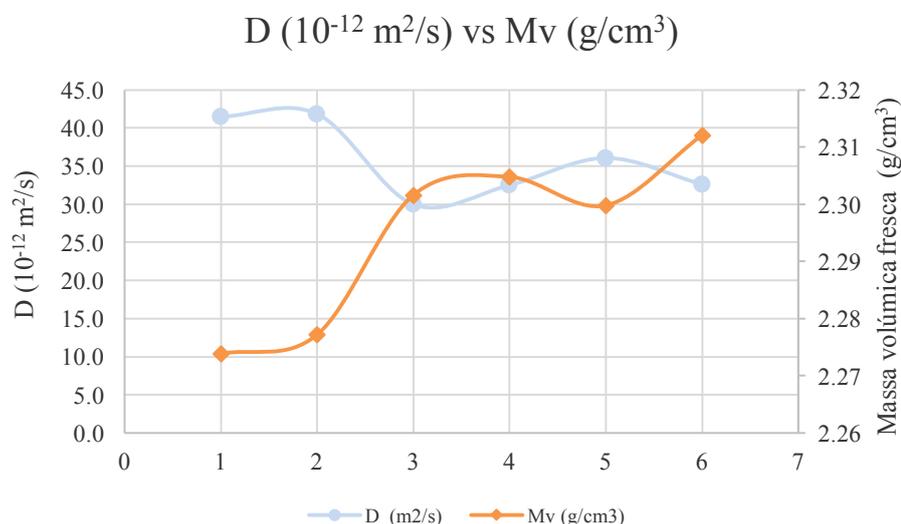


Figura 58 - Massa volúmica fresca vs Coeficiente de difusão de cloretos

Mais uma vez se alerta para o facto de que os valores presentes na margem direita do gráfico correspondem à massa volúmica fresca e estão relacionados com a curva assinalada a laranja. Os valores à esquerda refletem o coeficiente de difusão de cloretos e estão representados pela curva assinalada a azul, para cada formulação. Estas estão representadas pelos valores do eixo horizontal 1, 2, 3, 4, 5 e 6 que correspondem às formulações Ref., E2 (100%), E4 (100%), E2-4 (100%), E2-4 (100%-25%) e E2-4 (100%-50%) respetivamente.

Da análise da figura 58, é possível constatar que existe uma relação inversa no respeitante a estes dois fatores. O aumento da massa volúmica fresca faz diminuir a penetração de cloretos, o que seria de esperar. Sendo a massa volúmica fresca calculada pela razão entre a massa da amostra e o volume do recipiente que a contém, pode-se concluir que quanto maior esta for, menor será o volume de vazios, impedindo a entrada de iões de cloro no betão.

#### 4.3.2.4.3 Efeito da absorção de água sobre a migração de cloretos no betão

A influência que as condições de exposição têm nos coeficientes de difusão é motivada pela interação entre o ambiente e o betão, fundamentalmente no que se refere ao teor de humidade. Verifica-se que é nas condições de exposição que apresentam uma humidade mais elevada que

o betão tem maior coeficiente de difusão. Dado que os cloretos apenas penetram nos poros que contêm água, quanto maior for o teor de humidade, maior é a quantidade de poros onde ocorre o mecanismo da difusão, o que faz aumentar o fluxo de cloretos e, conseqüentemente, o coeficiente de difusão.

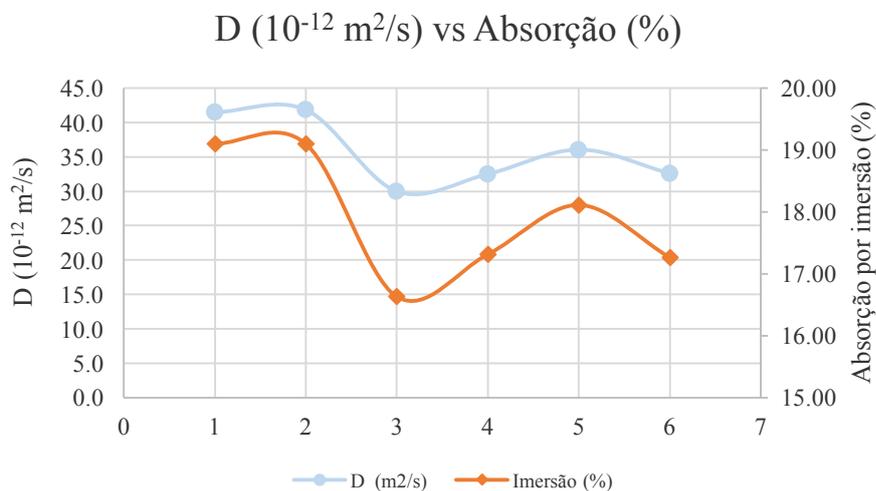


Figura 59 - Absorção por imersão vs Coeficiente de difusão de cloretos

No que toca à absorção de água por imersão, comprova-se que existe uma relação proporcional entre esta e a difusão de cloretos, ou seja, em percentagens de absorção inferiores correspondem a coeficientes de difusão de cloretos inferiores, e vice-versa. Neste sentido, destaca-se a formulação E4 (100%), que apresenta menores valores para estes dois fatores, representando maior durabilidade do betão.

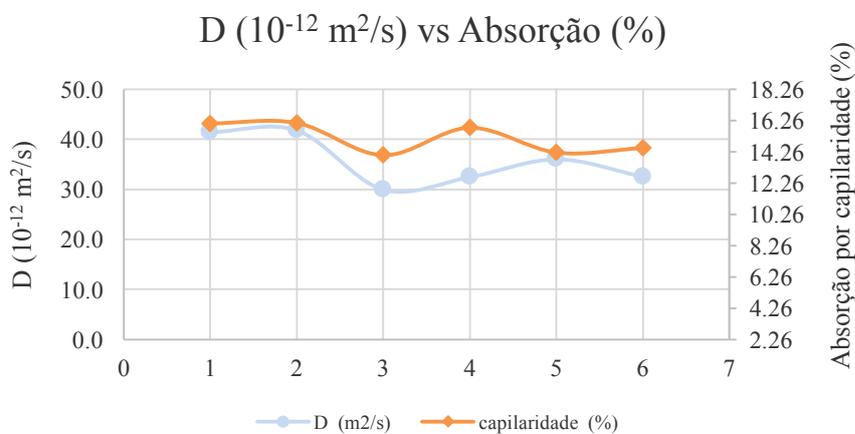


Figura 60 - Absorção por capilaridade vs Coeficiente de difusão de cloretos

Da observação da figura 60, apura-se que o desenvolvimento entre estas duas curvas é semelhante, podendo assim confirmar a teoria inicialmente prevista, destacando-se também a formulação E4 (100%).

### 4.3.2.5 Resistência à carbonatação

Os resultados obtidos da profundidade média de carbonatação para cada uma das formulações, em função do tempo, representam-se no quadro 32 e na figura 61.

Quadro 32 – Valores da profundidade média de carbonatação para as formulações de betão

Idade (anos)	Profundidade de penetração <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )					
	Ref.	E2 (100%)	E4 (100%)	E2-4 (100%-25%)	E2-4 (100%-50%)	E2-4 (100%)
0,019	0,000014	0,000014	0,000008	0,000016	0,000018	0,000011
0,038	0,000043	0,000044	0,000020	0,000049	0,000045	0,000042
0,058	0,000094	0,000089	0,000048	0,000085	0,000071	0,000071
0,077	0,000135	0,000133	0,000075	0,000118	0,000112	0,000095
0,096	0,000186	0,000199	0,000101	0,000149	0,000161	0,000119
0,115	0,000229	0,000227	0,000123	0,000166	0,000168	0,000149
0,153	0,000330	0,000320	0,000145	0,000229	0,000210	0,000180
0,247	0,000533	0,000499	0,000259	0,000404	0,000348	0,000311

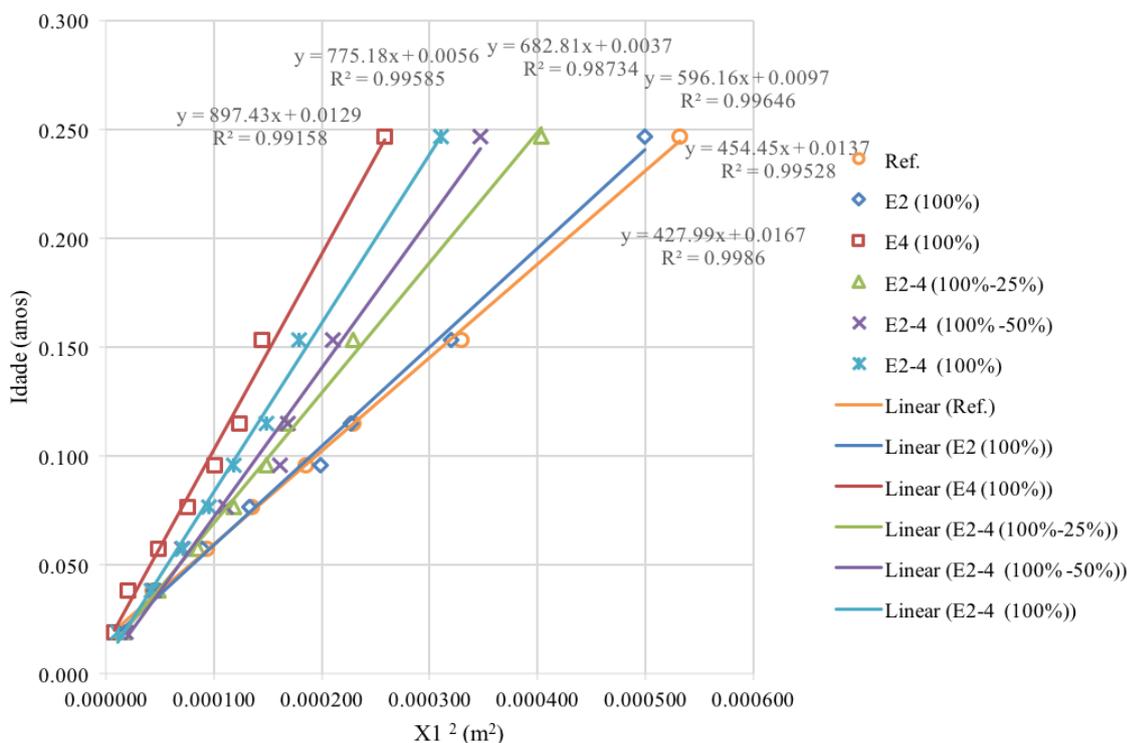


Figura 61 - Representação gráfica dos valores da profundidade média de carbonatação para as formulações de betão

Através da análise da figura 61 verifica-se que existe um decréscimo na profundidade de carbonatação à medida que se faz variar a quantidade escória em cada formulação, apresentando todas elas resistência à carbonatação superior, em todas as idades estudadas, à da formulação de referência, com exceção da formulação E2 (100%) que se apresenta muito semelhante a esta. A formulação E4 (100%) é a que apresenta a maior redução na profundidade de penetração de CO<sub>2</sub>.

O coeficiente Rc<sub>65</sub> foi determinado segundo a E465 da Especificação LNEC, utilizando a seguinte equação:

$$Rc_{65} = \frac{2 \times c_{accel} \times t_1}{x_1^2} \quad (1)$$

Sendo c<sub>accel</sub> o coeficiente de aceleração e toma o valor de 90×10<sup>-3</sup> kg/m<sup>3</sup>. Por substituição do tempo e da profundidade de carbonatação obtida calcula-se o valor da resistência à carbonatação para cada uma das composições, estando os valores obtidos representados no quadro 33 e na figura 62.

Quadro 33 - Valores da resistência à carbonatação para as formulações de betão

Formulações	Rc <sub>65</sub> (kg.ano/m <sup>5</sup> )	Correlação
Ref.	64,9	0,999
E2 (100%)	68,9	0,995
E4 (100%)	136,1	0,992
E2-4 (100%)	117,6	0,996
E2-4 (100%-25%)	90,4	0,987
E2-4 (100%-50%)	103,6	0,987

Conforme se pode verificar pelos resultados obtidos, todas as formulações apresentam resistência à carbonatação superior à formulação de referência. O valor mais alto obtido pertence à formulação E4 (100%), verificando-se que a adição de escória 0/4 conduz a valores de resistência à carbonatação mais elevados. A escória 0/2 apresenta melhor desempenho que a areia natural 0/2, embora menor em relação à escória 0/4.

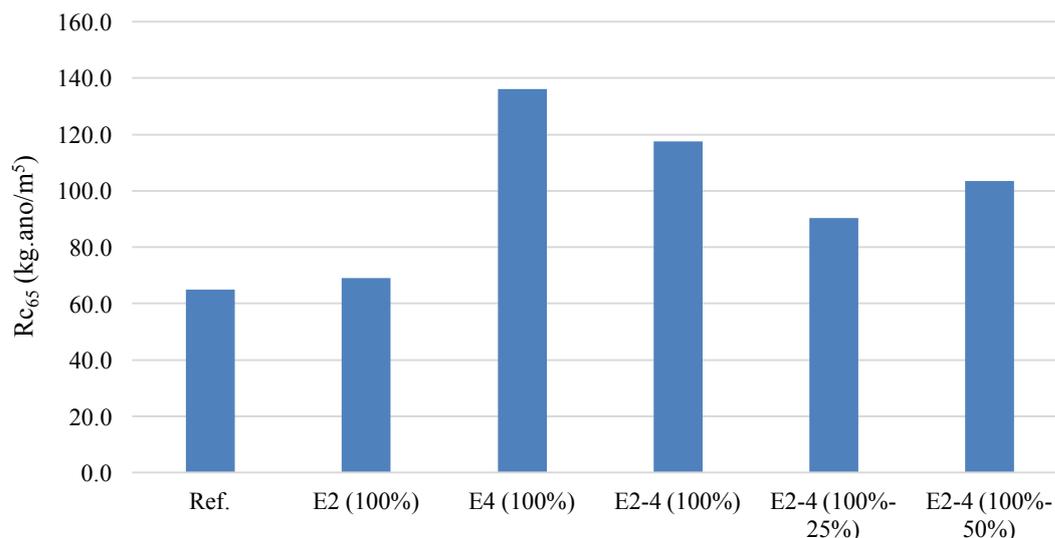


Figura 62 - Representação gráfica dos valores da resistência à carbonatação para as formulações de betão

A influência da escória na carbonatação está associada à porosidade do betão (menor porosidade, diminuição do tamanho e melhor distribuição dos poros), que dificultou a difusão do CO<sub>2</sub>. Os resultados dos ensaios de absorção, referidos anteriormente, reforçam esse argumento.

#### 4.3.2.6 Ensaio de retração

A retração por secagem caracteriza-se resumidamente pela subtração entre a retração global e a retração autógena. Os valores obtidos apresentam-se na figura 63.

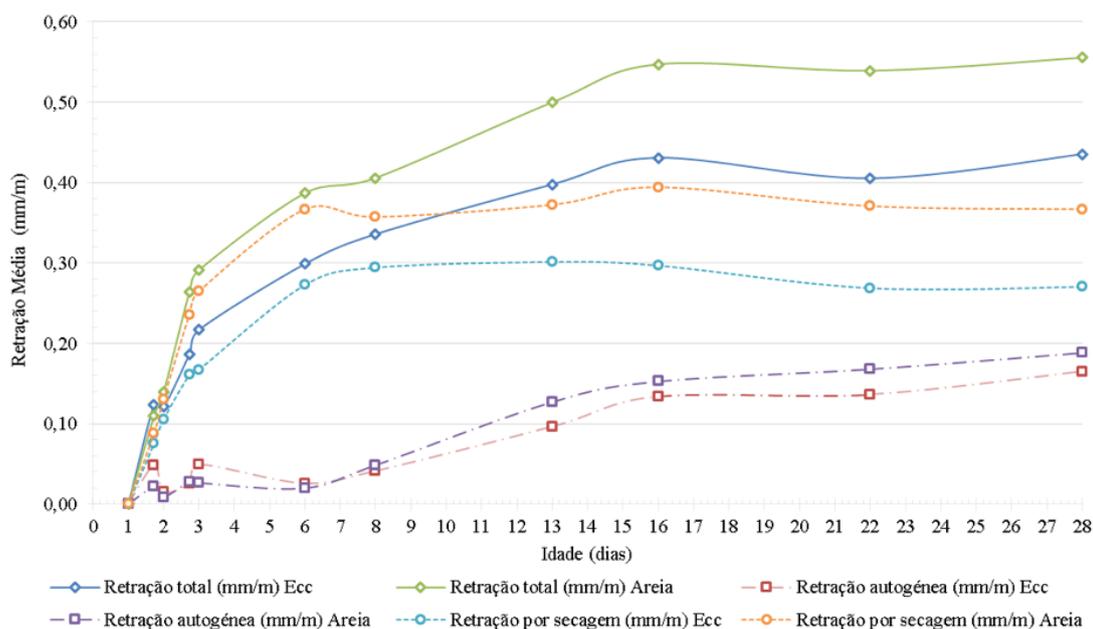


Figura 63 - Retração total, autogénea e por secagem ao longo do tempo

Da observação de todas as curvas é possível reter que a amassadura com menor retração global e retração por secagem é a que contém a escória Ecc. No que refere à retração autogénea também a escória Ecc apresenta valores menores a partir dos 7 dias, não se registando, no entanto, grandes diferenças entre estas argamassas.

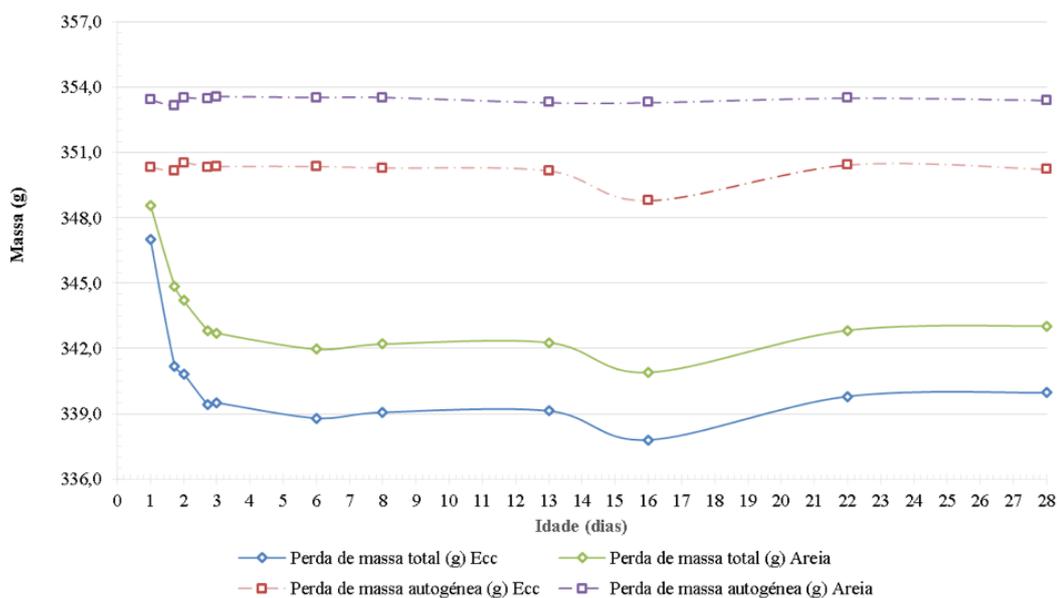


Figura 64 - Perda de massa média total e autogénea ao longo do tempo

Simultaneamente ao ensaio de retração foi realizado o ensaio de perda de massa para cada provete de argamassa (Figura 64), não se tendo observado também grandes diferenças entre as duas argamassas.

#### 4.3.2.7 Ensaio potencial de reação álcalis-agregado

No quadro 34 apresentam-se os resultados das extensões para as 3 composições de argamassa estudadas.

Quadro 34 - Valores médios da expansão por reação álcalis-agregado

Tempo (dias)	Extensão (%)		
	A 0/2	Ecc 0/2	Ecc 0/2 (47%)
1	0,0276	0,0362	0,0947
2	0,0283	0,1009	0,1599
5	0,0411	0,3024	n.d.
6	0,0506	0,3446	n.d.
8	0,0569	n.d.	n.d.
12	0,0679	0,6415	n.d.
14	0,0692	0,6991	n.d.

n.d. – não determinado

Aos 5 dias de idade, como já referido anteriormente, foi possível observar a formação de um gel na solução de NaOH e fissuras facilmente perceptíveis à superfície dos provetes de Ecc com 47% de escória (Figura 65).



Figura 65 - Formação de gel na solução de NaOH (à direita) e fissuras nos provetes de argamassa com Ecc (à esquerda)

De acordo com a metodologia indicada na especificação E461 do LNEC, conclui-se que o material agregado Ecc 0/2 pode ser classificado como “agregado potencialmente reativo – Classe III” e o material agregado A0/2 como “material não reativo – Classe I.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Este trabalho pretende ser mais um contributo para a investigação do aproveitamento de resíduos industriais na confeção de betões. Apresentou-se um agregado alternativo ao agregado natural, sendo esse um subproduto da indústria da fundição de metais ferrosos, a Ecc, de forma a tornar a produção de betão mais sustentável e económica.

A escória estudada possui características adequadas ao seu emprego como agregado em betões. Através dos ensaios realizados de caracterização geométrica, física e mecânica da escória de ferro, Ecc, pode concluir-se que este é um material bem graduado, com dureza e resistência satisfatórias, com valores de absorção de água e massa volúmica semelhantes ao do agregado de substituição utilizado no betão em estudo, características estas muito valorizadas em produtos de construção.

Em relação ao processo de britagem das escórias conclui-se que é possível britar com sucesso para a granulometria pretendida. As escórias Ece e Ecc, embora nesta última em menor quantidade, contém nos seus aglomerados material ferroso e não ferroso em quantidades que podem dificultar o processo de britagem.

No que diz respeito aos ensaios de caracterização do betão endurecido, os resultados vêm demonstrar que a incorporação de escória Ecc no betão é vantajosa, sendo esse efeito especialmente notório na resistência à compressão. Verificou-se que o betão com Ecc possui resistências mecânicas à compressão muito satisfatórias, sendo estas iguais ou superiores quando comparadas com o betão de referência. Os maiores ganhos na resistência mecânica à compressão aos 28 dias verificaram-se nas formulações com maior incorporação da areia de escória 0/4, correspondendo em termos percentuais a um acréscimo de 45%, 35% e 31% nas formulações 3, 4 e 6. Observou-se também que a resistência à compressão de todas as misturas de betão aumenta com a idade.

Relativamente à trabalhabilidade do betão, esta é melhorada com a incorporação da escória, em especial a que tem um maior peso (0/4), facto demonstrado na redução da quantidade de água para a mesma trabalhabilidade.

Os resultados nos ensaios de variação volumétrica demonstram que, em condições normais de temperatura e humidade (20°C, 65% de Hr), a incorporação da Ecc resulta numa retração inferior ao de referência.

Em relação à absorção de água, tanto por capilaridade como por imersão, as formulações com mais quantidade percentual de escória Ecc 0/4 são as que apresentam menor absorção, culminando em betões de maior durabilidade, trazendo vantagens significativas em aplicações específicas.

Dos ensaios realizados à resistência da migração de cloretos, os resultados revelam que é nas formulações com a incorporação da areia de escória 0/4 onde se verificam reduções do coeficiente de difusão de cloretos, cerca de 28%, estando este relacionado com a absorção de água.

Relativamente aos ensaios realizados para a medição da resistência à carbonatação, apurou-se que a substituição de areia por escória Ecc fez diminuir a profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> nos provetes, tendo-se este efeito manifestado com maior incidência nas formulações com maior percentagem de escória 0/4.

Todos os ensaios referidos até ao momento apontam para que o uso desta escória no fabrico de betões seja vantajoso. No entanto, de forma a comprovar a utilização das escórias em betões, foi avaliada a reatividade das mesmas. Tal foi portanto feito, e os resultados foram concludentes: do ensaio de reação álcalis-agregado com substituição total do agregado britado resultou a sua classificação como classe 3, agregado potencialmente reativo.

Em termos finais, face ao estudo desenvolvido, ficou demonstrado que estes agregados de escória Ecc não podem ser utilizados, pois o seu uso pode trazer consequências catastróficas inviabilizando a sua incorporação como uma alternativa aos agregados naturais na produção de betões e argamassas.

## 5.2 Trabalhos futuros

- Estudos mais detalhados a longo prazo no que concerne às reações álcalis-agregado;
- Ensaio em Microscópio Eletrónico de Varredura com sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS – Energy dispersive spectrometer) para identificar a presença do gel encontrado no interior da argamassa utilizada no ensaio de reação álcalis-agregado;
- Realização de ensaios comparativos a diferentes temperaturas para se avaliar o efeito da temperatura na capacidade de libertação de álcalis pelos agregados;
- Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da escória Ecc;
- Realização de novas argamassas com eliminação dos finos por lavagem do material e realização de novos ensaios de resistência à compressão;
- Realização de novas argamassas com tratamento ácido e alcalino e realização de novos ensaios de resistência à compressão;
- Solucionar métodos para se poder extrair as percentagens de ferro que se encontram presentes na escória;
- Com relação à parte ambiental sugere-se que se façam ensaios de lixiviação e solubilização para betões com escória a fim de se verificar qual a classificação do betão realizado;
- Prolongar o período de carbonatação dos betões, até o ponto de conseguir uma amostra completamente carbonatada, a fim de determinar um coeficiente de difusão de cloretos para betões completamente carbonatados, através do ensaio de migração;
- Modelos matemáticos que expliquem a forma como as propriedades do betão são afetadas pelas variáveis independentes e as suas interações.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Adegas, Roseane Gonçalves, 2007**, *Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que utilizam Areias no Estado do Rio Grande do Sul*, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Escola de Engenharia, UFRGS;

**Almeida, A. J., 2009**, *Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto*, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte;

**Armange, L. C. et al, 2005**, *Utilização de Areia de Fundição Residual para uso em Argamassa*, Revista Matéria;

**Assis, P.S. et al, 2000**, *Fundamentos para Fabricação de Escória Sintética Utilizada no Tratamento de Aço no Forno Panela*, In: XXXI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação de Metais da ABM, Vitória, Maio;

**ASTM C1260-01**, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, 1–5;

**ASTM C305, 2002**, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, 1-3. January;

**Basar, H. Merve and Aksoy, Nurandevci, 2012**, *The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete*, Construction and Building Materials, vol. 35, p. 508–515;

**Bilodeau, A. and Malhotra, V. A., 2000**, *High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development*, In: ACI MATERIALS JOURNAL, USA;

**Biolo, Simone Maríndia, 2005**, *Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos*, 162 p, Experimental (Mestrado Académico em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;

**Bonin, André Luís, 1995**, *Reutilização da Areia Preta de Fundição na construção civil*, Congresso de Fundição. São Paulo, p-203-221. Setembro;

**Calleja, José, 1982**, *Escorias y cementos siderúrgicos*, In: Materials de Construcción, Madrid;

**Callister Jr., W. D., 2000**, *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 5th ed., John Wiley; New York

**Carnin, Raquel Luísa Pereira, 2008**, *Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundação como Agregado em Mistura Asfáltica*, Tese de Mestrado. Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná;

**Carnin, Raquel Luísa Pereira; Silva, Cláudio Oliveira; Pozzi, Ricardo José; Junior, Dirceu Cardoso; Folgueras, Marilena Valadares e Malkowski, Wendel, 2010**, *Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravados*, 12 p. Experimental (Artigo Técnico);

**Casotti, Bruna Pretti; Bel Filho, Egmar Del e Castro, Paulo Castor. P. C., 2011**, *Indústria de Fundação: Situação Atual e Perspectivas, Metalúrgica*, BNDS Setorial, nº 33, p-121-162. Rio de Janeiro;

**Castro, F. e Teixeira, T., 2014**, *Incorporation of industrial wastes from thermal processes in cement mortars*, Universidade do Minho;

**Choudhury, A., 1990**, *Vacuum Metallurgy: Remelting Processes*, Capítulo 4, USA: ASM International, First Edition, pp. 75-161;

**Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro**. Regime geral de gestão de resíduos. Lisboa;

**E391-1993**, *Betões – Determinação da resistência à carbonatação*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio;

**E393-1993**, *Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio;

**E394-1993**, *Betões – determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio;

**E463-2004**, *Betões – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Novembro;

**Ferreira, A. A., 1999**, *Concreto de Alto Desempenho com Adição de Cinza de Casca de Arroz: Avaliação de Propriedades Relacionadas com a Durabilidade*, Porto Alegre;

**Foguesatto, André Frederico, 2007**, *Estudo da utilização de areia residual do processo de fundição como agregado graúdo para concreto*, Graduação em Engenharia Civil - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí;

**Formosinho, S.; Pio, C.; Barros, H. e Cavalheiro, J., 2000**, *Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos*, Principia;

**Gandhewar, Vivek R.; Bansod, Satish V. and Borade, Atul B., 2011**, *Induction Furnace – A Review*, International Journal of Engineering and Technology, India;

**García, C.; San José, J. T. and Urreta, J. I., 1999**, *Reuse valorization in civil works of electric arc furnace (EAF) slag produced in C.A.P.V*, In: Global Symposium and Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Espanha;

**Guney, Yucel; Sari, Yasindursun; Yalcin, Muhsin; Tuncan, Ahmet and Donmez, Senayi, 2010**, *Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete*, Waste Management, Vol. 30, n. 8–9, p. 1705–1713;

**Helene, P. R. L., 1993**, *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo;

**Hörle, Luciana Farias, 2005**, *Utilização de resíduos de Fundição como matérias-primas para obtenção de produtos com cerâmica vermelha*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS;

**Isaia, G.C., 1995**, *Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de elevado desempenho: um estudo com vistas à corrosão da armadura*, Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo;

**Jänicke, M.; Mönch, H.; Ranneberg, T. and Simonis, U. E., 1989**, *Economic structure and environmental impacts: East-West comparisons*, The Environmentalist – Science and Technology Letters, 9 (3), p. 171-183;

**John, V. M., 2000**, *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*, 102 p, São Paulo;

**Khatib, J. M.; Herki, B. A.; Kenai, S., 2013**, *Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand*, Construction and building materials;

**Krüger, P., 1995**, *Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia*, In: Ciência & Tecnologia. Metalurgia & Materiais;

**Lima, Geannina dos Santos; Amaral, Mariana Bamberg; Ghisleni, Geisiele; Pufal, Lucas; Pozzobon, Cristina Eliza e Donato, Luiz, 2013**, *Estudo da utilização de areia de fundição em blocos de pavimentos intertravados*, In: Salão do Conhecimento, 21, Ijuí, Anais;

**Machado, A., 2000**, *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias*, Dept. Eng<sup>a</sup> Construção Civil da Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado em Engenharia, São Paulo;

**Mariotto, C. L., 2000**, *Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática*, In: Fundação & Matérias-primas;

**Martins, A. A. R. et al, 2002**, *Desenvolvimento de Processo para Fabricação de Aços de Elevada Limpeza Interna na Companhia Siderúrgica Nacional, Metalurgia e Materiais: Materiais, Fusão, Refino e Solidificação de Metais*, v. 58, n. 2, ABM N. 520;

**Mehta, P. K. and Aitcin, P. C., 1990**, *Micro-structural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete*, In: Seoul International Symposium, American Concrete Institute;

**Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., 1994**, *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, PINI, 573p, São Paulo;

**Mello, Osmar João de, 2004**, *Estudo da viabilidade da reutilização de resíduos de areia verde de fundição em argamassa colante- enfoque ambiental*, 160 p, Experimental (Mestrado no curso de Engenharia Ambiental) - Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade Regional de Blumenau, Blumenau;

**Morino, K. and Iwatsuki, E., 1999**, *Utilization of electric arc furnace oxidizing slag as concrete aggregate*, In: Global Symposium on Recyclin Waste Treatment and Clean Technology, Spain;

**Moura, W. A., 2000**, *Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto*, Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul;

**Nilles, P. E., 1999**, *Steelmaking of the Future*, Steel Times Magazine, Liège, Belgium, Maio;

**NP – 1381, 1976**, *Inertes para argamassas e betões: Ensaio de reactividade potencial com os álcalis do ligante. Processo da barra de argamassa*, IGPAI – Repartição da Normalização, Lisboa;

**NP EN 1015-18, 2002**, *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Dezembro;

**NP EN 1015-3, 1999**, *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Fevereiro;

**NP EN 1097-2, 2002**, *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Novembro;

**NP EN 1097-3, 2002**, *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Novembro;

**NP EN 1097-6, 2000**, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Setembro;

**NP EN 12350-2, 2009**, *Ensaaios do betão fresco – Parte 2: Ensaio de abaixamento*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Julho;

**NP EN 12350-6, 2009**, *Ensaaios do betão fresco – Parte 6: Massa volúmica*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Outubro;

**NP EN 12350-7, 2009**, *Ensaaios do betão fresco – Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Outubro;

**NP EN 12390-3, 2003**, *Ensaaios do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Dezembro;

**NP EN 196-1, 2006**, *Métodos de ensaio de cimentos – parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Outubro;

**NP EN 933-1, 2012**, *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Janeiro;

**Nunes, P.; Ribeiro, M. J.; Ferreira, J. M. F.; Bóia, C. S. and Labrincha, J. A., 2012**, *Mullitebased materials obtained from industrial wastes and natural sub-products*, Proc. TMS Fall Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects, Vol. 2, ed. B. Bjorkman, C. Samuelsson, J. Wikstrom, Lulea, Sweden, p. 359-368;

**Oh, B. H.; Cha, S. W.; Jang, B. S. and Jang, S. Y., 2002**, *Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration*, In: Nuclear Engineering and Design, Elsevier Science B. V.;

**Pagnussat, Daniel Tregnago, 2004**, *Utilização de Escória Granular de Fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação*, 148 p, Experimental (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;

**Park, Chong Lyuck; Kim, Byoung Gon and Yu, Youngchul, 2012**, *The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse*, Journal of Hazardous Materials;

**Pelino, M., 1997**, *Valorization and Recycling of Industrial Wastes*, BRE2-CT94-1018 Project Report;

**Pereira, D. A.; Aguiar, J. B.; Castro, F. P.; Almeida, M. F. e Labrincha, J. A., 2000**, *Mechanical behavior of portland cement mortars with incorporation of Al-rich salt slags*, Cement and Concrete Research;

**Pereira, F. Raupp; Ribeiro, M. J.; D. Pérez-Coll; Segadães, A. M. e Labrincha, J. A., 2005**, *Reciclaje de residuos sólidos industriales para la producción de materiales cementíceos y refractarios*, Resíduos, 86, p. 56-62;

**Portaria 209/2004 de 3 de Março**, *Lista Europeia de Resíduos*, Lisboa;

**Prabhu, G. G.; Hyun, J. H. and Kim, Y. Y., 2014**, *Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production*, Construction and Building Materials, 70, p. 514–521;

**Rai, A.; Prabakar, J.; Raju, C. B. and Morchalle, R. K., 2002**, *Metallurgical slag as a componente in blended cement*, In: Construction and Building Materials, Elsevier Science B. V.;

**Ramezaniapou, A. A. and Malhotra, V. M., 1995**, *Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*, Cement and Concrete Composites, Vol. 17, No. 2;

**Ramos, T. De Jesus; Alberto, M. V. e Juvandes, L. F. P., 2012**, *Utilização de ASIC em Betão*, Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL – BE2012, FEUP;

**Sabir, B.B. and Wild, S., 2000**, *Temperature effects on the strength development in concrete containing fly ash – metakaolin blended cements*, In: Sustainable Construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials, João Pessoa, P.744-757, P.165-175;

**Santos, P. Souza, 1992**, *Ciência e Tecnologia de Argilas*, São Paulo;

**Secil, 2003**, *Ficha técnica CIMENTO PORTLAND DE CALCÁRIO – CEM II/A-L 42,5R*, 0121, 197–198;

**Shoya, M. et al, 1999**, *Properties of Self-compacting Concrete with Slag Fine Aggregates*, Exploiting Wastes in Concrete, p. 121-130;

**Siddique, R.; Aggarwal, Y.; Aggarwal, P.; Kadri, E. and Bennacer, R., 2011**, *Strength, durability and micro-structural properties of concrete made with used foundry sand (UFS)*, Construction and Building Materials, 25 (4), 1916 – 1925;

**Siddique, Rafat and Singh, Gurpreet, 2011**, *Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing*, Resources, Conservation and Recycling, Vol.55, p. 885-892;

**Siddique, Rafat; De Schutterb, Geert and Noumowec, Albert, 2009**, *Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 23, n. 2, p. 976–980;

**Singh, Gurpreet and Siddique, Rafat, 2012**, *Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete*, Construction and Building Materials;

**Teixeira, E. N., 2000**, *Resíduos Sólidos: minimização e reaproveitamento energético*, São Paulo;

**Torgal, F. P. e Jalali, S., 2011**, *Betão Eco-eficiente: o futuro da indústria do betão pronto*, Betão, APEB, N°26, Abril, pp.24;

**Viklund-White, C. and Ye, G., 1999**, *Utilization and treatment of steelmaking slags*, In: Global Symposium and Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Espanha;

**Watanabe, F. A., 2004**, *Estudo sobre a utilização de areia de fundição residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto*;

## 6. SITES CONSULTADOS

**Confederação das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal**, [www.confagri.pt](http://www.confagri.pt) (acedido em Setembro de 2016);

**EPRI (Electric Power Research Institute), 1999**, *Power Quality for Induction Melting in Metals Production*, EUA (acedido em Setembro de 2016);

**UEPG, The European Aggregates Industry, 2015**, *Statistics, Estimates of Production Data*, <http://www.uepg.eu/index.php?pid=143>, (acedido em Novembro de 2016).