

Cristina Sofia Coelho Lourenço

Estudo do desempenho de betões com  
incorporação de agregados finos provenientes de  
resíduos industriais

**Tese de Mestrado**

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Paulo A. S. Costeira M. Silva

Professor Doutor Ricardo M. S. F. Almeida





Aos Meus Pais e Irmão,



## RESUMO

A crescente preocupação relacionada com a sustentabilidade ambiental e o risco de esgotamento de recursos naturais, tem levado à necessidade de encontrar novos materiais e novas técnicas construtivas. Nesse pressuposto, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a viabilidade de utilização de resíduos provenientes de indústrias da região (lamas de cal e cinzas de biomassa) em produção de betões que possam vir a ser utilizados na construção civil.

Neste sentido, desenvolveu-se uma campanha experimental com o intuito de comparar desempenho de sete tipos diferentes de betões: um de referência e seis com taxas de substituição de 20, 50 e 100% de agregados finos naturais por cinzas de biomassa e lamas de cal.

A composição dos diferentes betões foi determinada pelo método de Faury, cumprindo-se as exigências na norma NP EN 206-1.

O desempenho dos betões foi avaliado através da análise dos resultados de ensaios sobre o betão fresco (consistência, massa volúmica e teor de ar) e sobre o betão endurecido (massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão).

No presente trabalho, procedeu-se, também, à realização de ensaios químicos aos betões produzidos (lixiviação).

No final do trabalho é feita uma discussão dos resultados experimentais e são evidenciadas as principais conclusões deste estudo.



## **ABSTRACT**

The growing concern with the environmental sustainability and the risk of the depletion of natural resources lead to the search for new construction materials and techniques. With that assumption in mind, this thesis aims to evaluate the viability of using local regional waste (lime sludge and biomass ashes) in concrete.

With that purpose, an experimental campaign was developed with the aim of comparing the performance of seven different types of concrete: one as reference and six with replacement (20%, 50% and 100%) of the natural fine aggregates by biomass ashes and lime sludge.

The concrete's composition was determined by the Faury Method, matching the requirements of the NP EN 206-1 standard.

The concretes' performance was evaluated through the analysis of the results of the trials on the fresh concrete (consistency, mass density and air content) and on the hardened concrete (density, compressive strength, tensile strength by splitting test, water absorption by capillarity and water absorption by immersion).

In additive, leaching tests were carried on concrete.

In the last part a discussion of the experimental results is presented and the principal conclusions of the study are highlighted.



## **PALAVRAS CHAVE**

Sustentabilidade

Resíduos

Campanha Experimental

Betão



## KEY WORDS

Sustainability

Waste

Experimental Campaign

Concrete



## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação constitui mais uma importante fase da minha vida e o fecho de um ciclo muito esperado por mim. Como tal, reconheço que sem o apoio de todas as pessoas que me acompanharam ao longo desta etapa, o desenvolvimento e a realização desta dissertação não seria possível.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores Eng.º Paulo Alexandre da Silveira Costeira Marques da Silva e Eng.º Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida pela disponibilidade, interesse, incentivo, orientação e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

À professora Isabel Brás pela sua colaboração na orientação e desenvolvimento científico do trabalho, pela cedência dos resíduos em estudo e pela paciência e disponibilidade no esclarecimento de qualquer dúvida que se levantava no decorrer do trabalho.

Ao Eng.º Marco Filipe e ao Técnico Marco Vinhanova, um especial e profundo reconhecimento e agradecimento pela imprescindível colaboração e ajuda prestada na realização dos ensaios laboratoriais.

De uma forma especial quero agradecer aos meus pais, pela paciência, compreensão, dedicação e incentivo. Sem a força transmitida por eles, as opiniões, a capacidade motivadora e por me terem inculcido os princípios e os valores ao longo da minha vida, hoje não seria possível ter alcançado esta etapa da minha vida. Do fundo do coração, o meu muito obrigado por sempre acreditarem em mim e nunca me terem deixado desistir.

Ao meu irmão Adriano, que apesar de todos os contratempos normais de irmãos, sempre me apoiou e ouviu à sua maneira.

Aos meus colegas e amigos Joana Cunha, António Figueiredo, António Lourenço e Nuno Fonseca, que, cada um à sua maneira me ajudou na concretização deste trabalho, quer na fase de ensaios laboratoriais como na concessão final do trabalho.

A todos os meus colegas de curso que me acompanharam nesta caminhada, em especial à Andreia Fontinha, Joana Cunha, Elisabete Pinto e Catarina Moreira.

Por fim, quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidade que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização.

A todos, a minha sincera gratidão.



# ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL .....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xix
ÍNDICE DE QUADROS .....	xxiii
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos do trabalho .....	1
1.3 Estrutura e organização da dissertação .....	2
2. Estado da Arte .....	3
2.1 Introdução .....	3
2.2 Betões com incorporação de resíduos .....	7
2.3 Resíduos petrolíferos .....	8
2.3.1 Resíduos provenientes da indústria petrolífera.....	8
2.3.2 Granulado de borracha proveniente de pneus usados.....	9
2.4 Resíduos de cinzas .....	10
2.4.1 Cinzas de casca de arroz .....	10
2.4.2 Cinzas volantes .....	12
2.5 Resíduos provenientes da indústria do mármore .....	12
2.6 Resíduos de pó de vidro .....	14
2.7 Resíduos cerâmicos.....	15
2.7.1 Incorporação de resíduos cerâmicos e tijolos reciclados.....	15
2.8 Resíduos de cortiça .....	16
2.9 Síntese do capítulo .....	17
3. Caracterização dos Materiais.....	19
3.1 Introdução .....	19
3.2 Agregados .....	19
3.2.1 Introdução.....	19

3.2.2	Agregados grossos.....	20
3.2.3	Agregados finos.....	20
3.3	Caracterização laboratorial dos agregados .....	21
3.3.1	Introdução.....	21
3.3.2	Análise granulométrica.....	21
3.3.3	Índice de achatamento .....	23
3.3.4	Índice de forma.....	25
3.3.5	Desgaste de “Los Angeles” .....	26
3.3.6	Equivalente de areia.....	28
3.3.7	Massa volúmica .....	30
3.3.8	Baridade e percentagem de vazios.....	33
3.4	Água.....	35
3.5	Cimento.....	35
3.6	Resíduos.....	36
3.6.1	Introdução.....	36
3.6.2	Lamas de cal .....	36
3.6.3	Cinzas de biomassa.....	38
3.6.4	Caracterização dos resíduos.....	38
3.7	Metodologia e composição dos betões .....	41
3.8	Síntese do capítulo .....	43
4.	Campanha Experimental.....	45
4.1	Introdução .....	45
4.2	Preparação da campanha experimental.....	46
4.2.1	Produção dos betões .....	47
4.2.2	Preparação dos provetes .....	49
4.3	Ensaio em betão fresco.....	50
4.3.1	Abaixamento.....	50
4.3.2	Massa volúmica .....	52
4.3.3	Teor de ar no betão – Método pressiométrico .....	53
4.4	Ensaio em betão endurecido.....	56

4.4.1	Massa volúmica .....	56
4.4.2	Resistência à compressão .....	58
4.4.3	Resistência à tração por compressão .....	61
4.4.4	Absorção de água por capilaridade.....	62
4.4.5	Absorção de água por imersão.....	64
4.4.6	Ensaio ambientais .....	66
4.5	Síntese do capítulo .....	68
5.	Análise e Discussão dos Resultados.....	69
5.1	Ensaio em betão fresco.....	69
5.1.1	Abaixamento.....	70
5.1.2	Massa volúmica .....	71
5.1.3	Teor de ar no betão– método pressiométrico.....	72
5.2	Ensaio em betão endurecido.....	73
5.2.1	Massa volúmica .....	73
5.2.2	Resistência à compressão .....	75
5.2.3	Resistência à tração por compressão .....	78
5.2.4	Absorção de água por capilaridade.....	79
5.2.5	Absorção de água por imersão.....	84
5.2.6	Ensaio ambientais .....	88
5.3	Análise comparativa .....	91
5.3.1	Variações percentuais .....	91
5.3.2	Comparação com outros estudos .....	94
5.4	Síntese do capítulo .....	96
6.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	97
6.1	Conclusões gerais .....	97
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	99
	Referências .....	101
	APÊNDICES .....	107
	APÊNDICE A – Análise Granulométrica de Agregados segundo NP EN 933-1:2000. <b>Erro! Marcador não definido.</b>	

- APÊNDICE B – Ensaio de Índice de Achatamento NP EN 933-3:2002 **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE C – Massa Volúmica - NP EN 1097-6:2003 .... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE D – Baridade e índice de vazios da areia - NP EN1097-3:2002..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE E – Análise Granulométrica dos Resíduos segundo NP EN 933-1 2000 .. **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE F – Resultado do ensaio de determinação do teor de ar – Método pressiométrico ..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE G – Massa Volúmica do Betão Endurecido NP EN12390-7:2009..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE H – Resistência à compressão dos provetes segundo a norma NP EN 12390-3:2009 ..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE I – Resistência à tração por compressão diametral de provetes NP EN 12390-6:2003 ..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE J – Determinação de absorção de água por capilaridade - Especificação LNEC - E393-1993 ..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE K – Determinação de absorção de água por Imersão - Especificação LNEC - E394-1993 ..... **Erro! Marcador não definido.**
- APÊNDICE L – Ensaio de Lixiviação ..... **Erro! Marcador não definido.**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Ensaio em betão fresco e respetiva normalização (Yan, 2013).....	5
Figura 2-2: Ensaio a betão endurecido com a respetiva normalização (Yan, 2013).....	6
Figura 2-3: Ensaio de durabilidade do betão e os respetivos métodos sugeridos (Yan, 2013).6	
Figura 2-4: Resíduos provenientes da indústria petrolífera (Antunes, 2013).....	8
Figura 2-5: Cinza de casca de arroz (Sousa, 2005) .....	11
Figura 2-6: Cinzas volantes (Rocha, 2014) .....	12
Figura 2-7: Resíduo de mármore ( <a href="http://www.minasit.com.br">http://www.minasit.com.br</a> ) .....	14
Figura 2-8: Pó de vidro (Rocha, 2014).....	14
Figura 2-9: Trituração de peças sanitárias (Vieira, 2013) .....	15
Figura 2-10: Agregados finos reciclados de tijolos (Vieira, 2013) .....	15
Figura 2-11: Cortiça .....	16
Figura 3-1: Britas utilizadas como agregados grossos .....	20
Figura 3-2: Areias utilizadas como agregados finos .....	20
Figura 3-3: Curva granulométrica dos agregados.....	23
Figura 3-4: Peneiros de barras .....	24
Figura 3-5: Realização do ensaio de índice de forma.....	25
Figura 3-6: Ensaio de “Los Angeles” .....	27
Figura 3-7: Agregados depois do processo abrasivo .....	27
Figura 3-8: Realização do ensaio de equivalente de areia.....	28
Figura 3-9: Altura $h_1$ e $h_2$ segundo a norma NP EN 933-8:2002 .....	29
Figura 3-10: Determinação da massa volúmica .....	32
Figura 3-11: Realização do ensaio de determinação de baridade.....	33
Figura 3-12: Saco de cimento utilizado nas amassaduras .....	35
Figura 3-13: Lamas de cal utilizadas nas amassaduras de betão .....	37
Figura 3-14: Cinzas de biomassa utilizadas nas amassaduras de betão .....	38
Figura 3-15: Peneiração dos resíduos .....	39
Figura 3-16: Curva granulométrica das lamas de cal, cinzas de biomassa e areia fina.....	40
Figura 3-17: Curva ótima da mistura e curvas de Faury (C e C+M).....	42

Figura 4-1: Moldes utilizados.....	46
Figura 4-2: Processo de amassadura.....	48
Figura 4-3: Conceção dos provetes .....	49
Figura 4-4: Provetes dentro do tanque de cura.....	49
Figura 4-5: Ensaio de abaixamento .....	51
Figura 4-6: Ensaio de determinação da massa volúmica.....	52
Figura 4-7: Calibração do aparelho de medição do teor de ar.....	53
Figura 4-8: Ensaio da determinação do teor de ar no betão fresco.....	54
Figura 4-9: Ensaio de determinação do teor de ar dos agregados (G).....	55
Figura 4-10: Provetes em estufa ventilada ( $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) .....	57
Figura 4-11: Pesagem hidrostática do provete ( $m_{\text{hid}}$ ) .....	57
Figura 4-12: Ensaio à compressão - provete cúbico.....	59
Figura 4-13: Marcação das 6 medições para se calcular a área transversal da face carregada	60
Figura 4-14: Regularização da superfície do provete por capeamento .....	60
Figura 4-15: Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.....	61
Figura 4-16: Ensaio de tração por compressão diametral.....	62
Figura 4-17: Ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade .....	63
Figura 4-18: Ensaio de absorção de água por imersão .....	65
Figura 4-19: Ensaio de lixiviação .....	67
Figura 5-1: Resultados do ensaio de abaixamento .....	70
Figura 5-2: Aspeto das amassaduras de betão com 100% de resíduo .....	71
Figura 5-3: Teor de ar nos betões .....	73
Figura 5-4: Massa volúmica do betão em estado endurecido.....	75
Figura 5-5: Resistência à compressão de provetes cúbicos .....	76
Figura 5-6: Resistência à compressão dos betões aos 28 dias de idade .....	77
Figura 5-7: Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) .....	78
Figura 5-8: Absorção de água por capilaridade.....	80
Figura 5-9: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de cinzas de biomassa.....	81
Figura 5-10: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de lamas de cal.....	81

Figura 5-11: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com 20% de incorporação de resíduos .....	82
Figura 5-12: Absorção de água por capilaridade, no betão de referência e nos betões com 50% de incorporação de resíduos. ....	83
Figura 5-13: Absorção de água por capilaridade, no betão de referência e nos betões com 100% de incorporação de resíduos. ....	84
Figura 5-14: Absorção de água por imersão.....	85
Figura 5-15: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de 20% de resíduos .....	85
Figura 5-16: Evolução da absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de 50% de resíduos .....	86
Figura 5-17: Evolução da absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de 100% de resíduos .....	87
Figura 5-18: Absorção de água por imersão, decorridas 72 horas. ....	88
Figura 5-19: Valores médios de pH.....	89
Figura 5-20: Valores médios para a condutividade .....	89



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1: Equipamentos utilizados na análise granulométrica dos agregados .....	22
Quadro 3-2: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1).....	22
Quadro 3-3: Módulo de finura dos agregados .....	23
Quadro 3-4: Equipamentos necessários ao ensaio de determinação do índice de achatamento dos agregados .....	24
Quadro 3-5: Resultados do ensaio de índice de achatamento .....	25
Quadro 3-6: Equipamentos necessários ao ensaio de determinação do índice de forma .....	26
Quadro 3-7: Índices de forma das duas britas .....	26
Quadro 3-8: Equipamentos necessários para a realização do ensaio de "Los Angeles" .....	26
Quadro 3-9: Resultados do ensaio de desgaste de "Los Angeles" .....	27
Quadro 3-10: Equipamentos utilizados no ensaio de equivalente de areia .....	29
Quadro 3-11: Valores do ensaio de Equivalente de Areia.....	30
Quadro 3-12: Equipamentos utilizados no ensaio da determinação de massa volúmica .....	30
Quadro 3-13: Massa volúmica das partículas secas em estufa das duas areias.....	32
Quadro 3-14: Equipamentos utilizados no ensaio de determinação de baridade .....	33
Quadro 3-15: Resultados da baridade das duas areias.....	34
Quadro 3-16: Percentagem de vazios das duas areias .....	34
Quadro 3-17: Composição química das lamas de cal.....	37
Quadro 3-18: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1).....	39
Quadro 3-19: Parâmetros de lixiviação dos resíduos e cimento (Brás et al, 2016).....	40
Quadro 3-20: Tipos de betões que se pretende produzir .....	41
Quadro 3-21: Composição dos betões para 1m <sup>3</sup> .....	42
Quadro 4-1: Síntese dos ensaios realizados e provetes utilizados.....	47
Quadro 4-2: Data de realização de cada amassadura .....	48
Quadro 4-3: Composição de cada amassadura .....	48
Quadro 4-4: Ensaio em betão fresco .....	50
Quadro 4-5: Classes de abaixamento do betão fresco .....	51
Quadro 4-6: Equipamentos utilizados no ensaio de abaixamento do betão fresco .....	51

Quadro 4-7: Equipamentos usados na determinação da massa volúmica do betão fresco.....	53
Quadro 4-8: Equipamento utilizado no ensaio de determinação do teor de ar no betão fresco	55
Quadro 4-9: Síntese dos ensaios em betão endurecido.....	56
Quadro 4-10: Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da massa volúmica em betão endurecido .....	58
Quadro 4-11: Equipamentos utilizados no ensaio de compressão .....	60
Quadro 4-12: Equipamentos necessários ao ensaio de tração por compressão diametral.....	62
Quadro 4-13: Equipamentos utilizados na realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	64
Quadro 4-14: Equipamentos empregues no ensaio de absorção de água por imersão .....	65
Quadro 4-15: Equipamentos empregues no ensaio de absorção de água por imersão .....	68
Quadro 5-1: Resultados obtidos no ensaio de abaixamento .....	70
Quadro 5-2: Resultados da massa volúmica do betão em estado fresco .....	72
Quadro 5-3: Resultados do ensaio de teor de ar no betão em estado fresco.....	72
Quadro 5-4: Valores médios da massa volúmica do betão em estado endurecido.....	74
Quadro 5-5: Valores médios da resistência à compressão, para os 7 e os 28 dias de idade.....	76
Quadro 5-6: Valores médios da resistência à tração por compressão diametral (MPa) .....	78
Quadro 5-7: Valores médios da absorção de água por capilaridade.....	79
Quadro 5-8: Valores médios da absorção de água por imersão (%) .....	84
Quadro 5-9: Valores médios de pH e de condutividade.....	88
Quadro 5-10: Concentração de cloretos e sulfatos .....	90
Quadro 5-11: Teor de humidade.....	91
Quadro 5-12: Percentagem de variação dos resultados dos ensaios de betão fresco em relação ao betão de referência .....	92
Quadro 5-13: Percentagem de variação dos resultados da massa volúmica dos betões com resíduos relativamente ao betão de referência.....	92
Quadro 5-14: Percentagem de variação dos resultados da resistência à compressão dos betões com resíduo relativamente ao betão de referência.....	93
Quadro 5-15: Percentagem de variação dos resultados da resistência à tração dos betões com resíduo relativamente ao betão de referência .....	93
Quadro 5-16: Consequência da incorporação dos resíduos nas propriedades do betão .....	94

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5-17: Resumo dos resultados obtidos nos diversos ensaios pelos autores referidos no estado de arte .....	95
---	----



# **1. Introdução**

## **1.1 Enquadramento**

Os resíduos provenientes de indústrias representam cada vez mais um sector de contaminação do meio ambiente, contribuindo para a degradação da qualidade de vida de todos os seres vivos.

Contudo nas últimas décadas a população mundial tem vindo a tomar consciência do excesso de consumo dos recursos naturais e as posteriores consequências que daí advêm.

O reaproveitamento de resíduos provenientes de indústrias deve ser assumido como uma aposta estratégica do setor dos materiais de construção, existindo já alguns registos de vários casos de sucesso relacionados com a incorporação de resíduos, nomeadamente, nas argamassas, materiais de pavimentação e em betões.

A obtenção de matérias-primas para a produção de um betão envolve o consumo de recursos naturais não renováveis, visto que os agregados constituintes são extraídos quer de rochas em pedreiras, quer pela extração de pedras e areias dos leitos dos rios e na costa marítima. À medida que estes recursos naturais forem escasseando, a sua obtenção encarece, direta e indiretamente. Deste modo, é urgente encontrar-se alternativas como a incorporação de resíduos industriais em materiais de construção

## **1.2 Objetivos do trabalho**

Este trabalho visa avaliar o desempenho de betões com incorporação de resíduos provenientes de indústrias da região.

Neste sentido, pretende-se analisar os efeitos da incorporação de resíduos nas propriedades e desempenho dos betões, quer em estado fresco, quer em estado endurecido.

O estudo envolveu a produção de um betão de referência da classe C30/37 e de seis outros betões em que se substituíram os agregados finos tradicionais por agregados provenientes de resíduos industriais (lamas de cal e cinzas de biomassa), em percentagens de 20, 50 e 100%. De forma a assegurar que os betões produzidos pudessem ser comparados entre si, os mesmos apresentaram a mesma composição volumétrica e a mesma curva granulométrica.

Para a concretização dos objetivos, foi estabelecida uma campanha experimental que envolveu:

- A caracterização experimental dos agregados constituintes das misturas de betão, através de ensaios normalizados;
- A realização de ensaios experimentais ao betão fresco e ao betão endurecido, para assim se poder estudar e comparar as características mecânicas e físicas dos diversos betões;
- A realização de ensaios de lixiviação com vista a caracterizar quimicamente os betões produzidos.

Em suma, pretende-se reutilizar os resíduos, principalmente os da região de Viseu, incorporando-os como substitutos parciais dos agregados finos que compõem o betão.

### **1.3 Estrutura e organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo faz-se um enquadramento do tema, estabelecendo-se os objetivos pretendidos.

No capítulo 2 realiza-se uma revisão bibliográfica sobre o estudo de betões com incorporação de resíduos industriais na composição do betão, em substituição parcial ou total dos agregados convencionais. Identificam-se as principais propriedades a avaliar neste tipo de betões.

A identificação e caracterização individual dos constituintes dos betões, bem como os ensaios realizados aos agregados e aos resíduos são apresentados no capítulo 3.

A campanha experimental desenvolvida para dar cumprimento aos objetivos estabelecidos é apresentada no capítulo 4, onde se descrevem os ensaios realizados ao betão fresco e ao betão endurecido.

No capítulo 5 expõem-se os resultados obtidos ao longo da campanha experimental e faz-se a análise e discussão dos mesmos.

Por fim, no capítulo 6 resumem-se as principais conclusões obtidas neste trabalho e apresentam-se ainda algumas sugestões para desenvolvimentos futuros neste domínio de investigação.

## 2. Estado da Arte

### 2.1 Introdução

Ao longo dos tempos o ramo da construção tem sofrido vários progressos, tanto a nível da conceção como da evolução dos materiais utilizados. O emprego do betão nas construções já é feito há muito tempo e a sua utilização é cada vez mais relevante. Contudo, a sua constituição e fabrico também tendem a evoluir e inovar. O betão é utilizado não só na parte estrutural das edificações (como betão armado ou betão pré-esforçado) e obras de arte, mas também em revestimentos, lancis de passeios, viadutos, guardas e até mesmo peças de arte, por exemplo.

A constituição do betão baseia-se numa mistura proporcionada de cimento com agregados finos (areias), agregados grossos (britas) e água, podendo ser incorporados adjuvantes e adições (que melhoram o seu desempenho).

Os adjuvantes são materiais incorporados no betão em pequenas quantidades (que não exceda 5% em massa do teor de cimento do betão) no processo de amassadura, com a finalidade de alterar certas propriedades do betão, como o aumento da resistência, a redução da permeabilidade, a manutenção da consistência e a redução da razão água/cimento (A/C).

As adições são utilizadas no betão para a melhoria de certas propriedades ou para alcançar propriedades especiais. Estes materiais são introduzidos na amassadura e, segundo a norma NP EN 206-1: 2007 - *“Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”*, classificam-se em:

- Adições do Tipo I – materiais quimicamente inertes (p.e. filer calcário);
- Adições do Tipo II – materiais quimicamente reativos (p.e. cinzas volantes, sílica de fumo).

As adições podem trazer diversos benefícios, agrupando-se habitualmente em:

- Ambientais: redução da emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), uma vez que há menor dispêndio de energia e permite a reutilização de subprodutos;
- Económicos: menores custos de produção do betão;
- Tecnológicos: melhoria no desempenho do betão.

A composição do betão normal é determinada consoante o tipo de construção pretendida e as exigências espectáveis, especificando-se de acordo com a norma NP EN 203 – 1:2007-*“Especificação, desempenho, produção e conformidade”*.

Segundo Ferreira (2000), para a obtenção de um betão com qualidade, é necessário ter em mente a regra dos “4C”: cimento, composição, compactação e cura.

O betão é um material bastante moldável, permitindo construir edificações com os mais diversos formatos. É caracterizado por conceder estabilidade e resistência a uma estrutura.

O betão é conhecido pela sua resistência à compressão e por ser muito durável, contudo há que ter em consideração que a durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma função relacionada com o desempenho do material durante a sua vida de serviço sob determinadas condições ambientais. Deste modo, quando se pretende caracterizar um determinado betão, deve-se ter em conta alguns aspetos que têm de ser garantidos, como:

- Classe de exposição;
- Classe de resistência;
- Classe de consistência;
- Classe de massa volúmica;
- Classe de teor de cloretos.

O betão em estado fresco deve possuir uma determinada consistência, que permita ser transportado, colocado e compactado de forma eficiente e sem segregação. Assim, uma das mais importantes propriedades do betão fresco é a trabalhabilidade, caracterizada por duas propriedades: a fluidez, que descreve a maior ou menor facilidade que a amassadura tem em fluir e a coesão, que descreve a resistência à segregação (tendência dos agregados se separarem da pasta de cimento).

O estudo do betão em estado fresco influencia o seu comportamento no estado endurecido. Deste modo, as características do betão fresco podem influenciar o comportamento do betão depois da cura.

Os ensaios no betão fresco têm como principal objetivo avaliar propriedades que serão importantes para uma boa aplicação em obra, como a consistência, a trabalhabilidade, a massa volúmica e o teor de ar do betão fresco (Brito et al, 2009 – Citado por Yan, 2013).

A Figura 2-1 mostra uma compilação dos ensaios mais correntes realizados em betões no estado fresco, bem como a respetiva normalização:

Ensaio	Métodos de ensaio
Amostragem	NP EN 12350-1:2009
Ensaio de abaixamento	NP EN 12350-2:2009
Ensaio Vêbê	NP EN 12350-3:2009
Grau de compactabilidade	NP EN 12350-4:2009
Ensaio da Mesa de espalhamento	NP EN 12350-5:2009
Massa volúmica	NP EN 12350-6:2009
Determinação do teor de ar – Método pressiométrico	NP EN 12350-7:2009
Betões auto-compactáveis - espalhamento	NP EN 12350-8:2010
Betões auto-compactáveis – escoamento no funil V	NP EN 12350-9:2010
Betões auto-compactáveis – espalhamento na caixa L	NP EN 12350-10:2010
Betões auto-compactáveis – resistência à segregação	NP EN 12350-11:2010
Betões auto-compactáveis – espalhamento com anel J	NP EN 12350-12:2010
Exsudação do betão	ASTM C232:2009
Ensaio de deslize *	Procedimento interno

\*Ensaio realizado com base num procedimento interno do próprio laboratório.

Figura 2-1 Ensaios em betão fresco e respetiva normalização (Yan, 2013)

O betão em estado endurecido é caracterizado principalmente pela sua resistência mecânica, fornecendo informações muito relevantes sobre a sua qualidade. Esta propriedade está diretamente relacionada com a hidratação da pasta cimentícia no ato de conceção e, desta forma, relacionada com a razão A/C. Outra propriedade fundamental do betão endurecido é a sua durabilidade.

Os ensaios que se realizam em betões em estado endurecido tendem a avaliar o seu comportamento em condições de serviço, ou seja, quando estiver a desempenhar as funções para os quais foi concebido (Envegelista, 2003 – Citado por Yan, 2013).

Os ensaios em estado endurecido mais comuns, caracterizando as propriedades físicas e mecânicas, estão indicados na Figura 2-2.

Os ensaios que visam a caracterização da durabilidade do betão estão descritos na Figura 2-3, incluindo a respetiva normalização.

Ensaio	Métodos de ensaio
Resistência à compressão dos provetes de ensaio	NP EN 12390-3:2003
Resistência à flexão dos provetes	NP EN 12390-5:2003
Resistência à tração por compressão diametral	NP EN 12390-6:2011
Resistência à abrasão	LNEC E 396:2003
Determinação do módulo de elasticidade em compressão	LNEC E 397:2003
Massa volúmica	NP EN 12390-7:2003
Determinação da retração e da expansão	LNEC E 398:2003
Determinação do coeficiente de fluência em compressão	LNEC E 399:2003
Profundidade de penetração de água sob pressão	NP EN 12390-8:2009
Espessura de elementos laminares. Impacto-eco	ASTM C 1383:2010
Determinação do índice esclerométrico	NP EN 12504-2:2003*
Medição da velocidade de propagação dos ultrassons	NP EN 12504-4:2007*
Determinação da força de arranque	NP EN 12504-3:2007*
Ensaio de penetração da sonda (pistola de windsor)	ASTM C 803:2010

\* Ensaio não-destrutivo do betão nas estruturas

Figura 2-2: Ensaio a betão endurecido com a respetiva normalização (Yan, 2013)

Ensaio	Métodos de ensaio
Carbonatação acelerada	LNEC E 391:2003
Difusão de cloretos – ensaio de migração	LNEC E 463:2004
Absorção de água por capilaridade	LNEC E 393:2003
Absorção de água por imersão (pressão atmosférica)	LNEC E 394:2003
Absorção de água por imersão (sob vácuo)	LNEC E 395:2003
Permeabilidade à água superficial sob pressão – método GWT	LNEC E 475:2007
Permeabilidade ao ar. Método de Torrent	SN 505 262/1:2003
Permeabilidade ao oxigénio	LNEC E 392:2003
Permeabilidade ao gás	(1)
Difusão de gás	(1)
Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration	ASTM C 1202:2012
Coefficiente de difusão do cloro	(2)
Resistividade elétrica	(2)

(1) Ensaio baseado no procedimento interno

(2) Ensaio baseado no procedimento *CTH Rapid Method* desenvolvido por *Luping*.

Figura 2-3: Ensaio de durabilidade do betão e os respetivos métodos sugeridos (Yan, 2013)

## **2.2 Betões com incorporação de resíduos**

As crescentes preocupações relacionadas com a sustentabilidade do edificado ao longo do seu tempo de vida condicionam cada vez mais a escolha e seleção dos materiais e sistemas para a construção e reabilitação de edifícios.

A indústria da construção civil sempre atendeu às necessidades básicas do ser humano, sem grande atenção com as técnicas utilizadas e com os seus impactos ambientais. Inicialmente apenas importava construir de forma rápida e económica, sem atender às questões da sustentabilidade.

O conceito de sustentabilidade tem levado a uma crescente preocupação da sociedade, em escala planetária, da necessidade urgente de minimizar os impactos ambientais.

Esta pode ser entendida como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações do presente, sem nunca comprometer as gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, Santos E. (2013).

No ramo da construção civil, nota-se uma crescente preocupação com o meio ambiente, desde o fabrico dos materiais de construção, ao transporte, aplicação e posterior manutenção e durabilidade.

A produção do betão é um processo de grande consumo de matérias-primas virgens, ou seja, recursos naturais, como a areia, pedra, cascalho moído e água.

Considerando que o uso do betão é cada vez mais recorrente em obras de construção civil, qualquer redução trará vantagens ecológicas significativas. Desta forma, a reciclagem e a reutilização estão entre as principais alternativas em busca de um desenvolvimento sustentável. É importante analisar os possíveis cenários que permitem uma obtenção do betão de forma mais sustentável e ao mesmo tempo economicamente viável, sem nunca esquecer as suas propriedades principais: resistência e estabilidade dimensional.

Alguns estudos recentes já têm vindo a testar a introdução no betão de materiais diferentes, que substituem total ou parcialmente os agregados (areias e britas), com o objetivo de obter novas e melhores características do betão e/ou diminuir o uso de recursos naturais.

Uma das alternativas já estudadas é a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD), como substituto de agregados. O Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de março, alterado pelo Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho, estabelece o regime das operações de gestão de RCD, compreendendo a sua prevenção, reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenamento, tratamento e eliminação. Neste sentido, o seu reaproveitamento através da incorporação no betão é uma mais-valia, quer na eliminação destes do meio ambiente, quer na minimização dos recursos necessários ao fabrico do betão.

Outra alternativa que visa minimizar os impactos ambientais e que já tem sido objeto de estudo no fabrico do betão, é a incorporação de resíduos provenientes do setor industrial, como substituto dos agregados ou do cimento. O Plano Estratégico dos Resíduos Industriais

(PESGRI, 2001), aprovado pelo Decreto-Lei nº 89/2002, de 9 de abril, define os princípios estratégicos a que deve obedecer a gestão deste tipo de resíduos no território nacional. A linha de atuação estabelecida é centrada:

- Na prevenção da produção de resíduos;
- Na promoção e desenvolvimento das opções de reutilização e reciclagem, garantido a proteção da saúde e do ambiente;
- Na promoção de eliminação do passivo ambiental;
- No desenvolvimento da autossuficiência do país em matérias de gestão de resíduos.

Estes resíduos não possuem qualquer valor comercial, por serem considerados como desperdício, desta forma pode tornar-se rentável a sua reutilização.

A maior parte dos estudos já realizados conduzem a resultados satisfatórios a nível ambiental, contudo, a nível do desempenho mecânico e na durabilidade dos betões verifica-se uma ligeira baixa de valores, com a adição de resíduos, não sendo esta muito significativa.

Apresenta-se de seguida, de forma sucinta, um resumo de trabalhos já desenvolvidos no âmbito da incorporação total ou parcial de resíduos na composição de betões, agrupados em função da natureza dos resíduos.

## **2.3 Resíduos petrolíferos**

### **2.3.1 Resíduos provenientes da indústria petrolífera**

Antunes (2013), desenvolveu uma campanha experimental que incluiu a produção de betões com quatro traços diferentes, correspondentes à substituição parcial de cimento por 0, 10, 20 e 30% (em massa) por resíduo da indústria petrolífera (ver Figura 2-4).



Figura 2-4: Resíduos provenientes da indústria petrolífera (Antunes, 2013)

Para estudar as propriedades dos betões no estado fresco, avaliou a consistência pelo método do abaixamento, a massa volúmica e o teor de ar. Já no betão em estado endurecido, avaliou a

velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, a resistência à compressão, o índice esclerométrico, a absorção de água por capilaridade e por imersão, e as variações dimensionais.

Com os resultados deste estudo Antunes (2013) verificou que esta incorporação conduziu:

- à diminuição da fluidez do betão;
- ao incremento da resistência à compressão, aos 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias;
- à diminuição da absorção de água por capilaridade até 20% de substituição de cimento, enquanto para 30% de incorporação ao aumento significativo;
- ao aumento da absorção de água por imersão;
- à diminuição da retração quando a análise das variações dimensionais é realizada na ausência de tensões aplicadas e variações de temperatura;
- ao aumento de expansão do betão quando a análise das variações dimensionais é realizada aplicando uma tensão (provocada pela água da cura, dos provetes imersos em água).

### **2.3.2 Granulado de borracha proveniente de pneus usados**

Valadares (2009) realizou uma investigação sobre o desempenho de betões com a incorporação de granulado de borracha de pneus usados. Procedeu à realização de diversos ensaios, analisando a trabalhabilidade, a massa volúmica, a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência por abrasão, no betão endurecido.

Neste trabalho foram utilizados 13 betões diferentes, de referência e composições com 3 percentagens de substituição (em volume total de agregados: 5, 10 e 15%), que se subdividiram em 3 padrões: finos, grossos ou ambos.

De um modo geral, Valadares (2009) concluiu que os betões com incorporação de granulado de borracha, demonstraram piores características mecânicas, por comparação com o betão de referência, tanto piores quanto maior percentagem de substituição. Relativamente à granulometria, a utilização de partículas de borracha de maior dimensão conduziu a melhores resultados, em todos os ensaios. Por sua vez, a substituição simultânea de finos e grossos demonstrou desempenhos intermédios e o uso exclusivo de finos originou piores resultados.

A adição de granulado de borracha em betões conduziu a:

- Massas volúmicas: menores para a substituição dos finos, maiores nos grossos e intermédias quando as substituições são simultâneas nos finos e grossos. À medida que a percentagem de substituição aumenta, a massa volúmica diminui;

- Redução de resistência à compressão mais acentuada para betões mais jovens e com maiores percentagens de substituição;
- Redução de resistência à tração por compressão diametral, com o aumento da percentagem de substituição de agregados;
- Redução do módulo de elasticidade, com o aumento do teor de borracha;
- Um desempenho mais favorável no ensaio à abrasão, devido à maior resistência ao desgaste deste material.

Eldin et al (1993), citado por Costa (2011), também procedeu ao estudo da utilização de diferentes partículas de borracha no processo de fabrico do betão, em substituição dos agregados grossos e finos. Constatou reduções significativas nos valores da resistência à compressão do betão devido à incorporação de borracha, na ordem dos 85% e 65% para a substituição de agregado grosso e fino respetivamente. Contudo, estes não apresentaram rotura frágil quando submetidos à compressão e à tração, mas sim demonstraram ter maior capacidade de absorção de energia plástica.

## **2.4 Resíduos de cinzas**

### **2.4.1 Cinzas de casca de arroz**

As cascas de arroz são um resíduo agrícola caracterizado por ter: baixa densidade, carácter abrasivo, valor nutritivo reduzido e alto teor em sílica.

Uma das formas de reduzir a acumulação destes resíduos é através da incineração controlada, que transforma a casca num material pozolânico (produtos constituídos essencialmente por sílica e alumina) muito reativo.

Sousa (2005) desenvolveu um trabalho de investigação sobre a incorporação de cinzas de casca de arroz em betões. Desse modo, produziu um betão numa indústria de pré-fabricação de betão, denominado como o comparativo.

Depois, após obtenção de cinzas de casca de arroz a partir de cascas de arroz portuguesas incineradas de forma controlada, foram produzidos elementos do tipo “box-culvert”, seguindo os procedimentos usuais da indústria. OS elementos adotadas nesta investigação, tinham dimensões interiores de 1,00m x 1,00m e 0,15m de espessura e foram betonados com cofragens metálicas (paredes). Os provetes utilizados foram provetes de forma cilíndrica obtidos por carotagem das paredes pré-fabricadas.

Assim, nesta composição o ligante foi apenas o cimento, enquanto numa outra composição, 7% do cimento foi substituído por cinzas de casca de arroz, representada na Figura 2-5.



Figura 2-5: Cinza de casca de arroz (Sousa, 2005)

Os principais resultados dos ensaios realizados foram:

- Acabamento superficial: o acabamento do betão com incorporação de cascas de arroz apresenta-se muito mais perfeito, praticamente sem poros e imperfeições, o que não se verificou no betão de controlo;
- Resistência superficial: constatou-se que os resultados não foram conclusivos, podendo-se apenas referenciar que a utilização de cinzas de casca de arroz melhorou o acabamento superficial;
- Absorção de água por capilaridade: o uso de cinzas de casca de arroz introduziu algumas modificações na rede porosa, reduzindo cerca de 12% os coeficientes de absorção;
- Penetração de água: os resultados confirmaram que a utilização de cinzas de casca de arroz implica alterações a nível da estrutura porosa;
- Penetração de cloretos: os resultados demonstraram que a introdução de cinzas de casca de arroz foi vantajosa porque permitiu elevar substancialmente a resistência dos betões à penetração de iões cloreto;
- Carbonatação: a introdução de cinzas de casca de arroz reduziu a quantidade de hidróxido de cálcio presente;
- Microscopia eletrónica de varrimento (MEV): constatou-se que a matriz cimentícia do betão de controlo é mais irregular, contendo um maior número de poros, o que contribuiu para explicar algumas melhorias verificadas em termos de durabilidade.

De uma forma geral, os resultados obtidos provam que a utilização de cinzas de casca de arroz contribui para a melhoria da durabilidade do betão, sem uma redução significativa da resistência.

### 2.4.2 Cinzas volantes

A cinza volante, Figura 2-6, é um subproduto industrial obtido por captação de poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado. Tem vindo a constatar-se as vantagens da sua incorporação no betão, nomeadamente, a melhoria da trabalhabilidade, a redução do calor de hidratação, a redução da permeabilidade e a consequente melhoria da durabilidade (Sousa, 2005).



Figura 2-6: Cinzas volantes (Rocha, 2014)

Este material também tem sido testado e utilizado essencialmente ao nível da substituição parcial do cimento, verificando-se aproveitamentos satisfatórios na poupança de matérias-primas e na redução substancial das emissões de CO<sub>2</sub>. Uma outra vantagem que se retira da incorporação de cinzas volantes é o aumento da durabilidade do betão armado ou pré-esforçado, pois conferem maior resistência a agentes agressivos, protegendo o betão armado da corrosão (Rocha, 2014).

## 2.5 Resíduos provenientes da indústria do mármore

Silva (2012), pretendeu avaliar o desempenho mecânico de betões com adição de agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore em diferentes percentagens – 20, 50 e 100%.

Neste trabalho foi avaliada a trabalhabilidade e a massa volúmica após a amassadura e, relativamente às propriedades do betão endurecido, estudou-se a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência ao desgaste por abrasão.

Para tal, recorreu a provetes cúbicos e cilíndricos, de 10 tipos diferentes de betão: 3 betões de referência (incorporando agregados finos de areia de basalto, siliciosa (rio Tejo) e granito), e composições com 4 percentagens de substituição dos agregados finos primários por agregados

secundários finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore (em volume do total de agregados - 20, 50 e 100%).

As principais conclusões retiradas a partir dos resultados dos ensaios realizados ao betão fresco foram as seguintes:

- Ensaio de abaixamento: a trabalhabilidade foi afetada pelo aumento da taxa de substituição de agregados. De modo a manter a trabalhabilidade foi necessário aumentar a relação A/C à medida que aumentava a taxa de substituição de agregados;
- Ensaio de determinação da massa volúmica: conclui que a incorporação de agregados secundários de mármore nos betões resulta num decréscimo da massa volúmica do betão. Isto acontece, porque a areia de mármore apresenta massa volúmica inferior à areia de basalto.

Dos ensaios realizados ao betão endurecido retiraram as seguintes ilações:

- Ensaio de resistência à compressão: observou-se uma diminuição da resistência à compressão com o aumento da taxa de incorporação;
- Ensaio à tração por compressão diametral: verificou-se o mesmo que no ensaio anterior;
- Ensaio de módulo de elasticidade: concluiu-se que a substituição de agregados grossos tem uma influência significativamente superior à da substituição de agregados finos;
- Resistência à abrasão: a incorporação de agregados provenientes da indústria de mármore tem uma influência negativa na resistência à abrasão.

Assim, Silva (2012) concluiu que a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore não compromete as características mecânicas, podendo ser usados como agregados finos em betões estruturais. Contudo, de modo a obter perdas de resistência de, no máximo 17%, aconselha a usar percentagens de substituição até 50%.

Gameiro (2013) estudou 10 composições de betão: 3 de referência (com a totalidade de agregados finos de basalto, areia de rio e granito), 3 com substituição de 20% em volume de agregados finos por agregados finos reciclados de mármore, 3 com substituição de 50% em volume de agregados finos por agregados finos reciclados de mármore e 1 betão constituído por 100% de agregados finos reciclados de mármore.

Gameiro (2013) realizou ensaios ao betão fresco avaliando a trabalhabilidade e a massa volúmica, recorrendo aos mesmos ensaios que Silva (2012).

Quanto ao betão em estado endurecido, foi avaliado em termos de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e imersão, carbonatação, penetração de cloretos e retração.

De uma forma geral, Gameiro (2013) concluiu que as características de durabilidade de betões com agregados finos de granito, basalto e areia de rio, tendem a melhorar. Com a incorporação gradual de finos de mármore, estes valores tendem a piorar. Contudo, conclui-se que estas alterações não condicionam a utilização de mármore no betão, desde que com uma adequada relação A/C, (ver Figura 2-7).



Figura 2-7: Resíduo de mármore (<http://www.minasit.com.br>)

## 2.6 Resíduos de pó de vidro

O vidro é um tipo de resíduo que oferece inúmeras vantagens sob o ponto de vista da reutilização.

Rocha (2014) pretendeu demonstrar que a utilização do vidro (ver Figura 2-8) como adição do betão para além de uma forma de reaproveitamento pode proporcionar à construção materiais mais duráveis e sustentáveis.

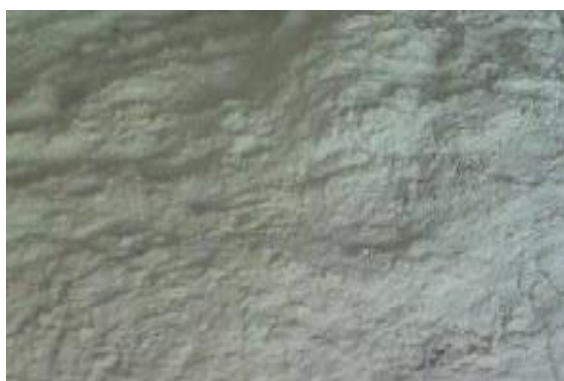


Figura 2-8: Pó de vidro (Rocha, 2014)

Rocha (2014) realizou um estudo comparativo entre diferentes composições com diferentes adições, também com incorporação de fibras e superplastificantes, gerando uma análise que visava a avaliação do comportamento estrutural do betão a nível da trabalhabilidade, da flexão, da compressão e da tração.

O autor chegou à conclusão que a propriedade que melhor comportamento teve foi a resistência à compressão. A incorporação de fibras e de superplastificantes, também melhoraram significativamente o comportamento à flexão e à tração.

Park et al (2004), citado por Costa (2011), procedeu ao estudo do comportamento mecânico de betões com substituição de agregado natural fino por diversas taxas de incorporação de agregado reciclado de vidro, resultante do uso doméstico e da indústria vidreira.

Com este estudo conclui que quanto maior a taxa de incorporação de resíduo na mistura de betão, menor a resistência à compressão, à tração e à flexão.

## 2.7 Resíduos cerâmicos

### 2.7.1 Incorporação de resíduos cerâmicos e tijolos reciclados

Vieira (2013) estudou a substituição dos agregados finos naturais por agregados cerâmicos, nomeadamente agregados provenientes da trituração de loiças sanitárias, ver Figura 2-9, e tijolos, ilustrados na Figura 2-10. Procedeu à avaliação da retração, da absorção de água por imersão e por capilaridade, da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos. Utilizou provetes cúbicos, cilíndricos e paralelepipedais, para 7 tipologias diferentes de betão: 1 de referência, e 6 com substituição de agregados finos naturais por reciclados em 20, 50 e 100%.



Figura 2-9: Trituração de peças sanitárias (Vieira, 2013)



Figura 2-10: Agregados finos reciclados de tijolos (Vieira, 2013)

As principais conclusões retiradas deste trabalho foram as seguintes:

- Os valores da massa volúmica do betão no estado fresco, da resistência à compressão, da absorção de água por capilaridade e da penetração de cloretos diminuem com o aumento da taxa de incorporação de resíduos;
- A retração aumenta com o aumento da taxa de incorporação de resíduos;
- As propriedades em termos de durabilidade deterioram-se com o aumento da taxa de incorporação de resíduos provenientes de loiças sanitárias;
- A incorporação de agregados finos reciclados de tijolos, apresentaram uma qualidade aceitável para uma eventual aplicação estrutural, embora em taxas de substituição reduzidas.

## 2.8 Resíduos de cortiça

Costa (2011) analisou a possibilidade de substituição total e parcial de agregados por granulados de cortiça, ilustrados na Figura 2-11, na composição de betões e argamassa.



Figura 2-11: Cortiça

Costa (2011) pretendeu estudar as propriedades mecânicas e de durabilidade em comparação com um betão de referência previamente dimensionado. Para isso investigou diferentes composições utilizando como agregados dois tipos de grânulos e com diferentes taxas de incorporação – 20, 25, 30 e 40%. Foram avaliadas as reações ao gelo-degelo, a profundidade de penetração de cloretos e a resistência à tração por compressão diametral dos betões.

Os resultados obtidos foram comparados com os do betão de referência, retirando as seguintes conclusões:

- Existe uma diminuição da resistência à compressão do betão à medida que se aumenta a percentagem de cortiça na mistura;

- Para a obtenção de betões estruturais com incorporação de granulados de cortiça a melhor opção é a substituição parcial do agregado fino (areia) por cortiça;
- A redução de resistência é maior quando se utiliza granulado de cortiça expandida, comparativamente à utilização de granulado de cortiça natural;
- Quando se aumenta a percentagem de substituição do agregado corrente, por cortiça, a massa volúmica do betão diminui;
- Betões com maior incorporação de cortiça registam maiores valores de absorção de água;
- A introdução de granulados de cortiça em substituição do agregado grosso, conduz à obtenção de betões mais leves, embora com menor resistência mecânica.

## **2.9 Síntese do capítulo**

Este capítulo pretendeu enquadrar o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação. Assim, efetuou-se um resumo do estado da arte sobre a incorporação de resíduos na composição de betões.

Inicialmente, realizou-se uma breve introdução sobre a composição de um betão simples, e sobre os tipos de adições e suas principais características.

Posteriormente, procedeu-se a uma análise de trabalhos já realizados no âmbito da incorporação de resíduos industriais em betões em Portugal. Concluiu-se, de uma forma geral, que a substituição de agregados naturais por resíduos é uma mais-valia em termos ambientais e também em termos económicos. Contudo, a componente mecânica e de durabilidade carecem de um estudo mais aprofundado. Verificou-se ainda que a razão A/C desempenha um papel fundamental.



## **3. Caracterização dos Materiais**

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados no fabrico dos diferentes betões, incluindo os ensaios realizados previamente aos agregados e resíduos constituintes da mistura.

De forma sucinta justifica-se o porquê da incorporação de resíduos (cinzas de biomassa e lamas de cal), em taxas de 0, 20, 50 e 100% em substituição de agregado fino e explica-se o processo de estudo da composição do betão de referência e, conseqüentemente, das variantes com incorporação de resíduos.

### **3.2 Agregados**

#### **3.2.1 Introdução**

O betão é constituído maioritariamente por agregados, sendo que as suas características estão diretamente relacionadas com o desempenho do betão quer a curto, quer a longo prazo. A caracterização dos agregados é, portanto, fundamental, dividindo-se habitualmente as suas características em três grupos diferentes: geométricas, físicas e químicas. Dentro das características geométricas, destaca-se a dimensão e a forma dos agregados, que podem ser avaliados pelos ensaios de análise granulométrica e índice de achatamento, entre outros. As propriedades físicas englobam características como a densidade, a resistência mecânica, a porosidade, o módulo de elasticidade e as características térmicas. Quanto às propriedades químicas, destacam-se os teores de impurezas ou de reatividade potencial (Ferreira, 2007).

As propriedades requeridas aos agregados para a utilização em betão encontram-se especificadas na norma NP EN 12620:2004 – “*Agregados para betão*”, que remete para normas específicas para a sua determinação.

Os agregados de origem natural podem ser classificados, de acordo com a rocha de origem, como ígneos, sedimentares e metamórficos.

Neste trabalho os agregados utilizados são ígneos, de origem granítica.

#### 3.2.2 Agregados grossos

Os agregados grossos ( $D \geq 4\text{mm}$ ) foram obtidos por britagem e extraídos de uma pedreira localizada no distrito de Viseu. Foram utilizadas duas britas com diferentes dimensões: brita fina ( $B_1$ ) e brita grossa ( $B_2$ ), ver Figura 3-1.



Figura 3-1: Britas utilizadas como agregados grossos

#### 3.2.3 Agregados finos

Para os agregados finos naturais, foram usados também dois tipos de areia britada: areia fina ( $A_1$ ) e areia grossa ( $A_2$ ), provenientes da mesma pedreira que os agregados grossos (Figura 3-2). A areia grossa tem como dimensão máxima 2 mm e a areia fina tem como dimensão máxima 1 mm. Nos betões com incorporação de resíduos, a areia fina foi sendo substituída em diferentes percentagens pelos resíduos escolhidos (cinzas de biomassa e lamas de cal).

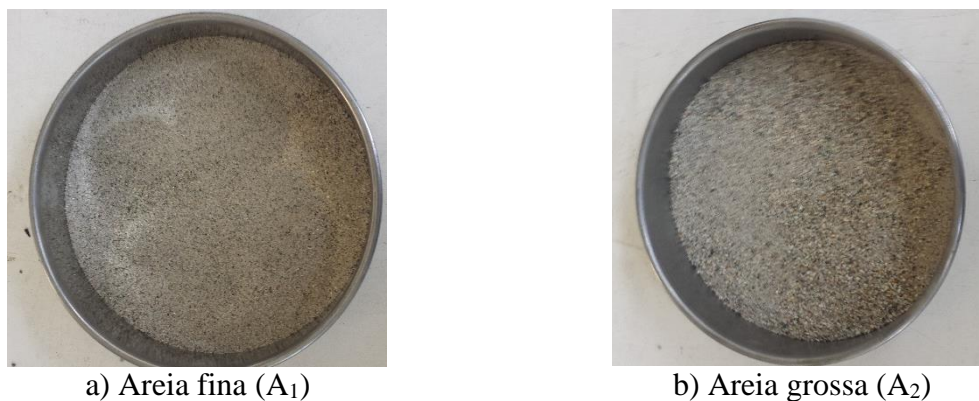


Figura 3-2: Areias utilizadas como agregados finos

### 3.3 Caracterização laboratorial dos agregados

#### 3.3.1 Introdução

Os agregados condicionam o desempenho do betão quer em termos de durabilidade, quer de resistência. Desta forma é fundamental avaliar as suas características geométricas e físicas.

A caracterização laboratorial inclui os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica;
- Índice de achatamento;
- Índice de forma;
- Desgaste de “Los Angeles”;
- Equivalente de areia;
- Baridade e índice de vazios.

#### 3.3.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica é fundamental para a caracterização e quantificação da quantidade de agregados a utilizar numa amassadura de betão. Deste modo, procedeu-se ao estudo da granulometria e posterior traçado das curvas granulométricas de todos os agregados.

O ensaio de análise granulométrica é aplicável a agregados de origem natural ou artificial, incluindo agregados leves (excluindo o filer) e rege-se pela norma EN 933-1:2000. Parte 1: “Análise granulométrica – Método de peneiração”.

No ensaio foram utilizados peneiros normalizados de malha metálica, quadrada e com as seguintes aberturas nominais: 0,063mm; 0,125mm; 0,250mm; 0,500mm; 1mm; 2mm; 4mm; 8mm; 16mm; 31,5mm; 63mm e 125mm (ISO 3310-1).

Calculou-se a massa retida em cada peneiro com a percentagem da massa original seca, através da seguinte equação:

$$\% \text{ de material retido no peneiro } i = \frac{R_i}{m_1} \times 100 \quad (3-1)$$

onde:

- $R_i$  – massa retida no peneiro  $i$  (g);
- $m_1$  – massa total da amostra seca (g).

A partir dos resultados da análise granulométrica é possível determinar o módulo de finura ( $f$ ) que dá uma ideia da dimensão média dos agregados, sendo que, quanto maior for este valor, maior é o agregado em causa.

$$f = \frac{\sum[\%retidos(> 0,063)]}{100} \quad (3-2)$$

onde:

- f – módulo de finura.

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 3-1.

Quadro 3-1: Equipamentos utilizados na análise granulométrica dos agregados

Equipamentos
Estufa ventilada à temperatura de $110 \pm 5$ °C Balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar Peneirador mecânico Peneiros de ensaio (ISO 3310-1)

Ao analisar os resultados verifica-se que a máxima dimensão dos agregados não ultrapassa os 20 mm. O Quadro 3-2 mostra os resultados do ensaio de granulometria dos 4 agregados.

Quadro 3-2: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem retida acumulada				Percentagem acumulados passados			
	Areia 1 (fina)	Areia 2 (grossa)	Brita 1 (fina)	Brita 2 (grossa)	Areia 1 (fina)	Areia 2 (grossa)	Brita 1 (fina)	Brita 2 (grossa)
31,5	0	0	0	0	100	100	100	100
20	0	0	0	0	100	100	100	100
16	0	0	0	15	100	100	100	85
8	0	0	0	79	100	100	100	21
4	0	0	0	96	100	100	100	4
2	0	27	44	100	100	73	56	0
1	2	51	91	100	98	49	9	0
0,5	18	67	100	100	82	33	0	0
0,25	45	80	100	100	55	20	0	0
0,125	70	89	100	100	30	11	0	0
0,063	90	96	100	100	10	4	0	0

O módulo de finura de cada agregado está expresso no Quadro 3-3 e as curvas granulométricas estão representadas na Figura 3-3.

Quadro 3-3: Módulo de finura dos agregados

Agregados	Módulo de finura (%)
A1	1,35
A2	3,14
B1	4,35
B2	6,90

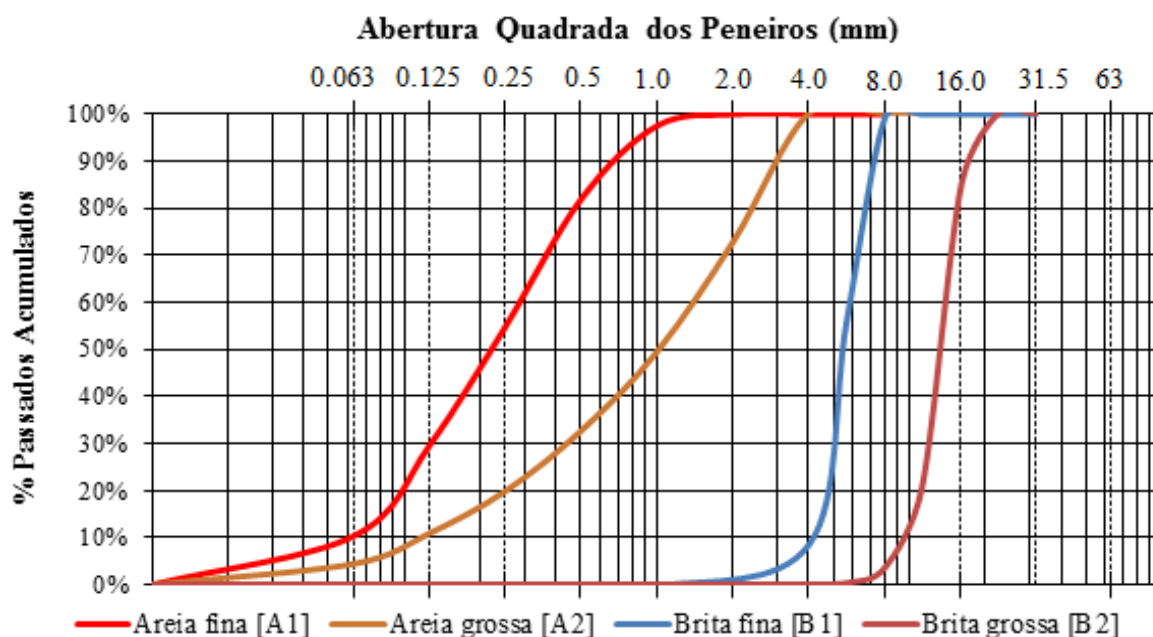


Figura 3-3: Curva granulométrica dos agregados

Observando as curvas granulométricas verifica-se que o conjunto dos agregados apresenta uma granulometria contínua, sendo, portanto, adequados para a produção de betões. Os resultados deste ensaio encontram-se pormenorizados no apêndice A.

### 3.3.3 Índice de achatamento

O índice de achatamento avalia a geometria dos agregados que compõem a mistura de betão, dando indicação do arranjo e disposição das partículas.

É de realçar que o ensaio para a determinação do índice de achatamento é aplicável apenas a partículas com dimensões compreendidas entre os 4 e 80 mm, pelo que foi realizado apenas para as britas.

O ensaio rege-se pela norma NP EN 933-3 – 2002 – “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento”.

O procedimento de ensaio é dividido em duas fases distintas de peneiração: a primeira prende-se pela separação da amostra em várias frações granulométricas  $d_i/D_i$ , e a segunda fase é utilizar a amostra separada anteriormente e peneirá-la novamente, mas utilizando peneiros de barras com ranhuras paralelas de largura  $D_i/2$ , como se ilustra na Figura 3-4.



Figura 3-4: Peneiros de barras

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 3-4.

Quadro 3-4: Equipamentos necessários ao ensaio de determinação do índice de achatamento dos agregados

Equipamentos
Peneiros de ensaio, de acordo com a EN 933-3
Peneiros de barras
Balança de precisão de $\pm 0,1\%$
Estufa ventilada

O índice geral de achatamento FI é calculado pela seguinte equação:

$$FI = \left( \frac{M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (3-3)$$

onde:

- $M_1$  – é a soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas  $d_i/D_i$ , (g);
- $M_2$  – é a soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas que passa no peneiro de barras correspondente, com ranhura de largura  $D_i/2$  (g).

Os resultados obtidos para o índice de achatamentos das duas britas encontram-se no Quadro 3-5, apresentando-se no Apêndice B o cálculo pormenorizado.

Quadro 3-5: Resultados do ensaio de índice de achatamento

<b>FI 1</b>	6,72
<b>FI 2</b>	6,66

A norma NP EN 12620:2004 – “Agregados para betão”, pela *cláusula 5.4 Resistência à fragmentação – Quadro 8*, atribui a estas britas a categoria FI<sub>15</sub>, visto que os valores do índice de achatamento são inferiores a 15.

### 3.3.4 Índice de forma

O principal objetivo do índice de forma é a caracterização da geometria das partículas que compõem as frações granulométricas compreendidas entre os 4 e 63 mm.

Este ensaio rege-se pela norma NP EN 933-4:2002 – “*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma.*”

O procedimento de ensaio inclui o registo da massa de cada fração granulométrica retida no correspondente peneiro  $i$  ( $M_{1i}$ ), relativamente à massa da amostra ensaiada ( $M_0$ ).

Com o auxílio de um paquímetro, mede-se a maior ( $L$ ) e a menor ( $E$ ) dimensão de cada partícula e separa-se aquela cuja relação dimensional verifique a condição  $L/E \geq 3$  (classificadas como não-cúbicas), como se ilustra na Figura 3-5. De seguida procede-se ao seguinte cálculo:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad (3-4)$$

onde:

- SI – índice de forma (%);
- $M_{1i}$  – soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas (g);
- $M_{2i}$  – soma das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas (g).



a) Paquímetro



b) Medição dos agregados

Figura 3-5: Realização do ensaio de índice de forma

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 3-6.

Quadro 3-6: Equipamentos necessários ao ensaio de determinação do índice de forma

Equipamentos
Peneiros de ensaio, de acordo com a EN 933-2 Peneiros de barras Balança de precisão de $\pm 0,1\%$ Estufa ventilada Paquímetro (Figura 3-5)

O Quadro 3-7 mostra os resultados do ensaio, verificando-se que o índice de forma é um pouco diferente entre as duas britas.

Quadro 3-7: Índices de forma das duas britas

	B1	B2
<b>M2i (g)</b>	25,94	157,07
<b>M1i (g)</b>	6,08	123,30
<b>SI</b>	<b>23,44</b>	<b>78,50</b>

A norma NP EN 12620:2004 – “Agregados para betão”, pela *cláusula 5.4 Resistência à fragmentação – Quadro 9*, atribui a categoria SI<sub>40</sub> e SI<sub>Declarado</sub>, para a brita fina e grossa respetivamente.

### 3.3.5 Desgaste de “Los Angeles”

O ensaio de desgaste de “Los Angeles” tem como objetivo a quantificação de perda de massa de um determinado agregado grosso, após um processo de desgaste. Deste modo, este ensaio permite avaliar a capacidade resistente dos agregados à abrasão e fragmentação devido a forças de impacto.

Este ensaio segue a norma NP EN 1097-2:2002 - “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*”.

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 3-8.

Quadro 3-8: Equipamentos necessários para a realização do ensaio de "Los Angeles"

Equipamentos
Máquina de Los Angeles Esferas de aço de 6 a 12 mm de diâmetro: carga abrasiva Estufa ventilada Balança de precisão de $\pm 0,1\%$

Na Figura 3-6 pode observar-se o equipamento utilizado no ensaio.



a) Máquina de ensaio de “Los Angeles”



b) Esferas de aço abrasivas

Figura 3-6: Ensaio de “Los Angeles”

A determinação da perda de material por desgaste na máquina de “Los Angeles” tem por base a seguinte expressão:

$$LA = \frac{m_1 - m_2}{50} \quad (3-5)$$

onde:

- LA – percentagem de material resultante do desgaste (%);
- $m_1$  – massa do provete inicial de ensaio (g);
- $m_2$  – massa do provete final retido no peneiro de 1,68 mm (g).

No Quadro 3-9 apresentam-se os resultados do ensaio de desgaste de “Los Angeles” e na Figura 3-7 mostra-se o estado dos agregados no final do ensaio.

Quadro 3-9: Resultados do ensaio de desgaste de "Los Angeles"

Brita	$M_1$ - (g)	$M_2$ - (g)	LA
B2	5002,4	2911,5	41,80



Figura 3-7: Agregados depois do processo abrasivo

O ensaio de desgaste de “Los Angeles” deve ser um ensaio de referência para a determinação da resistência à fragmentação. A norma NP EN 12620:2004 – “Agregados para betão”, pela cláusula 5.2 Resistência à fragmentação – Quadro 12 classifica este agregado como categoria LA<sub>50</sub>.

#### 3.3.6 Equivalente de areia

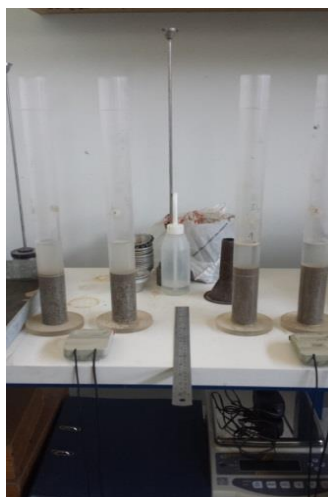
O ensaio de equivalente de areia tem como principal objetivo a identificação de finos plásticos nos agregados mais pequenos. Este ensaio foi realizado nas duas areias em estudo.

O ensaio de equivalente de areia segue a norma NP EN 933-8:2002: “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio de Equivalente de areia”.

A Figura 3-8 ilustra os principais procedimentos de execução do ensaio.



a) Enchimento da proveta graduada com areia e uma pequena quantidade de solução flocculante



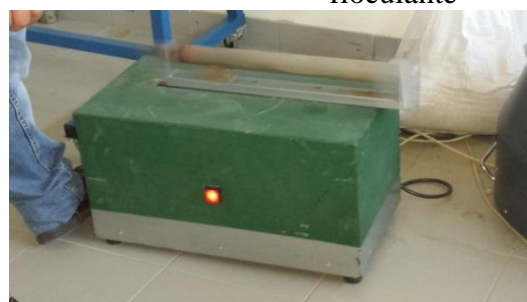
b) Aguardando 10 minutos para repousar a solução



c) Irrigação das paredes internas das provetas com mais solução flocculante



d) Repartidor de amostras



e) Agitação mecânica da proveta de ensaio

Figura 3-8: Realização do ensaio de equivalente de areia

Os equipamentos utilizados estão indicados do Quadro 3-10.

Quadro 3-10: Equipamentos utilizados no ensaio de equivalente de areia

Equipamentos
Duas provetas cilíndricas graduadas, Espessura das paredes: 3mm, diâmetro interior: $32 \pm 0,5$ mm, altura: $43 \pm 0,25$ mm
Duas rolhas de borracha
Conjunto de mergulhador de ensaio (varão, ponta, anel, cabeça fixa)
Cronómetro
Régua
Peneiros
Funil
Máquina agitadora mecânica

O equivalente de areia é determinado pela seguinte equação:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3-6)$$

As alturas  $h_1$  e  $h_2$  estão esquematizadas na Figura 3-9.

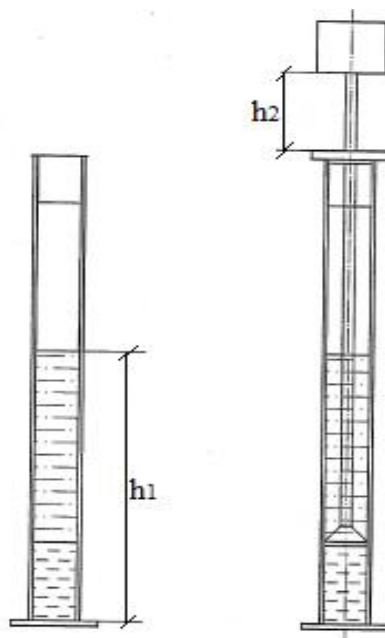


Figura 3-9: Altura  $h_1$  e  $h_2$  segundo a norma NP EN 933-8:2002

Verifica-se que a percentagem de equivalente de areia é de 70% e 75%, para a areia fina e areia grossa, respetivamente, conforme especificado no Quadro 3-11.

Quadro 3-11: Valores do ensaio de Equivalente de Areia

	Tubo de ensaio	h1 (mm)	h2 (mm)	EA (%)	EA (%) (média)	Verificação (h1 - h2 < 4%)
Areia A1 (Fina)	1	124	89	71,8	70,2	3,3 - OK
	2	124	85	68,5		
Areia A2 (Grossa)	1	113	86	76,1	75,2	1,8 - OK
	2	113	84	74,3		

Geralmente os materiais não plásticos apresentam EA > 30 e o material plástico é caracterizado por possuir EA < 20, sendo nesse caso necessário recorrer a outros ensaios como a determinação do valor de azul metileno.

### 3.3.7 Massa volúmica

A determinação da massa volúmica dos agregados segue as especificações da norma NP EN 1097-6:2003 – “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.”

Por questões logísticas, realizou-se este ensaio apenas para as duas areias, de acordo com o indicado na cláusula 9: Método do picnométrico para partículas de agregado de dimensão entre 0,063mm e 4mm.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de determinação da massa volúmica, encontram-se indicados no Quadro 3-12.

Quadro 3-12: Equipamentos utilizados no ensaio da determinação de massa volúmica

Equipamentos
Tabuleiro de pouca profundidade
Balança de precisão de ± 0,1%
Picnómetro
Cone metálico troncocónico
Pilão metálico
Funil
Pá
Estufa ventilada

A massa volúmica das partículas é calculada a partir da razão entre a massa e o volume. A massa é definida pela pesagem do provete com as partículas saturadas com superfície seca e a partir da massa da água deslocada, pela redução de massa no picnómetro.

- Massa volúmica do material impermeável das partículas:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3-9)$$

- Massa volúmica das partículas secas em estufa:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3-10)$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3-11)$$

onde:

- $M_1$  – massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, (g);
- $M_2$  – massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, (g);
- $M_3$  – massa do picnómetro apenas cheio de água, (g);
- $M_4$  – massa do ar do provete seco em estufa, (g).

Na Figura 3-10 é possível observar a execução do ensaio.



a) Pícnômetros utilizados no ensaio, 250ml e 1litro



b) Amostra de areia imersa em água



c) Enchimento de água do picnómetro à marca do funil



d) Molde troncocónico para verificação da massa saturada com superfície seca



Figura 3-10: Determinação da massa volúmica

No Quadro 3-13 apresentam-se os resultados obtidos para a massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\rho_{rd}$ ). Os resultados e o procedimento de cálculo detalhado estão apresentados no Apêndice C.

Quadro 3-13: Massa volúmica das partículas secas em estufa das duas areias

	Areia Fina	Areia Grossa
<b>m1 (g)</b>	255,23	266,03
<b>m2 (g)</b>	703,78	1427,85
<b>m3 (g)</b>	617,1	1324,35
<b>m4 (g)</b>	253,6	259,71
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,51</b>	<b>1,60</b>

### 3.3.8 Baridade e percentagem de vazios

O ensaio de determinação da baridade permite estabelecer a relação entre a massa e o volume aparente ocupado por um conjunto de agregados. Esta propriedade depende de diversos fatores como a massa volúmica das partículas, do grau de compactação, da curva granulométrica e da forma dos agregados.

A partir deste ensaio é ainda possível determinar o índice de vazios, ou seja, a percentagem de vazios num determinado volume de agregados.

O ensaio de baridade rege-se pela norma NP EN 1097 – 3:2002: “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*”.

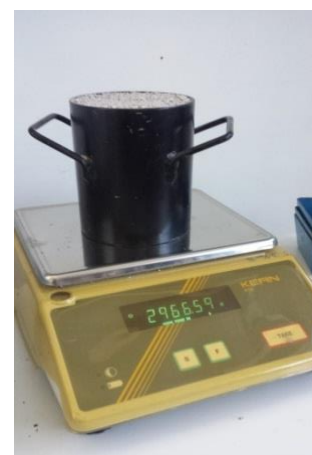
Tem como princípio o enchimento de um recipiente de volume conhecido, com agregado e posterior pesagem (Figura 3-11).



a) Enchimento do recipiente com amostra de areia



b) Nivelamento do recipiente com uma régua



c) Pesagem do recipiente cheio de areia

Figura 3-11: Realização do ensaio de determinação de baridade

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de determinação de baridade encontram-se indicados no Quadro 3-14:

Quadro 3-14: Equipamentos utilizados no ensaio de determinação de baridade

Equipamentos
Recipiente cilíndrico metálico com capacidade de aproximadamente 5 e 10 litros
Balança de precisão de $\pm 0,1\%$
Régua de nivelção
Pá
Estufa ventilada

A baridade ( $\rho_b$ ) é obtida por aplicação da seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3-7)$$

onde:

- $\rho_b$  - baridade do material i ( $\text{kg/m}^3$ );
- $m_1$  - massa do recipiente com a amostra (kg);
- $m_2$  - massa do recipiente vazio (kg);
- $V$  - volume do recipiente, previamente conhecido ( $\text{m}^3$ ).

A percentagem de vazios é a porção volumétrica de vazios no recipiente, sendo necessário saber-se à priori a massa volúmica real do agregado seco em estufa ( $\rho_{rd}$ ). É calculada segundo a seguinte equação:

$$g = \frac{(\rho_{rd} - \rho_b)}{\rho_{rd}} \times 100 \quad (3-8)$$

Onde:

- $v$  - percentagem de vazios (%);
- $\rho_{rd}$  - massa volúmica dos agregados secos em estufa ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\rho_b$  - média da massa volúmica aparente de três provetes do agregado ( $\text{kg/m}^3$ ).

Os valores obtidos para a baridade das areias estão indicados no Quadro 3-15 e para o índice de vazios no Quadro 3-16, sendo que os cálculos detalhados constam no Apêndice D.

Quadro 3-15: Resultados da baridade das duas areias

	Baridade - $\rho_b$ - ( $\text{Kg/m}^3$ )
Areia A1 (Fina)	1286,5
Areia A2 (Grossa)	1469,4

Quadro 3-16: Percentagem de vazios das duas areias

	Percentagem de vazios - $g$ - (%)
Areia A1 (Fina)	14,5
Areia A2 (Grossa)	8,0

### 3.4 Água

A água tem um papel muito importante no betão fresco e no betão endurecido. No betão fresco a água concede à amassadura uma trabalhabilidade que permite uma melhor colocação e compactação. Quando o betão já se encontra endurecido, a água participa nas reações de hidratação do cimento que atribuem a resistência necessária ao betão (Costa e Appleton, 2002).

A água utilizada nesta campanha experimental foi a da rede pública. A quantidade de água empregue nas diversas amassaduras foi a mesma.

A NP EN 1008:2003 define as especificações da água para amassaduras de betão.

### 3.5 Cimento

O cimento (ligante hidráulico) é um material inorgânico e finamente moído. Quando se mistura com a água, produz uma pasta que vai criando presa até endurecer por completo, graças às suas reações e processos de hidratação. Depois de endurecido, mantém a resistência e estabilidade, mesmo submerso em água. (Costa e Appleton, 2002).

O cimento é conseguido pela cozedura (temperaturas  $\pm 1450^{\circ}\text{C}$ ), de uma mistura calcário e argila, em quantidades devidamente proporcionais (Costa e Appleton, 2002).

O cimento utilizado neste trabalho foi do tipo CEM II/B - L 32,5N (Figura 3-12), seguindo as especificações da NP EN 197-1:2012. “*Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*”.



Figura 3-12: Saco de cimento utilizado nas amassaduras

De acordo com o especificado na norma, os constituintes da composição deste cimento devem obedecer aos seguintes requisitos:

$$65\% \leq \text{Clínquer} \leq 79\%$$

$$21\% \leq \text{Calcário} \leq 35\%$$

As propriedades exigidas a este tipo de cimento são as seguintes:

- Propriedades químicas:

$$\text{Sulfatos (SO}_3) \leq 3,5\%$$

$$\text{Cloretos (Cl)} \leq 0,10\%$$

- Propriedades físicas:

$$\text{Início de presa (min)} \geq 75$$

$$\text{Expansibilidade (mm)} \leq 10$$

- Propriedades mecânicas:

Resistência à compressão (valores mínimos):

Aos 7 dias: 16,00 MPa

Aos 28 dias: 32,5 MPa

## 3.6 Resíduos

### 3.6.1 Introdução

Os desperdícios industriais, denominados de resíduos, contribuem significativamente para a degradação do meio ambiente e dos ecossistemas. Deste modo, o reaproveitamento dos resíduos de uma forma sustentável assume uma grande importância.

Os resíduos utilizados nesta campanha experimental são subprodutos industriais, disponibilizados por empresas da região centro. A escolha recaiu em cinzas de biomassa e lamas de papelaria.

Salienta-se que as lamas de papelaria são designadas por lamas de cal no decorrer deste trabalho, devido ao processo produtivo que as origina.

### 3.6.2 Lamas de cal

Entende-se como lama de cal um resíduo que provém do processo de industrialização do papel e celulose. Caracteriza-se por ser um sólido granular, de cor cinza clara, homogêneo e sem odor específico (Figura 3-13).



Figura 3-13: Lamas de cal utilizadas nas amassaduras de betão

A indústria do papel produz quantidades consideráveis de desperdícios que têm vindo a depositar-se em aterros, por ser a opção mais simples e económica, contudo não a mais amiga do ambiente. Esta prática leva à criação de lixiviados tóxicos e, conseqüentemente, à não aprovação pública. A preocupação com o meio ambiente e sua preservação só há algumas décadas começou a ser assunto de discussão. Deste modo, é importante a reciclagem deste resíduo e a sua utilização na construção civil poderá vir a ser uma solução interessante (Dounya, Mansouria & Fokamb, 2013).

Ahmadi & Alkhaja (2001) no Bahrain, realizaram um estudo que consistia na substituição de agregados pétreos, no betão por lamas de cal.

O betão preparado com lamas de cal foi então comparado com um betão de referência. Os resultados obtidos mostraram que a presença das lamas de cal no betão, reduziu a densidade, que o valor de capacidade de absorção de água é proporcional à quantidade de resíduo presente no betão e que a resistência à compressão é inversamente proporcional à quantidade de lamas presentes na mistura (Elouazzani, 2005).

A composição química típica das lamas de cal provenientes da produção de papel é a indicada no Quadro 3-17 (Tran, 2008).

Quadro 3-17: Composição química das lamas de cal

	Média [%]	Intervalo [%]
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	95,00	92-97
<b>MgO</b>	1,04	0,4-1,6
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,50	0,1-0,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,14	0,05-0,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,05	0,01-0,4
<b>P<sub>2</sub>O<sub>6</sub></b>	0,86	0,2-1,4
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,14	0,5-1,6
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,09	0,04-0,12
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,91	0,3-2,5

#### 3.6.3 Cinzas de biomassa

O conceito de biomassa está diretamente relacionado com material orgânico. A biomassa pode ser composta por matérias de origem animal ou vegetal, como restos de alimentos, esterco, desperdícios florestais e agrícola, entre outras matérias orgânicas.

As cinzas de biomassa (Figura 3-14) são constituídas por material muito diversificado dependendo do tipo de material original, do solo e da colheita. Maioritariamente os elementos presentes nas cinzas de combustíveis são cálcio (Ca), potássio (K), sódio (Na), silício (Si) e fósforo (P). Alguns combustíveis de biomassa, como casca de arroz, possuem elevado teor de silício, já outros como a madeira, elevado teor de metal alcalino. (Marques, 2014, citando Garcia 2013).



Figura 3-14: Cinzas de biomassa utilizadas nas amassaduras de betão

O uso das cinzas como adição mineral pode ajudar a melhorar as propriedades de betões ou argamassas. Algumas cinzas de biomassa, como a cinza de casca de arroz e a cinza de bagaço de cana, por apresentarem alto teor de sílica, já são bastantes utilizadas como adição em betão. A sílica, por sua vez, confere uma alta reatividade e melhorias nas propriedades físicas e mecânicas do betão (Aguiar et al. 2014).

As cinzas utilizadas nesta campanha experimental são originárias de uma central termoelétrica situada no distrito de Viseu, sendo provenientes de aproveitamento energético de resíduos florestais. Deste modo são denominadas como cinzas de biomassa florestal.

A biomassa florestal é constituída por matéria vegetal resultante da silvicultura, de desperdícios da atividade florestal, como desbastes e desrama, de gestão de combustíveis e da exploração da floresta, como ramos, bichadas, cepos, folhas, raízes e cascas (Marques, 2014).

#### 3.6.4 Caracterização dos resíduos

Uma das propriedades mais relevante dos resíduos para este trabalho é, obviamente, a sua granulometria. Refira-se que antes de serem adicionados às misturas, todos os resíduos foram passados pelo peneiro 2mm de abertura, limitando assim a sua maior dimensão, com o intuito de aproximar ao máximo a sua granulometria à da areia fina, como demonstrado na Figura 3-15.

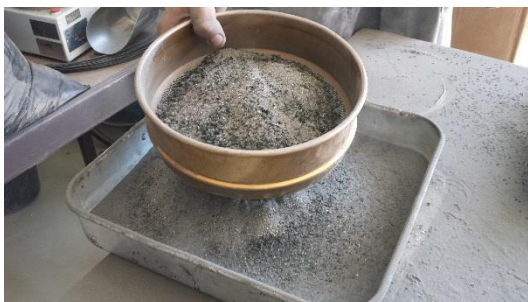


Figura 3-15: Peneiração dos resíduos

O Quadro 3-18 sintetiza os resultados da análise granulométrica efetuada aos dois resíduos, sendo que os resultados pormenorizados constam no Apêndice E.

Quadro 3-18: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem retida acumulada		Percentagem passados acumulados	
	Cinzas de biomassa	Lamas de cal	Cinzas de biomassa	Lamas de cal
31,5	0,0	0,0	100,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0	100,0
8	0,0	0,0	100,0	100,0
4	0,0	0,0	100,0	100,0
2	0,0	9,2	100,0	90,8
1	17,3	13,5	82,7	86,5
0,5	41,0	16,6	59,0	83,4
0,25	61,5	19,1	38,5	80,9
0,125	76,5	21,5	23,5	78,5
0,063	89,2	34,0	10,8	66,0
Resto	100,0	100,0	0,0	0,0

A Figura 3-16 apresenta as respetivas curvas granulométricas, juntamente com a curva relativa à areia fina que se pretende substituir.

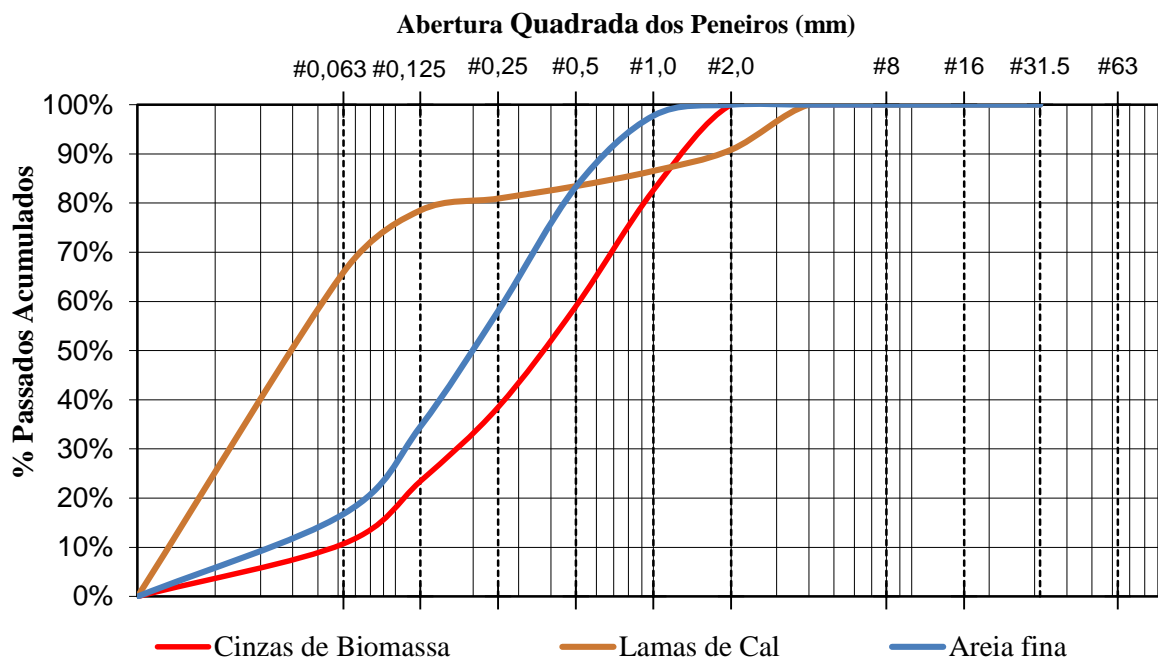


Figura 3-16: Curva granulométrica das lamas de cal, cinzas de biomassa e areia fina

Nota-se que a curva que se aproxima mais da curva granulométrica da areia fina pertence às cinzas de biomassa. As lamas de cal apresentam uma granulometria mais fina, com uma percentagem muito significativa de material com dimensão inferior a 0,063 mm.

Nesta campanha experimental não foi realizado qualquer ensaio para a caracterização química do cimento ou dos resíduos. Contudo apresentam-se os valores obtidos por Marques, (2014), uma vez que os materiais utilizados foram os mesmos. Nesse trabalho os resíduos foram incorporados em argamassas como substitutos parciais do ligante, tendo sido efetuados ensaios de lixiviação para a sua caracterização. Apresentam-se no Quadro 3-19 os valores obtidos nesses ensaios.

Quadro 3-19: Parâmetros de lixiviação dos resíduos e cimento (Brás et al, 2016)

Parâmetros	Cinzas de Biomassa	Lamas de Cal	Cimento
pH [-]	11,60	10,50	12,60
Condutividade [ $m_s/cm$ ]	1,19	3,02	2,50
Teor de humidade [%]	0,03	33,70	0,41
Teor de matéria orgânica [%]	0,27	0,83	0,00
Cinzas [%]	99,70	99,20	-
Concentração de crómio [ $mg_{Cr}/kg_{resíduo}$ ]	0,51	0,64	-

### 3.7 Metodologia e composição dos betões

Pretende-se com este trabalho estudar o comportamento físico-mecânico de betões com incorporação de resíduos (lamas de cal e cinzas de biomassa) como substitutos do agregado mais fino. Para tal, é necessário definir um betão de referência para comparação, sem qualquer substituição, seguindo-se a seleção dos betões com incorporação de resíduos. Foram consideradas taxas de substituição de 20, 50 e 100%.

Da aplicação desta metodologia resultou um total de 7 variantes de betão, descritas no Quadro 3-20, incluindo a designação abreviada que foi adotada para cada amassadura.

Quadro 3-20: Tipos de betões que se pretende produzir

Tipo	Descrição
Bt	Betão de referência, para comparação com as variantes com incorporação de resíduos
Cz20	Betão com substituição de 20% da areia fina por cinzas de biomassa
Lm20	Betão com substituição de finos em 20% de lamas de cal
Cz50	Betão com substituição de 50% da areia fina por cinzas de biomassa
Lm50	Betão com substituição de finos em 50% de lamas de cal
Cz100	Betão com substituição de 100% da areia fina por cinzas de biomassa
Lm100	Betão com substituição de finos em 100% de lamas de cal

A composição do betão de referência foi estudada procurando-se seguir as indicações da NP EN 206-1 (2007). Assim, o objetivo foi obter um betão.

Pretende-se criar um betão: **NPEN206-1: C30/37; XC 2(P); CI 0,40; Dmax22; S2**

O estudo da composição do betão seguiu o método das curvas de referência de Faury, tendo-se obtido a curva da mistura de agregados apresentada na Figura 3-17. Foi adotada uma razão A/C de 0,50.

### 3 - Caracterização dos Materiais

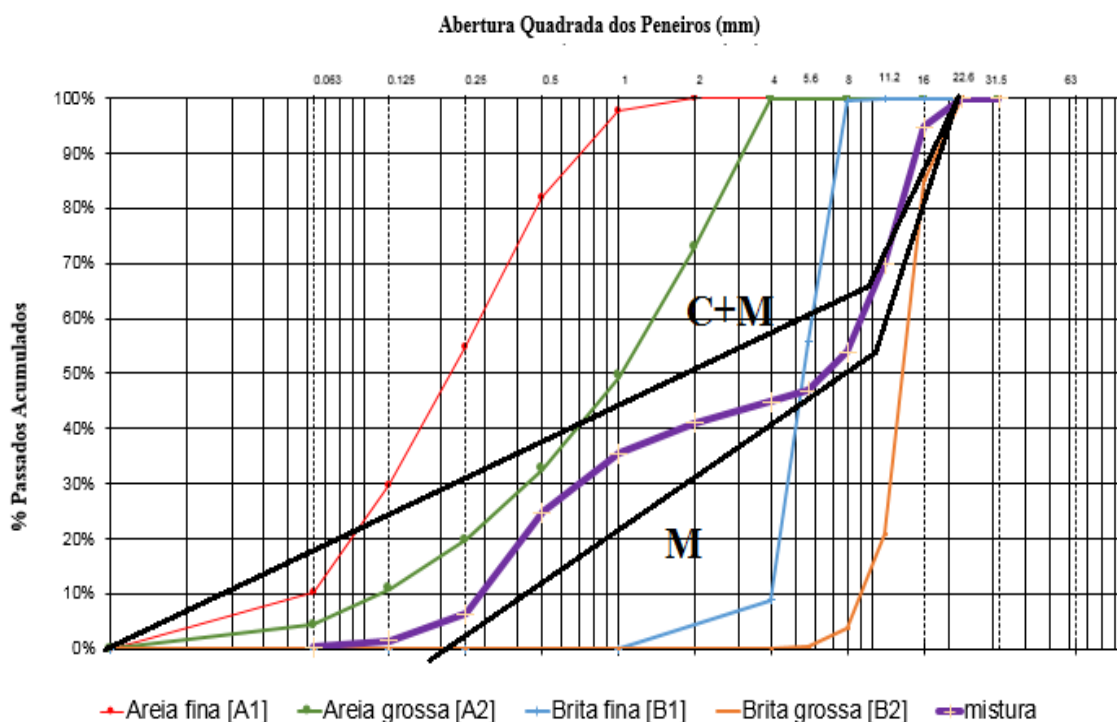


Figura 3-17: Curva ótima da mistura e curvas de Faury (C e C+M)

O Quadro 3-21 apresenta uma síntese das composições (para 1 m<sup>3</sup>) dos vários betões.

Quadro 3-21: Composição dos betões para 1m<sup>3</sup>

Constituintes	Bt	Cz20	Lm20	Cz50	Lm50	Cz100	Lm100
Cimento [kg]	430	430	430	430	430	430	430
Areia 1 [kg]	200	160	160	100	100	0	0
Areia 2[kg]	400	400	400	400	400	400	400
Brita 1 [kg]	334	334	334	334	334	334	334
Brita 2 [kg]	734	734	734	734	734	734	734
Água [l]	215	215	215	215	215	215	215
Cinzas de Biomassa [kg]	-	40	-	100	-	200	-
Lamas de cal [kg]	-	-	40	-	100	-	200

### **3.8 Síntese do capítulo**

Este capítulo incidiu na caracterização de todos os materiais utilizados no fabrico do betão, incluindo os resíduos que se pretendem incorporar.

Os agregados e os resíduos foram alvo de ensaios laboratoriais para um melhor conhecimento das suas características, que podem ajudar na avaliação futura do desempenho do betão. Estes ensaios possibilitaram verificar que todos os agregados estão dentro dos parâmetros exigidos para o fabrico de betão e os resíduos possuem uma granulometria idêntica à da areia fina, principalmente as cinzas de biomassa.

Posteriormente apresentou-se a metodologia e detalhou-se a composição adotada para os 7 betões que serão estudados.



## **4. Campanha Experimental**

### **4.1 Introdução**

Como mencionado anteriormente, a presente dissertação tem como objetivo contribuir para a avaliação da viabilidade de utilização de resíduos industriais (lamas de cal e cinzas de biomassa) na composição de betões. Para esse efeito, caracterizaram-se os materiais e realizou-se uma campanha experimental englobando ensaios em betão fresco e em betão endurecido.

A concretização da campanha experimental requereu a necessidade de planear todo o trabalho experimental, de forma a garantir maior rendimento de tempo e a simplificar todo o processo.

Os ensaios de betão fresco servem para controlar a qualidade de produção e aplicação do betão. Os ensaios de betão fresco realizados nesta campanha experimental foram os seguintes: abaixamento, massa volúmica e teor de ar. Optou-se pela realização dos ensaios de abaixamento e determinação da massa volúmica, por serem os ensaios mais comuns e por nos darem informações de propriedades como a consistência e a trabalhabilidade do betão. Um complemento a estes dois ensaios passa pela realização do ensaio de determinação de teor de ar no betão fresco, que é um requisito muito importante na verificação da existência de vazios preenchidos por ar no interior do betão.

Os ensaios de betão em estado endurecido visam caracterizar o comportamento e as propriedades físicas e mecânicas do material. Existem diversos tipos de ensaios que se podem realizar, em termos mecânicos, físicos e reológicos. Contudo, condicionantes como o tempo disponível, requisitos laboratoriais e ainda por este ser um estudo preliminar, foram apenas realizados os seguintes ensaios: massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

Por fim, realizaram-se ensaios químicos, a fim de prever as implicações que a aplicação destes resíduos poderá ter para o ambiente. Procedeu-se à realização do ensaio de lixiviação para a obtenção de parâmetros como: concentração de sulfatos e cloretos, pH, condutividade e teor de humidade.

Neste capítulo é feita a descrição da campanha experimental definida para este estudo e são expostos os ensaios realizados, nomeadamente, em betão fresco, em betão endurecido e os ensaios químicos. Para uma melhor compreensão e análise dos resultados são apresentados os principais aspetos relacionados com a execução dos diversos ensaios.

### 4.2 Preparação da campanha experimental

Esta campanha experimental tem como base o estudo comportamental de betões com a incorporação de resíduos industriais, em percentagens de 20, 50 e 100%. Para tal, foi necessário produzir um betão (Bt) sem qualquer adição de resíduos, que foi usado como betão de referência para se poder fazer uma análise comparativa dos resultados experimentais.

Nesta campanha experimental optou-se por utilizar provetes cúbicos e cilíndricos, produzidos em moldes que estão em conformidade com a NP EN 12390-1:2012 – “*Ensaio do betão endurecido Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*”, (Figura 4-1), tendo sido previamente limpos e lubrificados com óleo descofrante. Por sua vez, foram moldados e curados segundo a NP EN 12390-2:2009 – “*Ensaio do betão endurecido Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*”.



a) Moldes cilíndricos



b) Moldes cúbicos

Figura 4-1: Moldes utilizados

Para cada tipo de betão foi necessário fazer-se uma amassadura, no total de sete amassaduras e para cada uma delas foram produzidos 12 provetes cúbicos e 6 cilíndricos. Assim sendo, foram produzidos no total: 84 cubos e 42 cilindros. No Quadro 4-1 estão descritos, de uma forma sucinta, os ensaios realizados, o tipo e quantidade de provetes utilizados para cada tipo de betão produzido.

Quadro 4-1: Síntese dos ensaios realizados e provetes utilizados

	Estado do betão	Ensaio	Tipo de provete	nº-de provetes
	<b>Betões</b>	fresco	Abaixamento	-
Determinação da massa volúmica				
Teor de ar - método pressiométrico				
endurecido		Ensaio à compressão	cubos (150x150mm <sup>2</sup> )	6
			cilindro (300x150mm <sup>2</sup> )	3
		Ensaio de determinação da absorção de água por imersão	cubos (150x150mm <sup>2</sup> )	3
		Ensaio de determinação da absorção por capilaridade	cubos (150x150mm <sup>2</sup> )	3
		Ensaio de massa volúmica		
		Ensaio à tração por compressão diametral	cilindro (300x150mm <sup>2</sup> )	3
químico		lixiviação	-	-

#### 4.2.1 Produção dos betões

Todo o processo de fabrico dos diversos betões foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. As amassaduras foram produzidas entre o dia 16 de julho e 5 de agosto de 2015.

As amassaduras foram realizadas com a ajuda de uma betoneira (Figura 4-2), com capacidade de 50 l, com a finalidade de se obter uma mistura mais homogénea possível e uma boa envolvimento dos agregados na pasta de cimento.

Todos os betões produzidos tiveram como objetivo a realização de diversos ensaios no estado fresco e no estado endurecido, como já referenciado. A quantidade de betão produzida foi então calculada de acordo com a necessidade de provetes para os ensaios definidos inicialmente.



Figura 4-2: Processo de amassadura

Todas as amassaduras foram realizadas em dias diferentes pela limitação da quantidade de moldes de provetes existentes em laboratório. As datas de todas as amassaduras encontram-se resumidas no Quadro 4-2:

Quadro 4-2: Data de realização de cada amassadura

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Data da Amassadura</b>
Bt	16 de julho
Cz20	20 de julho
Lm20	21 de julho
Cz50	23 de julho
Lm50	29 de julho
Cz100	31 de julho
Lm100	05 de agosto

De seguida, apresenta-se de forma mais pormenorizada a composição de cada amassadura (Quadro 4-3). Note-se que entre amassaduras o único constituinte que se altera é a quantidade de areia fina ( $A_1$ ) e a quantidade de resíduo (Cinzas de Biomassa e Lamas de Cal).

Quadro 4-3: Composição de cada amassadura

<b>Constituintes</b>	<b>Tipo de Betão</b>						
	Bt	Cz 20	Lm 20	Cz 50	Lm 50	Cz 100	Lm 100
Cimento [kg]	38,52	38,52	38,52	38,52	38,52	38,52	38,52
Areia A1 [kg]	17,95	14,36	14,36	8,97	8,97	0,00	0,00
Areia A2 [kg]	35,89	35,89	35,89	35,89	35,89	35,89	35,89
Brita B1 [kg]	29,91	29,91	29,91	29,91	29,91	29,91	29,91
Brita B2 [kg]	65,80	65,80	65,80	65,80	65,80	65,80	65,80
Água [l]	19,26	19,26	19,26	19,26	19,26	19,26	19,26
Cinzas de Biomassa [kg]	-	3,59	-	8,97	-	17,95	-
Lamas de Cal [kg]	-	-	3,59	-	8,97	-	17,95

### 4.2.2 Preparação dos provetes

O enchimento dos moldes foi efetuado em duas ou três camadas e compactado com o auxílio de um vibrador mecânico de ponta redonda. Depois de cheios foram aplicadas umas pancadas suaves com um martelo de borracha nas faces laterais, de modo a remover bolhas de ar e depressões criadas no ato de compactação. No final a face superior foi regularizada com uma espátula (Figura 4-3).



a) Enchimento dos moldes    b) Regularização das superfícies dos moldes

Figura 4-3: Conceção dos provetes

Depois de desmoldados ( $24 \pm 2$ h de idade), procedeu-se à identificação dos provetes com um marcador próprio e posteriormente foram mantidos dentro de um tanque de água à temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (Figura 4-4) até à data dos ensaios.



Figura 4-4: Provetes dentro do tanque de cura

### 4.3 Ensaio em betão fresco

Os ensaios em betão fresco visam avaliar algumas propriedades importantes para uma boa aplicação do betão em obra, tais como a consistência e a trabalhabilidade. É também comum a determinação da massa volúmica, sendo o teor de ar no betão fresco uma propriedade que poderá ajudar na interpretação de alguns resultados. Estes ensaios permitem atestar a fluidez adequada, sem separação dos diversos materiais constituintes e avaliar parâmetros que são premonitórios relativamente à qualidade desses mesmos betões após endurecimento (Yan, 2013).

Os ensaios em betão fresco foram realizados à data de cada amassadura de acordo com as normas referidas no Quadro 4-4:

Quadro 4-4: Ensaio em betão fresco

Ensaio	Norma
Abaixamento	NP EN 12350-2:2009
Determinação da Massa Volúmica	NP EN 12350-6:2009
Teor de Ar - Método Pressiométrico	NP EN 12350-7:2009

Em seguida, faz-se uma descrição dos ensaios realizados e do equipamento utilizado.

#### 4.3.1 Abaixamento

O ensaio de abaixamento do betão tem como principal objetivo a determinação da consistência do betão fresco em estudo, para se saber à priori a trabalhabilidade que iremos ter. Este ensaio é muito útil para detetar eventuais variações acidentais da composição do betão. É um ensaio muito usual em obra pela sua simplicidade de execução (Coutinho, 1997).

Este ensaio de abaixamento foi executado de acordo com a norma NP EN 12350-2:2009 - *“Ensaio do betão fresco. - Parte 2: Ensaio de abaixamento”*.

Durante a campanha experimental, este ensaio foi realizado em todas as amassaduras logo após a betonagem, sendo o primeiro ensaio de betão fresco a ser realizado.

Este ensaio consiste na medição do abaixamento do betão, em estado fresco, após ter sido compactado dentro de um molde troncocónico (cone de Abrams). Após a desmoldagem, mede-se o abaixamento, determinando a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do betão, como se observa na Figura 4-5b).

Para que o ensaio seja considerado válido, o betão deve permanecer substancialmente intacto e simétrico. Se tal não acontecer, o ensaio perde a validade e deve ser repetido imediatamente. Tal facto não se veio a verificar nos ensaios realizados nesta campanha experimental.



a) Enchimento do molde troncocónico      b) Medição do abaixamento do betão

Figura 4-5: Ensaio de abaixamento

Os valores de abaixamento,  $h$ , dão-nos a classe de abaixamento do betão em estudo, classificados de acordo com o Quadro 4-5.

Quadro 4-5: Classes de abaixamento do betão fresco

Classes de abaixamento	
Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	>220

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 4-6.

Quadro 4-6: Equipamentos utilizados no ensaio de abaixamento do betão fresco

Equipamentos
Recipiente do equipamento Vêvê Molde de metal troncocónico de Abrams com dimensões padrão Funil que permite a acoplação ao topo do molde troncocónico Régua metálica graduada de 300 mm Varão de compactação com extremidades arredondadas

### 4.3.2 Massa volúmica

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão fresco tem como principal objetivo medir o grau de compacidade obtido para diferentes meios e a medição da trabalhabilidade do betão em estado fresco, para prever parâmetros depois de endurecido (como a porosidade) (Coutinho, 1997).

Este ensaio foi realizado em conformidade com a norma NP EN 12350-6:2009 – “*Ensaaios do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica*”

Este ensaio consiste na determinação da massa de um recipiente, de volume (V) e massa ( $m_1$ ) conhecidos, cheio de betão fresco devidamente compactado, ( $m_2$ ). A Figura 4-6 exemplifica alguns passos do ensaio.



a) Pesagem do recipiente vazio com o vidro



b) Enchimento do recipiente com betão fresco

Figura 4-6: Ensaio de determinação da massa volúmica

A massa volúmica do betão no estado fresco é determinada através da seguinte expressão:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4-1)$$

sendo que:

- D – massa volúmica de betão fresco, em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $m_1$  – massa do recipiente vazio, em kg;
- $m_2$  – massa do recipiente completamente cheio de betão compactado, em kg;
- V – volume do recipiente, em  $\text{m}^3$ .

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 4-7.

Quadro 4-7: Equipamentos usados na determinação da massa volúmica do betão fresco

Equipamentos
Colher de pedreiro
Recipiente metálico de forma cilíndrica, com capacidade superior a 5L
Agulha vibratória (vibração mecânica)
Balança de precisão de 0,01kg

### 4.3.3 Teor de ar no betão – Método pressiométrico

O teor de ar no betão entende-se como o volume de ar contido numa determinada mistura. O volume de ar introduzido pode resultar de diferentes fatores, tais como a velocidade e o tempo de mistura, a quantidade da mistura, os tipos de adjuvantes empregues e da relação água/cimento adotada (Antunes, 2013).

O ensaio de determinação de teor de ar foi realizado segundo a norma NP EN 12350-7:2009 – “Ensaio do betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar – Métodos Pressiométricos”

Para aumentar o grau de rigor e minimizar potenciais fugas, é conveniente realizar-se previamente a calibração do sistema de medição de pressão (Figura 4-7).

Para tal, encheu-se o recipiente com água e injetou-se ar para dentro do recipiente, através de bombeamento pela válvula principal (Figura 4-7b). Seguidamente, abriu-se uma das válvulas secundárias, tendo-se deslocado alguma quantidade de água do recipiente para o cilindro de calibração, até uma marcação pré-definida sobre ele.



a) Posicionamento do ponteiro do manómetro para o teor de ar correto



b) Injeção de ar para dentro do recipiente

Figura 4-7: Calibração do aparelho de medição do teor de ar

Determinou-se, por pesagem, a massa de água deslocada,  $m_3$ , e a massa do recipiente vazio (adicionando a massa do vidro utilizado na regularização da superfície do recipiente),  $m_2$ . O teor de ar indicado pelo manómetro corresponde à percentagem de ar existente no recipiente,  $A_1$ , determinada do seguinte modo:

$$A_1 = \frac{m_3}{m_2} \times 100\% \quad (4-2)$$

O ponteiro do manómetro foi em seguida ajustado para o teor de ar correto (Figura 4-7a), tendo-se repetido o ensaio até que a leitura no manómetro correspondesse ao teor de ar de 0,1%.

O ensaio de determinação do teor de ar foi feito logo após o ensaio da massa volúmica. Teve-se em atenção para que a superfície do recipiente estivesse lisa e os bordos do recipiente limpos de eventuais porções de betão. Posicionou-se a campânula sobre o recipiente com betão e fechou-se com as cavilhas de segurança. Com as válvulas laterais abertas injetou-se água aos poucos com a ajuda de uma pêra de sucção, até esta sair na válvula oposta, de forma a selar hidricamente o sistema (Figura 4-8). Nesse instante as duas válvulas foram fechadas em simultâneo e aumentou-se a pressão dentro do recipiente pelo bombeamento da válvula principal. Estabilizou-se o manómetro à pressão zero e pressionou-se a válvula de descompressão registando o valor da percentagem de ar que o aparelho indica. Para cada amassadura procedeu-se à média de três leituras consecutivas.



Figura 4-8: Ensaio da determinação do teor de ar no betão fresco

O teor de ar no betão fresco é calculado através da seguinte expressão:

$$A_c = A_1 - G \quad (4-3)$$

onde:

- $A_c$  - teor de ar do betão (%);
- $A_1$  – percentagem de ar indicado no manómetro (%);
- $G$  – fator de correção dos agregados.

O fator de correção dos agregados ( $G$ ) é determinado fazendo o mesmo ensaio, mas aos agregados constituintes das amassaduras, não estando diretamente relacionado com a absorção de água das partículas. Deste modo, a calibração realiza-se de forma idêntica à determinação do teor de ar no betão, mas neste caso, fazendo o ensaio apenas para os agregados constituintes do betão, em quantidade proporcional (Figura 4-9). Este processo é repetido quatro vezes e em cada um deles regista-se o valor de  $h$  ( $h_1, h_2, h_3, h_4$ ), sendo este o valor observado no manómetro quando se pressiona a válvula principal. Considera-se o valor médio de ( $h_1-h_2$ ) e ( $h_3-h_4$ ), como sendo o fator de correção dos agregados,  $G$ . Estes não podem diferir entre si mais do que 0,1% do teor de ar.



Figura 4-9: Ensaio de determinação do teor de ar dos agregados ( $G$ )

Constam no Quadro 4-8 os equipamentos necessários para a realização deste ensaio.

Quadro 4-8: Equipamento utilizado no ensaio de determinação do teor de ar no betão fresco

<b>Equipamentos</b>
Dispositivo de medição de pressão (manómetro; bomba de ar; conjunto da tampa -campânula)
Recipiente metálico de forma cilíndrica, com capacidade superior a 5L
Agulha vibratória (vibração mecânica)
Colher de pedreiro

## 4.4 Ensaios em betão endurecido

Os ensaios realizados em betão endurecido permitem caracterizar quantitativamente alguns dos principais parâmetros necessários ao estabelecimento das leis constitutivas do material e avaliar o seu desempenho ao longo do tempo, quer sobre o efeito de ações mecânicas, quer de ações ambientais.

Os ensaios ao betão endurecido que foram realizados nesta campanha experimental estão mencionados no Quadro 4-9, bem como as normas utilizadas, quantidade de provetes ensaiados e a idade do betão aquando do ensaio.

Quadro 4-9: Síntese dos ensaios em betão endurecido

Ensaio	Norma	Idade do betão	N.º de provetes
Resistência à Compressão	NP EN 12390-3:2009	7 dias	3 cubos
		28 dias	3cubos + 3cilindros
Massa Volúmica	NP EN 12390-7:2009	18 dias	3cubos
Absorção de Água por Capilaridade	Especificação LNEC - E393:1993	56 dias	3cubos
Absorção de Água por Imersão	Especificação LNEC - E394 - 1993	98 dias	3cubos
Resistência à Tração por Compressão	NP EN 12390-6:2003	28 dias	3cilindros

Como anteriormente, descrevem-se, em seguida, os ensaios realizados e o equipamento utilizado.

### 4.4.1 Massa volúmica

O ensaio de determinação da massa volúmica num betão endurecido possibilita uma análise da compactidade, da percentagem de vazios existentes no betão e, fundamentalmente, permite também quantificar o peso do material, dado importante para o cálculo de uma estrutura (Coutinho, 1997).

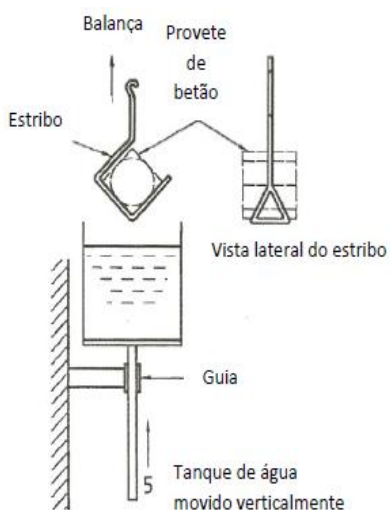
Este ensaio rege-se pela norma NP EN 12390-7:2009 – “*Ensaio de betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido*”.

De acordo com a presente norma, “*os provetes de betão conservados em água pelo menos 72 h antes do ensaio, poderão considerar-se saturados a massa constante*”. No presente estudo, os provetes ensaiados foram retirados do tanque de armazenamento ao fim de 18 dias, em provetes cúbicos, respeitando o volume mínimo previsto na norma. A amostra foi constituída por três provetes, para cada tipo de betão.

A massa volúmica foi determinada para três massas diferentes dos provetes: massa do provete saturado, massa do provete seco em estufa (Figura 4-10) e massa hidrostática do provete (Figura 4-11).



Figura 4-10: Provetes em estufa ventilada ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ )



a) Disposição típica do estribo para determinação do volume dos provetes através da deslocação de água [Costa,2011]



b) Exemplo de pesagem de um provete

Figura 4-11: Pesagem hidrostática do provete ( $m_{hid}$ )

De acordo com a norma, os provetes que permanecerem mais de 72h no tanque de cura podem ser considerados saturados. Neste estudo a permanência dos provetes foi superior às 72h. A massa do provete saturado foi obtida por pesagem dos provetes logo após a sua remoção do tanque de cura ( $m_x$ ).

De seguida calculou-se a massa dos provetes dentro de água ( $m_{hid}$ ), utilizando uma balança hidrostática. Esta pesagem não consta na norma, mas foi inserida no ensaio. Posteriormente, os provetes foram secos numa estufa ventilada ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) e calculou-se a massa dos provetes

secos em estufa ( $m_o$ ). Antes de cada pesagem, arrefeceu-se os provetes durante aproximadamente 15 minutos.

Calculou-se a massa volúmica utilizando os valores determinados da massa e do volume do provete usando a seguinte equação:

$$D = \frac{m}{V} \quad (4-4)$$

onde:

- D – massa volúmica relativa à condição do provete, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- m – massa do provete ( $m_{\text{hid}}$ ,  $m_x$ ,  $m_o$ ), kg;
- V – volume do provete,  $\text{m}^3$ .

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 4-10.

Quadro 4-10: Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da massa volúmica em betão endurecido

Equipamentos
Balança, equipada com estribos para pesagem, quer no ar, quer na água, de exatidão de 0,1%
Tanque de água, que mantenha a água a nível constante
Estufa ventilada ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ )

#### 4.4.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão do betão é uma das propriedades mecânicas mais importantes deste material, pois permite estimar muitas outras propriedades mecânicas do material.

O ensaio de resistência à compressão tem como objetivo a determinação da capacidade resistente dos diversos tipos de betões produzidos, quando sujeitos a uma tensão uniforme de compressão. A resistência à compressão é determinada a partir da força máxima suportada pelo provete e, por consequência, os valores obtidos são os máximos valores de tensão que se pode aplicar em cada um dos betões estudados (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Este ensaio foi executado de acordo com o prescrito na norma NP EN 12390-3:2009 – “*Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*”.

Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de idade dos provetes. Para cada tipo de betão foram utilizados 3 provetes cúbicos aos 7 dias de idade, enquanto aos 28 dias de idade ensaiaram-se 3 provetes cúbicos e 3 cilíndricos.

O equipamento utilizado para este ensaio foi uma prensa Controls C5600/FR, representada na Figura 4-12a) de capacidade máxima de 3000kN. A velocidade imposta deve ser constante de  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s.



Figura 4-12: Ensaio à compressão - provete cúbico

Os provetes a ensaiar foram limpos com um pano absorvente para retirar todo o excesso de humidade das superfícies. A carga foi aplicada com uma velocidade constante de 0,5MPa/s.

O valor da resistência à compressão ( $f_c$ ) é obtido a partir da seguinte equação:

$$f_c = \frac{F_i}{A_c} \quad (4-5)$$

onde:

- $f_c$  – resistência à compressão, em MPa ( $N/mm^2$ );
- $F_i$  – carga máxima à rotura, em N;
- $A_c$  – área da secção transversal do provete, na qual a força de compressão foi aplicada; utilizando as medições efetuadas com o auxílio do paquímetro, em  $mm^2$ .

A área da secção transversal do provete cubico foi determinada fazendo a média de seis medições na face carregada: três em cada direção ortogonal, como se ilustra na Figura 4-13. Já no provete cilíndrico fez-se apenas a média de três medições do diâmetro.



Figura 4-13: Marcação das 6 medições para se calcular a área transversal da face carregada

É de realçar que nos provetes cilíndricos houve necessidade de se realizar um capeamento na face carregada com  $\pm 5\text{mm}$  de espessura. Usou-se para o capeamento uma mistura de enxofre aplicado a quente na face pretendida, com o auxílio de uma armação de posicionamento, ver Figura 4-14.



a) Armação de posicionamento



b) Provete cilíndrico capeado

Figura 4-14: Regularização da superfície do provete por capeamento

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 4-11.

Quadro 4-11: Equipamentos utilizados no ensaio de compressão

Equipamentos
Balança de precisão de $\pm 0,1\%$
Prensa hidráulica Controls C5600/FR, de velocidade controlável
Pano de limpeza
Paquímetro
Armação de posicionamento do provete – Capeamento

### 4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

A avaliação da tensão de rotura do betão por tração pode ser conseguida através de ensaios de tração pura, flexão simples ou compressão diametral. Nesta campanha experimental optou-se por se realizar o ensaio de tração por compressão diametral.

A análise da resistência de tração do betão ajuda a compreender o seu comportamento futuro e a controlar a fissuração, não só por manter a continuidade da estrutura, mas também por impedir a corrosão das armaduras, no caso do betão armado, (Coutinho e Gonçalves, 1994).

O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade do betão e de acordo com a norma NP EN 12390-6 – 2003 – “*Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes*”.

Este ensaio consiste em submeter um provete cilíndrico a uma força de compressão diametral, ou seja, aplicada numa zona estreita ao longo do seu comprimento. Este processo gere tensões ortogonais ao plano de carga, provocando a rotura do provete por tração. Aplicou-se uma força de compressão a uma velocidade constante entre 0,04 e 0,06 MPa/s (Figura 4-15). O provete foi posicionado entre os pratos da prensa hidráulica com o auxílio de um posicionador (Figura 4-16b), cuja função é centrar o provete para que não haja excentricidades.

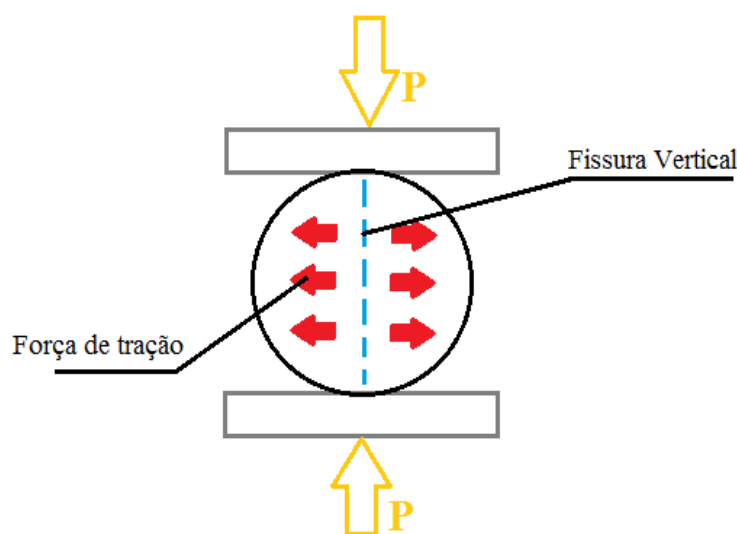


Figura 4-15: Esquema do ensaio de tração por compressão diametral



a) Posicionamento do provete      b) Posicionador dos provetes, em aço

Figura 4-16: Ensaio de tração por compressão diametral

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio encontram-se mencionados no Quadro 4-12:

Quadro 4-12: Equipamentos necessários ao ensaio de tração por compressão diametral

Equipamentos
Prensa hidráulica Controls C5600/FR, de velocidade controlável Posicionador dos provetes, em aço Faixas de cartão prensado

A resistência à tração por compressão é dada pela seguinte equação:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4-6)$$

onde:

- $f_{ct}$  – resistência à tração por compressão (MPa);
- $F$  – carga máxima (N);
- $L$  – comprimento da linha de contacto do provete (mm);
- $d$  – dimensão (diâmetro) da secção transversal (mm).

#### 4.4.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite determinar a capacidade que um betão possui em absorver um determinado líquido por ascensão através dos seus vasos capilares. Deste modo, este ensaio pretende avaliar como a composição do betão influencia a ascensão capilar da água através dos seus poros (Coutinho e Gonçalves, 1994). Assim, este ensaio não tem como objetivo avaliar elementos totalmente imersos em água, mas sim, elementos em

contacto com a água, como exemplo uma laje, uma parede ou elementos em contacto com a chuva. (Vieira, 2013)

Quando a água entra em contato com um capilar do provete de betão, é estabelecida uma diferença de pressão, entre a superfície livre da água e a face do betão, de tal forma que esta é absorvida pelas forças capilares presentes em cada poro. A força capilar local é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, com os poros menores a exercer uma maior força capilar. (Coutinho e Gonçalves, 1994)

A absorção de água por capilaridade depende de diversos fatores, como o grau de finura do cimento (diminui quando a finura aumenta), da relação A/C (aumenta quando A/C aumenta), da idade (diminui quando a idade aumenta), da duração da cura húmida (diminui quando a duração aumenta) e da compactidade. (Coutinho e Gonçalves, 1994)

O ensaio de absorção de água por capilaridade realizou-se aos 56 dias de idade do betão de acordo com a especificação do *LNEC – 393:1993 – “Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade”*.

Para a realização deste ensaio deve-se utilizar provetes com volume mínimo de  $0,001\text{m}^3$ , desta forma utilizaram-se provetes cúbicos com 150 mm de aresta.

Segundo a norma, o ensaio inicia-se com a secagem prévia dos provetes numa estufa ventilada ( $40 \pm 5^\circ\text{C}$ ) durante 14 dias. No presente estudo optou-se por secar os provetes durante 6 dias a uma temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , por questões de tempo.

Depois de arrefecidos registou-se a massa inicial de cada provete ( $m_0$ ). Encheu-se cuidadosamente um tabuleiro estanque com água (ver Figura 4-17), até que o nível atingisse os  $5 \pm 1$  mm acima da face superior do provete, evitando molhar as outras faces. A presente norma refere que se deve cobrir o tabuleiro e os provetes com uma campânula durante o ensaio, contudo, não se optou por fazê-lo tendo-se verificado que o nível de água permaneceu aproximadamente constante durante as pesagens nas primeiras 8 horas.

Registou-se a massa dos provetes ( $m_t$ ) nos tempos: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h, 24h, 48h, 72h, 96h e 120h (mais registos do que o estipulado na norma).



Figura 4-17: Ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade

Para a realização deste ensaio, utilizou-se os seguintes equipamentos descritos no Quadro 4-13:

Quadro 4-13: Equipamentos utilizados na realização do ensaio de absorção de água por capilaridade

Equipamentos
Estufa ventilada à temperatura $105\pm 5^{\circ}\text{C}$
Balança de precisão de $\pm 0,05\%$ da massa a determinar
Apoios plásticos
Nível
Bandeja metálica
Tabuleiro

A absorção de água por capilaridade é obtida pela seguinte equação:

$$A_i = \frac{m_i - m_0}{A_c} \quad (4-7)$$

onde:

- $A_i$  – absorção por capilaridade, no instante  $t_i$ , ( $\text{g}/\text{mm}^2$ );
- $m_i$  – massa do provete em contacto com a água, ao instante  $t_i$ , (g);
- $m_0$  – massa do provete seco em estufa, (g);
- $A_c$  – área da face inferior do provete em contacto com a água,  $\text{mm}^2$ .

#### 4.4.5 Absorção de água por imersão

Uma forma de complementar a informação obtida no ensaio de absorção de água por capilaridade é a realização do ensaio de absorção de água por imersão. Este ensaio possibilita avaliar o desempenho do betão em termos de durabilidade, uma vez que caracteriza a porosidade aberta do mesmo. A porosidade aberta pode ser derivada de adição excessiva de água na amassadura, do ar retido na mistura de betão no ato de vibração ou ainda pela absorção de água dos agregados. Este ensaio é então um indicador importante do volume de vazios do betão, ainda que este volume não seja totalmente preenchido pela água. (Coutinho e Gonçalves, 1994)

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado em provetes cúbicos, aos 98 dias de idade do betão, de acordo com a especificação do *LNEC – 394-1993 – “Betões – Determinação da absorção de água por imersão – Ensaio à pressão atmosférica”*.

Para a realização deste ensaio utilizou-se provetes com os mesmos requisitos do ensaio de absorção de água por capilaridade (ver Figura 4-18).



Figura 4-18: Ensaio de absorção de água por imersão

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio encontram-se indicados no Quadro 4-14.

Quadro 4-14: Equipamentos empregues no ensaio de absorção de água por imersão

Equipamentos
Estufa ventilada $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Recipiente com água
Balança, equipada com estribos para pesagem, quer no ar, quer na água, de exatidão de 0,05%

A absorção de água por imersão é calculada, em percentagem, através da equação seguinte:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (4-8)$$

onde:

- $A_i$  – absorção de água por imersão (%);
- $m_1$  – massa do provete saturado no ar (g);
- $m_2$  – massa hidrostática do provete saturado (g);
- $m_3$  – massa do provete seco (g).

#### 4.4.6 Ensaio ambientais

Com o intuito de se poder alargar o leque de conhecimentos sobre os betões produzidos, recorreu-se a ensaios de carácter químico. Visto esta ser uma matéria muito específica e técnica, recorreu-se ao auxílio do Departamento de Ambiente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV). Desse modo, optou-se por se realizar ensaios de lixiviação, que nos dão parâmetros como a condutividade, o pH, o potencial de oxidação-redução, a concentração de sulfatos e de cloretos e ainda o teor de humidade.

O processo de lixiviação envolve o contacto do material sólido em estudo com um determinado líquido, ocorrendo dissolução parcial de alguns componentes. Este processo envolve reações químicas mais ou menos complexas, sendo as espécies químicas mobilizadas por processos de difusão e/ou convecção. (Quina, 2005)

O ensaio de lixiviação pode ser influenciado por diversos fatores, e dividem-se em:

- Físicos – tamanho, homogeneidade, porosidade e permeabilidade das partículas sólidas em estudo, fluxo do agente lixiviante, temperatura a que ocorreu o processo, entre outras;
- Químicos – equilíbrio químico, aspetos cinéticos, pH do material, as condições redox, entre outras;
- Biológicos – esta propriedade está diretamente ligada com o facto de os seres vivos afetarem alguns aspetos físicos e químicos do ensaio e seus intervenientes.

Este ensaio realizou-se nos laboratórios do Departamento de Ambiente da ESTGV. Foi efetuado aos quatro tipos de agregados empregues nas misturas de betão (britas e areias) e a cada tipo de betão após os 28 dias de idade.

O ensaio de lixiviação rege-se pela norma EN 12457-4:2002 – “*Characterisation of waste Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (Without or with size reduction)*”.

De modo sucinto explica-se em seguida o procedimento de execução do ensaio.

Começou-se por colocar a amostra que se pretende estudar dentro de um frasco de vidro denominado como “shot” (ver Figura 4-19a). Tal como a norma indica, os ensaios devem respeitar um rácio de 10 l/kg (volume de água/volume da amostra), sendo que neste caso optou-se por colocar  $\pm 20$ g de amostra para  $\pm 200$ ml de água ionizada (ver Figura 4-19b).

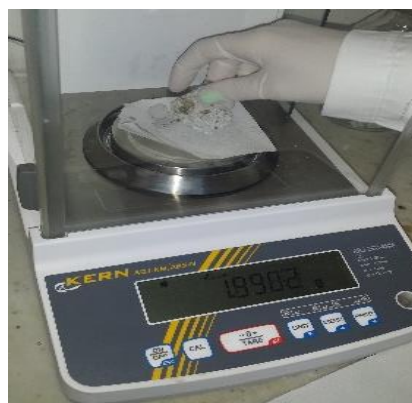
Depois de estabelecida essa relação, levou-se os “shots” para um “agitador” mecânico até o dia seguinte (24h) a uma temperatura de 20°C. Passado esse tempo retiraram-se os “shots” e deixou-se repousar cerca de 15 minutos. Filtrou-se a solução através de membranas de 0,45µm utilizando o sistema de filtração por vácuo para obtenção dos eluatos. Recorreu-se a elétrodos

#### 4 - Campanha Experimental

específicos para a medição do pH, o potencial de oxidação-redução e a condutividade. Posteriormente, foram realizadas análises para a determinação da concentração de sulfatos e cloretos nos eluatos, como ilustrado na Figura 4-19f).



a) Frascos de vidro denominados como “shot”



b) Pesagem das amostras de betão



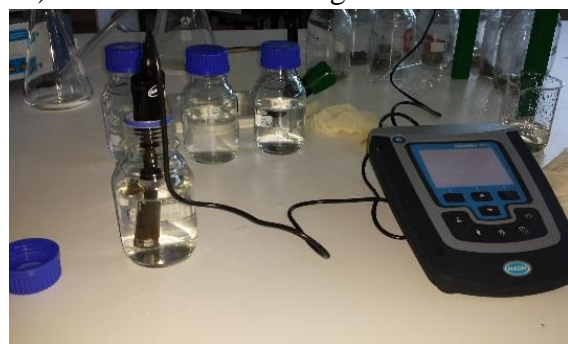
c) Agitador mecânico



d) Frascos de vidro no agitador mecânico



e) Filtração da solução por vácuo



f) Medidor multiparâmetros com elétrodos específicos

Figura 4-19: Ensaio de lixiviação

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de lixiviação encontram-se indicados no Quadro 4-15.

Quadro 4-15: Equipamentos empregues no ensaio de absorção de água por imersão

<b>Equipamentos</b>
Agitador mecânico
Frasco de vidro – “Shots”
Balança
Sistema de filtração por vácuo
Medidor multiparâmetros e eletrodos específicos
Neflometro

## **4.5 Síntese do capítulo**

Inicialmente descreveu-se a campanha experimental idealizada para este estudo. Em seguida, fez-se a apresentação do modo como as amassaduras foram produzidas, dos provetes utilizados, bem como dos ensaios realizados aos betões.

Finalmente, descreveram-se os ensaios realizados com vista a avaliar o desempenho dos 7 betões quer em estado fresco quer em estado endurecido.

## **5. Análise e Discussão dos Resultados**

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados durante a campanha experimental, descrita no capítulo 4. Este capítulo encontra-se dividido em 2 subcapítulos, sendo que o primeiro se refere aos ensaios realizados ao betão em estado fresco e o segundo refere-se aos ensaios executados ao betão em estado endurecido. Nestes dois subcapítulos pretende-se avaliar o desempenho dos betões produzidos com diferentes taxas de substituição de agregados finos (0, 20, 50 e 100%) por resíduos (lamas de cal e cinzas de biomassa).

A substituição de agregados por resíduos pode alterar as propriedades do betão quer em estado fresco quer em estado endurecido, uma vez que os resíduos podem reagir com o cimento e com a água, podendo alterar a velocidade de reação e o tempo de presa do betão.

No final é efetuada uma análise comparativa entre os resultados dos diferentes tipos de betão e, quando aplicável, com resultados de estudos similares disponíveis na bibliografia existente.

### **5.1 Ensaios em betão fresco**

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios efetuados ao betão em estado fresco: ensaio de abaixamento, ensaio de determinação da massa volúmica e ensaio de determinação do teor de ar no betão pelo método pressiométrico. Para cada tipo de betão realizou-se apenas um ensaio, mas na determinação do teor de ar no betão fresco, fez-se a média de três medições.

Os valores apresentados a seguir, são referentes a um único ensaio, sendo que os resultados mais pormenorizados do ensaio da determinação do teor de ar no betão fresco constam dos Apêndices B, C e D.

### 5.1.1 Abaixamento

O ensaio permitiu avaliar a consistência do betão fresco e, por consequência, a sua trabalhabilidade. Inicialmente, definiu-se a classe S<sub>2</sub> como a classe de consistência pretendida. Segundo a regulamentação esta classe de consistência define que o abaixamento se deve situar entre 50 e 90mm.

No Quadro 5-1 apresentam-se os resultados observados para cada tipo de betão no ensaio de abaixamento, estando também representados na Figura 5-1.

Quadro 5-1: Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

Tipo de Betão	h (mm)	Classe
Bt	65	S2
Cz 20	60	S2
Lm 20	95	S3
Cz 50	54	S2
Lm 50	84,5	S2
Cz 100	-	S1
Lm 100	28	S1

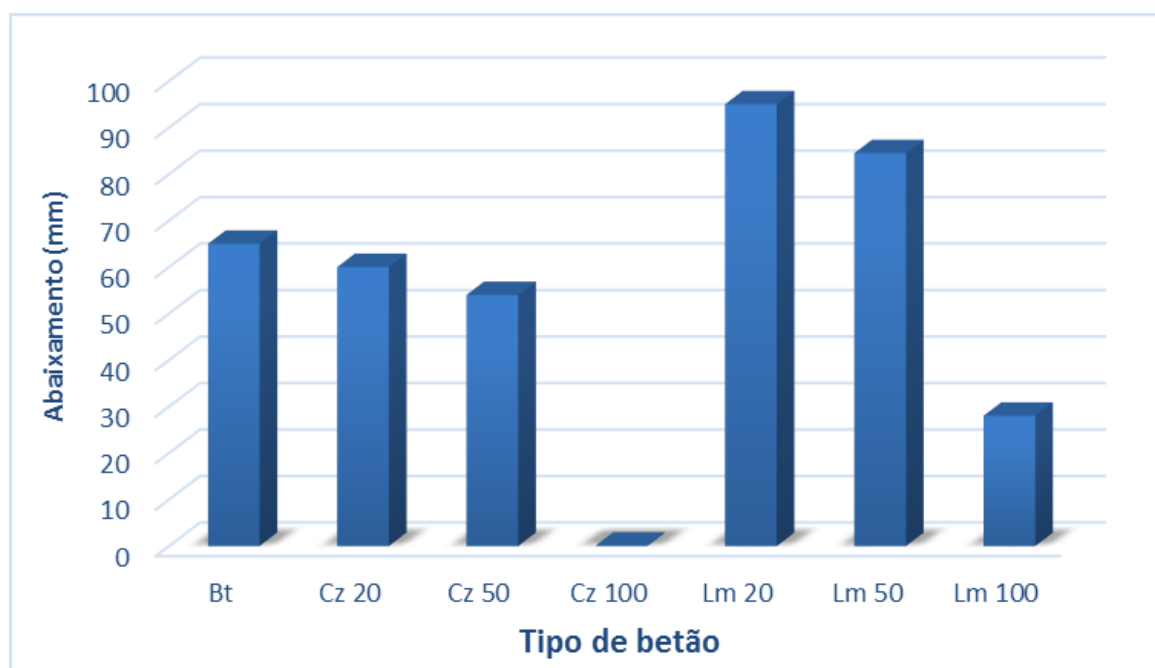


Figura 5-1: Resultados do ensaio de abaixamento

O betão Lm20 (substituição de finos em 20% de lamas de cal) foi o único a apresentar um abaixamento superior a 90mm (95mm), enquadrando-se na classe de consistência S<sub>3</sub>. Na realidade esta amassadura apresentou um aspeto mais fluido, apesar de ter excedido os limites da classe S<sub>2</sub> por apenas 5mm.

Pelo contrário, o betão Lm100 (substituição de finos em 100% de lamas de cal) e o betão Cz100 (substituição de finos em 100% de cinzas de biomassa), apresentaram valores muito reduzidos de abaixamento, 28mm e aproximadamente zero, respetivamente. Ambos os betões se enquadram na classe  $S_1$ , revelando uma consistência elevada, uma massa menos homogénea, uma baixa fluidez e, conseqüentemente, uma menor trabalhabilidade. Na Figura 5-2a) ilustra-se o aspeto da amassadura correspondente ao betão Cz100, sendo facilmente perceptível a dificuldade que existiu no enchimento dos respetivos moldes. Para esse betão não se executou o ensaio, pois era possível que o abaixamento fosse praticamente nulo.

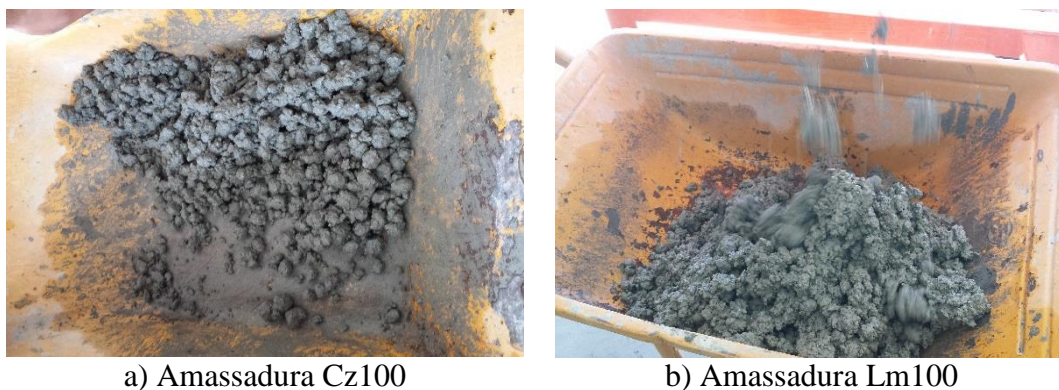


Figura 5-2: Aspeto das amassaduras de betão com 100% de resíduo

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a substituição de agregados finos por resíduos de cinzas de biomassa em 20% e 50%, teve pouco efeito na consistência do betão, não se verificando alteração de classe de abaixamento.

A variação de abaixamento registada nos betões Cz100 e Lm100, com diminuição da trabalhabilidade, é revelador de que a razão A/C utilizada não está devidamente ajustada para esta quantidade de resíduos.

Conclui-se assim que ao adicionar determinadas quantidades destes resíduos na composição do betão se deve proceder a um ajustamento da quantidade de água, principalmente no caso das cinzas de biomassa. Silva, (2012), ao avaliar o desempenho de betões com incorporação de agregados finos provenientes da indústria do mármore, também chegou a esta conclusão, afirmando que de modo a manter a trabalhabilidade é necessário aumentar a relação A/C à medida que aumenta a taxa de substituição de agregados.

### 5.1.2 Massa volúmica

No Quadro 5-2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da massa volúmica dos betões em estado fresco.

Quadro 5-2: Resultados da massa volúmica do betão em estado fresco

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Bt	2359
Cz 20	2309
Lm 20	2333
Cz 50	2306
Lm 50	2326
Cz 100	2314
Lm 100	2426

Os valores do Quadro 5-2 permitem confirmar que a incorporação de resíduos por substituição de agregados finos tem pouca influência na massa volúmica do betão em estado fresco. Os valores obtidos para a massa volúmica dos betões com resíduos são muito idênticos à massa volúmica do betão de referência (Bt), com exceção do betão Lm100, onde se registou um acréscimo de quase 3%.

### 5.1.3

#### 5.1.4 Teor de ar no betão– método pressiométrico

No Quadro 5-3 e na Figura 5-3, apresentam-se os valores médios de teor de ar (%) obtidos para as sete amassaduras.

Quadro 5-3: Resultados do ensaio de teor de ar no betão em estado fresco

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Teor de ar (%)</b>
Bt	1,40
Cz 20	1,50
Cz 50	2,25
Cz 100	2,80
Lm 20	1,60
Lm 50	1,65
Lm 100	3,05



Figura 5-3: Teor de ar nos betões

Por observação dos valores do Quadro 5-3, verifica-se que quanto maior é a taxa de substituição de agregado fino por resíduos, maior é o valor de teor de ar no betão. Nota-se também que os valores de teor de ar, entre as mesmas percentagens de substituição de agregados finos por resíduos, diferem pouco entre si, com exceção dos betões com uma quantidade de 50% de resíduo.

O betão Lm100 obteve maior valor percentual de teor de ar no betão, muito próximo de Cz 100. Os poros formados nestas misturas podem ter surgido devido à inadequada vibração do betão motivada pela sua baixa trabalhabilidade. Uma das formas de minimizar tal facto seria de alterar a granulometria utilizada. Espera-se por este motivo que este efeito se reflita na resistência à compressão destes materiais. Os resultados pormenorizados constam no Apêndice F.

## 5.2 Ensaios em betão endurecido

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em betão no estado endurecido.

Os valores expostos para cada ensaio referem-se a valores médios, encontrando-se nos apêndices G a L os resultados destes ensaios.

### 5.2.1 Massa volúmica

Os resultados dos ensaios de massa volúmica dos diversos betões em estudo estão expostos no Quadro 5-4 e na Figura 5-4, tendo sido determinados em função do modo como foi obtida a

massa dos provetes, ou seja,  $m_x$ , é a massa dos provetes saturados,  $m_0$ , é a massa dos provetes secos em estufa e,  $m_{hid}$  é a massa hidrostática dos provetes. Para cada ensaio foram utilizados três provetes.

Quadro 5-4: Valores médios da massa volúmica do betão em estado endurecido

Nota: Valores aproximados aos 10 kg/m<sup>3</sup>.

Tipo de Betão	$m_x$ (kg/m <sup>3</sup> )	C.V. (%)	$m_{hid}$ (kg/m <sup>3</sup> )	C.V. (%)	$m_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	C.V. (%)
Bt	2410	27,16	2260	27,17	1390	27,19
Cz20	2320	27,90	2120	27,76	1310	27,87
Lm20	2360	27,32	2190	27,35	1350	27,40
Cz50	2400	27,64	2240	27,61	1370	27,63
Lm50	2400	27,13	2230	27,19	1380	27,23
Cz100	2360	28,44	2230	28,29	1330	28,39
Lm100	2400	27,60	2230	27,39	1380	27,37

Nota: Valores aproximados à dezena.

No Quadro 5-4 observa-se que estes resultados são satisfatórios para o betão e apresentam uma dispersão em torno do valor médio muito idêntica. Os resultados dos ensaios estão listados no Apêndice G.

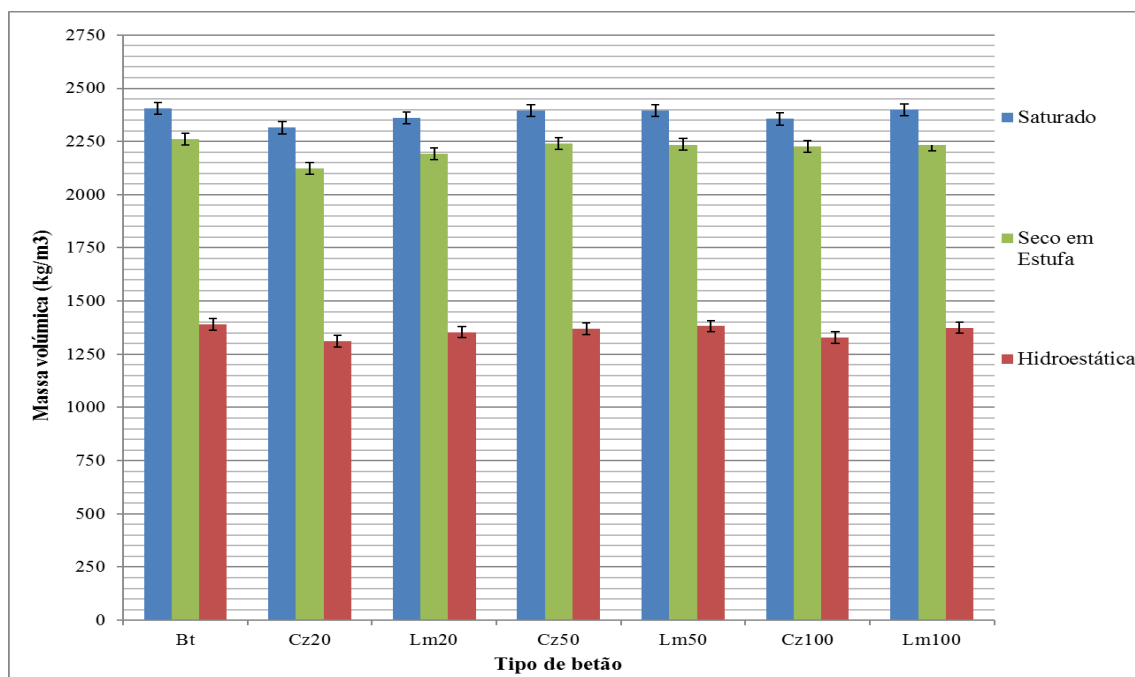


Figura 5-4: Massa volúmica do betão em estado endurecido

Observa-se, ainda, que os betões com incorporação de resíduos apresentam uma massa volúmica ligeiramente inferior à obtida no betão de referência, para os diferentes tipos de massas consideradas, tendo-se registado o maior decréscimo no betão Cz20 (cerca de 5%). Contudo, quando se analisam os valores da massa volúmica dos betões Cz20, Cz50 e Cz100 verifica-se que o aumento da percentagem de resíduo não conduziu ao aumento progressivo da massa volúmica. A mesma observação se faz para os betões Lm20, Lm50 e Lm100. Para a análise de resultados seria desejável a obtenção da massa volúmica dos resíduos, de forma a poder compará-la com a massa volúmica dos agregados.

### 5.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos betões foi avaliada aos 7 dias de idade em cubos e aos 28 dias de idade em cubos e cilindros.

Para cada ensaio foram utilizados três provetes e, conseqüentemente, os resultados são apresentados em termos de valores médios. Refira-se, contudo, que para o betão Cz100, aos 7 dias de idade, só se consideram válidos os resultados de 2 provetes, já que a resistência obtida num dos provetes ensaiados não tinha significado.

Os resultados dos ensaios de compressão de provetes estão indicados no Quadro 5-5, estando disponível no Apêndice H, os resultados individuais obtidos para cada provete.

Quadro 5-5: Valores médios da resistência à compressão, para os 7 e os 28 dias de idade

Tipo de Betão	7dias - Cubo		28 dias - Cubo		28 dias - Cilindro	
	Resistência (MPa)	C.V. (%)	Resistência (MPa)	C.V. (%)	Resistência (MPa)	C.V. (%)
Bt	33,50	2,74	39,77	1,32	32,33	6,74
Cz20	25,33	4,19	31,42	1,07	29,77	4,58
Cz50	28,53	2,43	37,39	4,50	31,77	3,55
Cz100	26,99	9,99	36,67	2,97	30,78	9,91
Lm20	28,11	1,63	32,97	1,58	30,80	3,67
Lm50	25,49	1,11	29,23	5,39	27,98	3,16
Lm100	24,46	6,40	26,18	5,49	25,38	1,77

Para uma melhor análise dos resultados obtidos, apresenta-se nas Figura 5-5, a resistência à compressão dos betões em provetes cúbicos aos 7 e aos 28 dias de idade e na Figura 5-6, a resistência à compressão dos betões para provetes cúbicos e cilíndricos, aos 28 dias de idade.

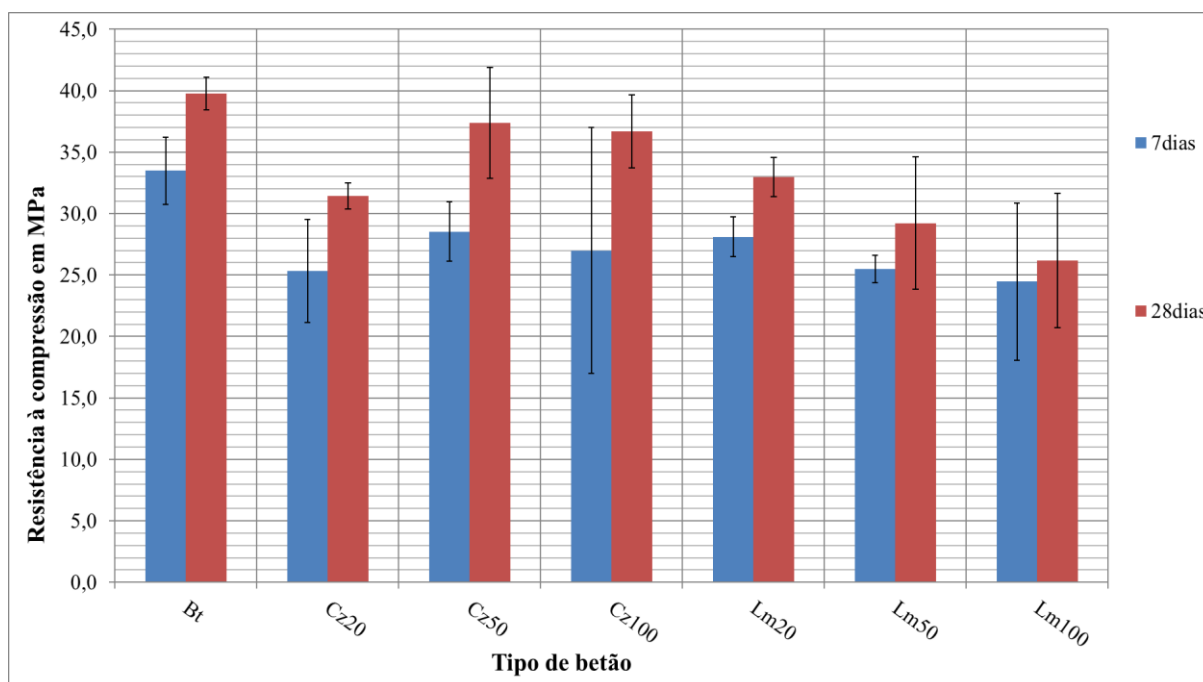


Figura 5-5: Resistência à compressão de provetes cúbicos

Da observação dos resultados dos ensaios de compressão em cubos, conclui-se que a incorporação de resíduos conduz a uma diminuição da resistência do betão quando comparada com a resistência do betão de referência, Bt. Em geral, a redução da resistência à compressão foi superior nos betões com incorporação de lamas de cal (Lm20, Lm50 e Lm100). Por fim, registou-se com estranheza o resultado de betão Cz20, por ter evidenciado uma resistência inferior à dos betões Cz50 e Cz100. Esta redução de resistência pode estar associada à estrutura

interna dos produtos de hidratação formados, com origem no cimento e nos resíduos, e eventual falta de água de hidratação, tenha conduzido a uma maior quantidade de ar nos betões com resíduos.

Um estudo mais detalhado passaria por recorrer ao estudo dos compostos formados por difração de Raios X e microscopia eletrónica, permitindo a análise em profundidade das microestruturas formadas e a sua homogeneidade.

O betão Cz50 foi o que evidenciou a maior resistência à compressão de entre todos os betões com incorporação de resíduos.

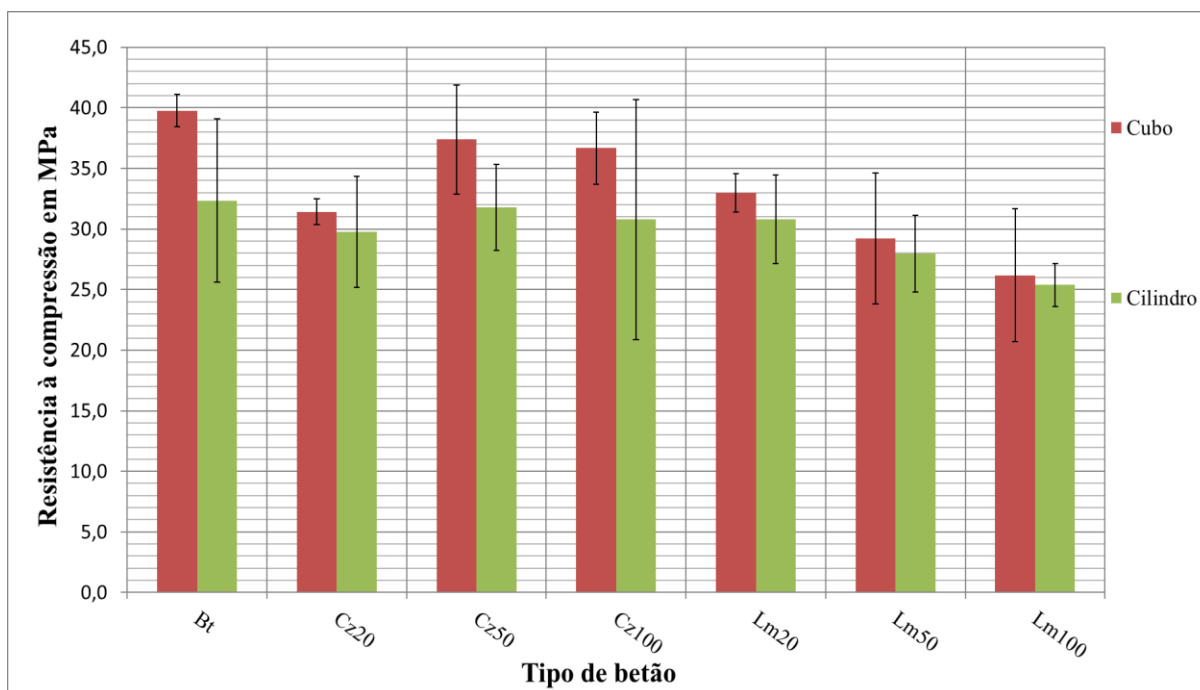


Figura 5-6: Resistência à compressão dos betões aos 28 dias de idade

Na Figura 5-6 é possível constatar que a resistência à compressão obtida em provetes cilíndricos é menor que a registada em cubos, como era previsível. Porém, é também visível que a diferença de resistência entre cubos e cilindros é muito menor nos betões com incorporação de lamas de cal do que a verificada nos betões com cinzas de biomassa, à exceção do betão Cz20. De um modo geral, os resultados obtidos em cilindros foram idênticos ao observado nos cubos, mas comparando apenas a resistência à compressão obtida em provetes cilíndricos, verifica-se uma menor redução da resistência nos betões com incorporação de resíduos comparativamente com a resistência à compressão do betão de referência.

No caso dos betões com incorporação de lamas de cal é possível observar uma tendência clara de redução da resistência com o aumento da percentagem de resíduo utilizado, possivelmente devido aos elevados teores de carbonatos de cálcio que podem ter uma participação ativa nas reações de hidratação e endurecimento, requerendo para tal, maiores proporções de água na preparação das misturas.

### 5.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

No Quadro 5-6, apresentam-se os resultados médios do ensaio de tração por compressão diametral de provetes, sendo possível consultar os resultados individuais de casa provete no Apêndice I.

Quadro 5-6: Valores médios da resistência à tração por compressão diametral (MPa)

Betão	Resistência (MPa)	C.V. (%)
Bt	2,91	10
Cz20	2,46	12
Cz50	2,21	9
Cz100	2,23	3
Lm20	2,56	9
Lm50	2,00	3
Lm100	1,83	10

Pela observação do Quadro 5-6 verifica-se que a resistência à tração dos betões com incorporação de resíduos é inferior á resistência à tração do betão de referência. De modo idêntico ao verificado nos ensaios de compressão, os betões com incorporação de lamas de cal evidenciaram uma menor resistência à tração quando comparados com os betões com incorporação de cinzas de biomassa, com exceção do betão Lm20.

Em termos globais, o coeficiente de variação é maior no ensaio à compressão comparativamente com o ensaio à tração. Na Figura 5-7 ilustram-se os resultados dos ensaios.

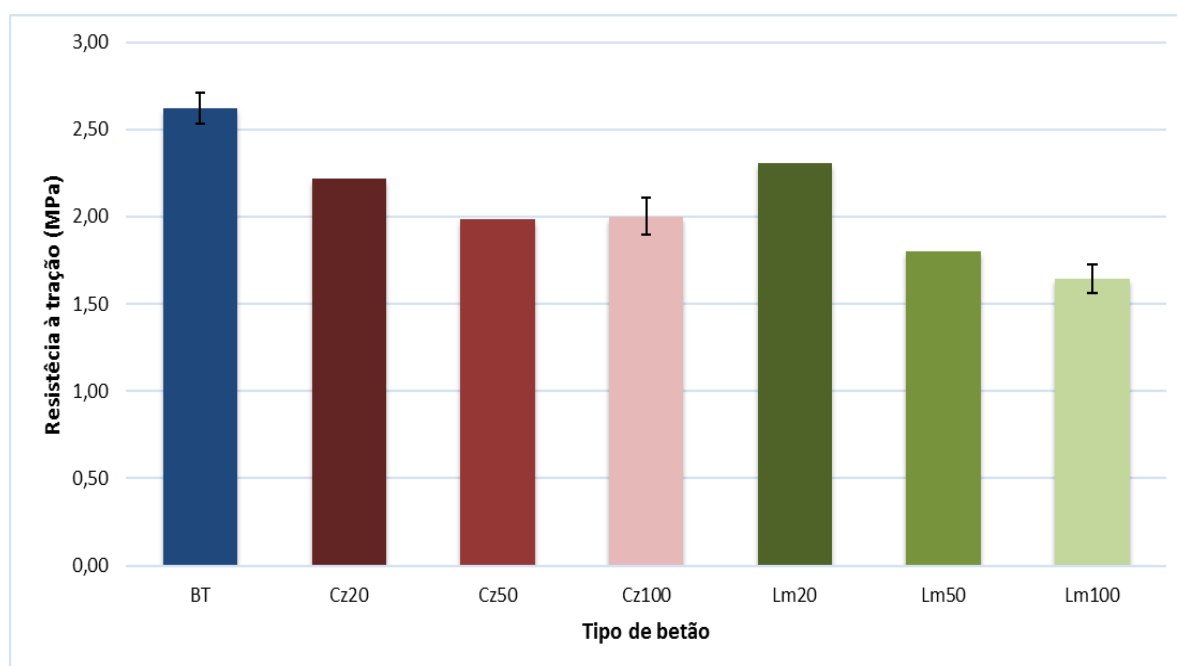


Figura 5-7: Resistência média à tração por compressão diametral (MPa)

### 5.2.4 Absorção de água por capilaridade

Os resultados médios obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade encontram-se resumidos no Quadro 5-7, encontrando-se no Apêndice J os resultados mais detalhados.

Quadro 5-7: Valores médios da absorção de água por capilaridade

Tipo de Betão	Absorção de água por capilaridade, em função do tempo (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>4</sup>												
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	24h	48h	72h	96h	120h
<b>Bt</b>	15,21	40,93	43,10	45,50	47,38	48,65	50,68	52,10	71,60	85,02	96,79	105,87	113,07
<b>Cz20</b>	6,14	11,17	13,76	16,20	19,89	21,89	24,40	25,59	61,09	99,25	121,21	139,48	154,49
<b>Cz50</b>	9,54	12,43	15,83	18,71	21,08	22,71	24,11	25,96	51,25	70,63	86,75	93,71	103,54
<b>Cz100</b>	10,35	13,31	17,38	18,64	24,85	28,18	30,40	34,91	59,02	83,13	107,46	116,55	127,20
<b>Lm20</b>	5,77	8,28	11,09	13,75	16,19	18,71	20,48	22,33	49,47	68,99	82,38	92,29	103,38
<b>Lm50</b>	6,72	7,83	8,87	10,27	12,25	13,52	14,26	14,93	26,16	35,92	43,90	51,32	57,57
<b>Lm100</b>	9,32	15,32	18,94	22,27	26,64	33,74	37,74	41,88	68,52	79,55	95,24	106,49	120,84

Na Figura 5-8 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

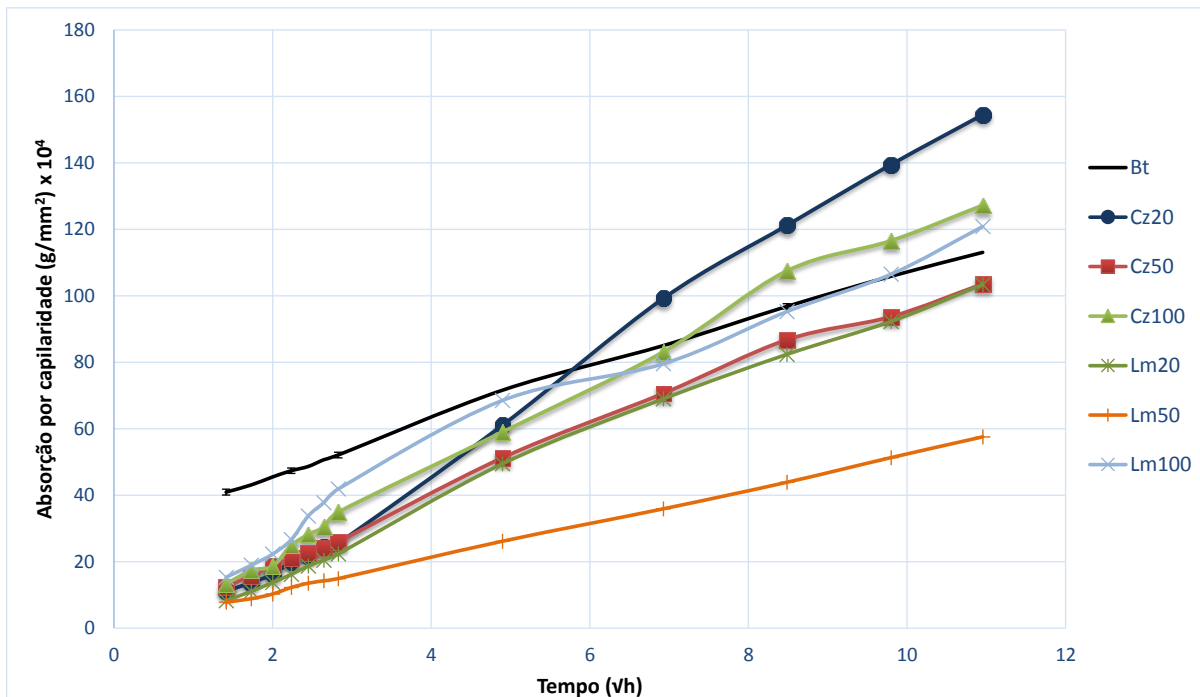


Figura 5-8: Absorção de água por capilaridade

Para melhor analisar os resultados obtidos nestes ensaios apresenta-se, separadamente, nas Figuras 5-9 e 5-10, as evoluções ao longo do tempo, da absorção de água por capilaridade do betão de referência comparativamente com os betões com incorporação de cinzas de biomassa e do betão de referência com os betões com incorporação de lamas de cal.

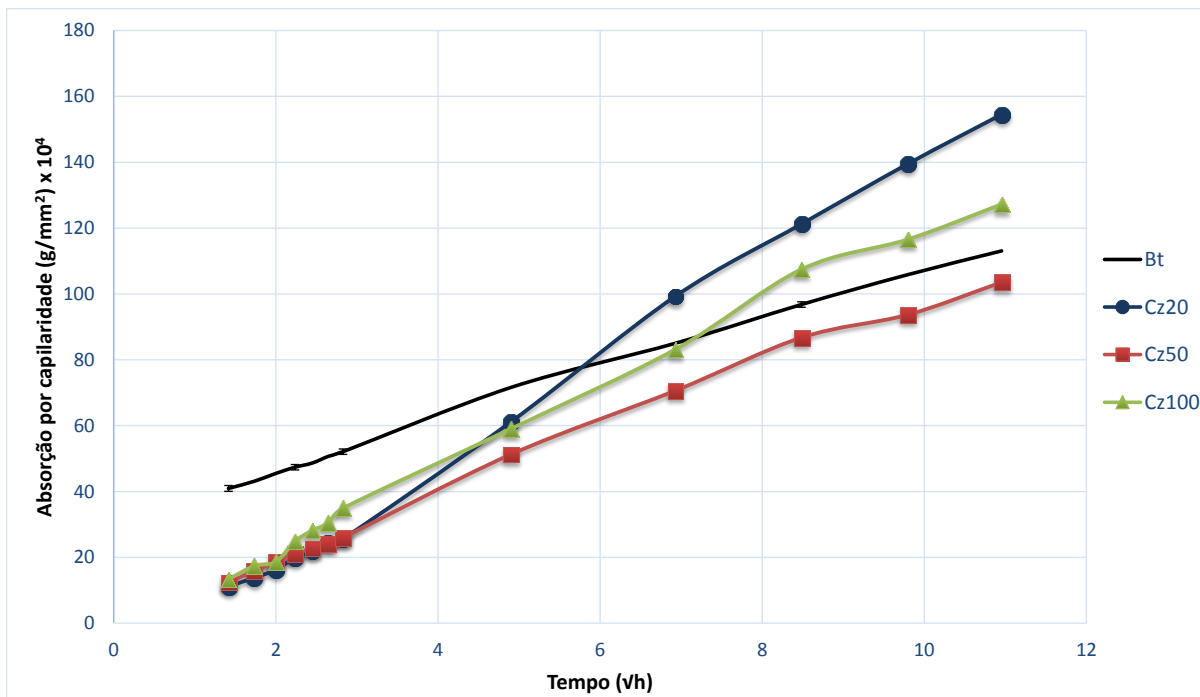


Figura 5-9: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de cinzas de biomassa

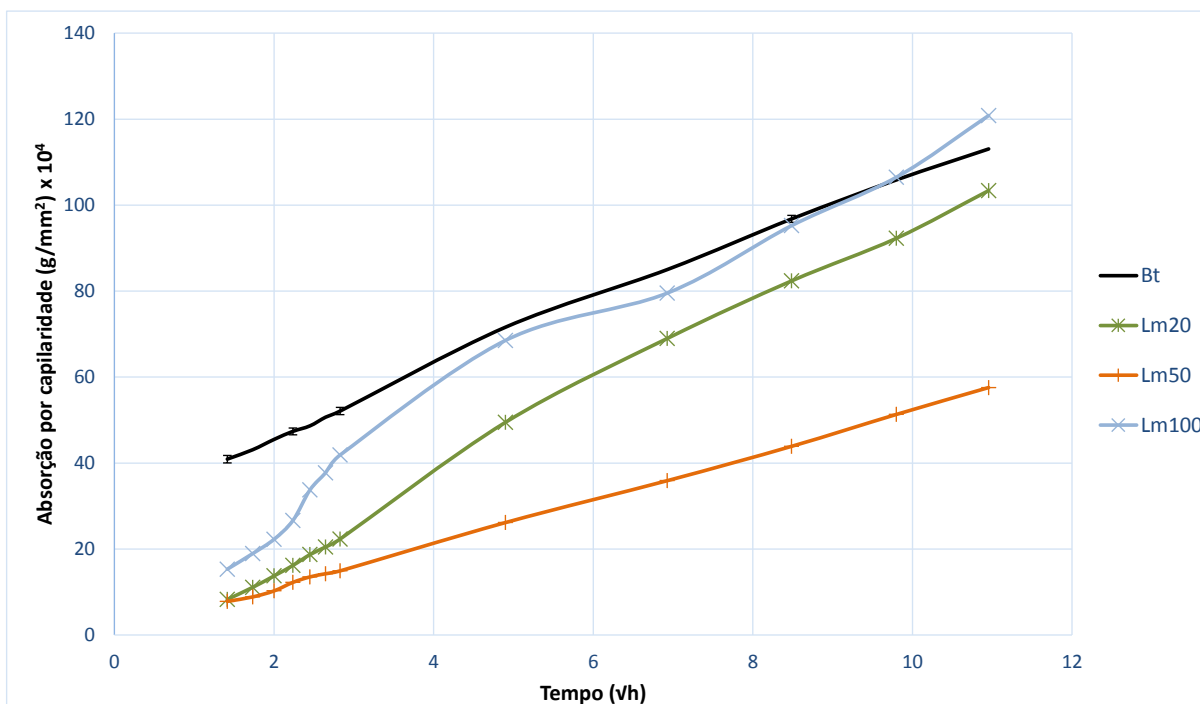


Figura 5-10: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com incorporação de lamelas de cal

O betão de referência, Bt, atinge valores de absorção de água por capilaridade maiores nas primeiras 8h de ensaio, sendo notória a diferença relativamente aos valores obtidos pelos betões com incorporação de resíduos. O betão Lm100 é o que se aproxima mais do betão de referência Bt.

A longo prazo verifica-se que metade dos betões com incorporação de resíduos absorve uma maior quantidade de água por capilaridade do que o betão de referência, à exceção dos betões Cz50, Lm20 e Lm50. O betão Lm50 é o que apresenta menor absorção de água por capilaridade, praticamente ao longo de todo o ensaio.

Como referido anteriormente, o betão de referência absorve água por capilaridade mais rapidamente nas primeiras 8h de ensaio, tendendo a estabilizar com o tempo, enquanto que em todos os betões com incorporação de resíduos, a absorção de água é sempre crescente com o tempo. Não se verifica qualquer proporcionalidade entre a absorção de água e a taxa de incorporação de resíduos. Ou seja, não se consegue concluir concretamente que efeito tem a maior ou menor quantidade de resíduos no betão, visto que nas cinzas de biomassa o betão Cz20 absorve mais água que o betão Cz100, e este, por sua vez, absorve mais água do que o betão Cz50. Quanto às lamas de cal, o betão Lm100 absorve mais água do que o betão Lm20, que absorve mais água do que o betão Lm50. Não se verifica, assim, qualquer tendência entre a quantidade de água absorvida e a quantidade de resíduos adicionado ao betão.

Nas Figuras 5-11, 5-12 e 5-13, ilustra-se a comparação entre a absorção de água por capilaridade do betão de referência e dos betões com a mesma taxa de incorporação de resíduos.

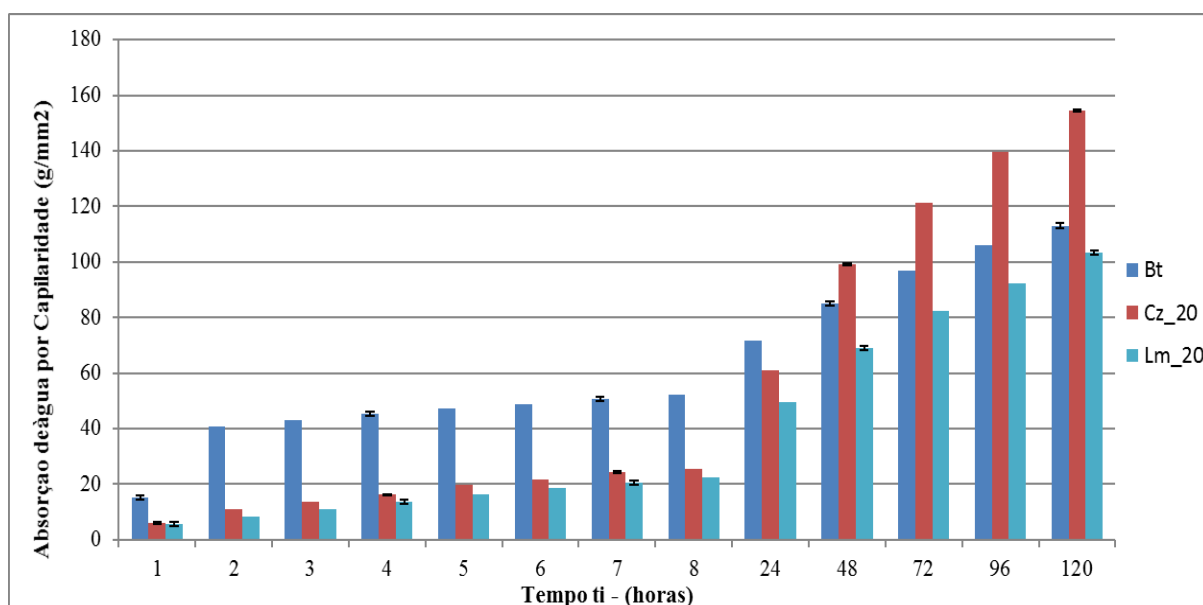


Figura 5-11: Absorção de água por capilaridade no betão de referência e nos betões com 20% de incorporação de resíduos

Pela observação da Figura 5-11, verifica-se que, a partir das 48 horas, o betão Cz20 ultrapassa a quantidade de água absorvida pelo betão de referência e que o betão com incorporação de 20% de cinzas de biomassa absorve mais água por capilaridade do que o betão com 20% de lamas de cal.

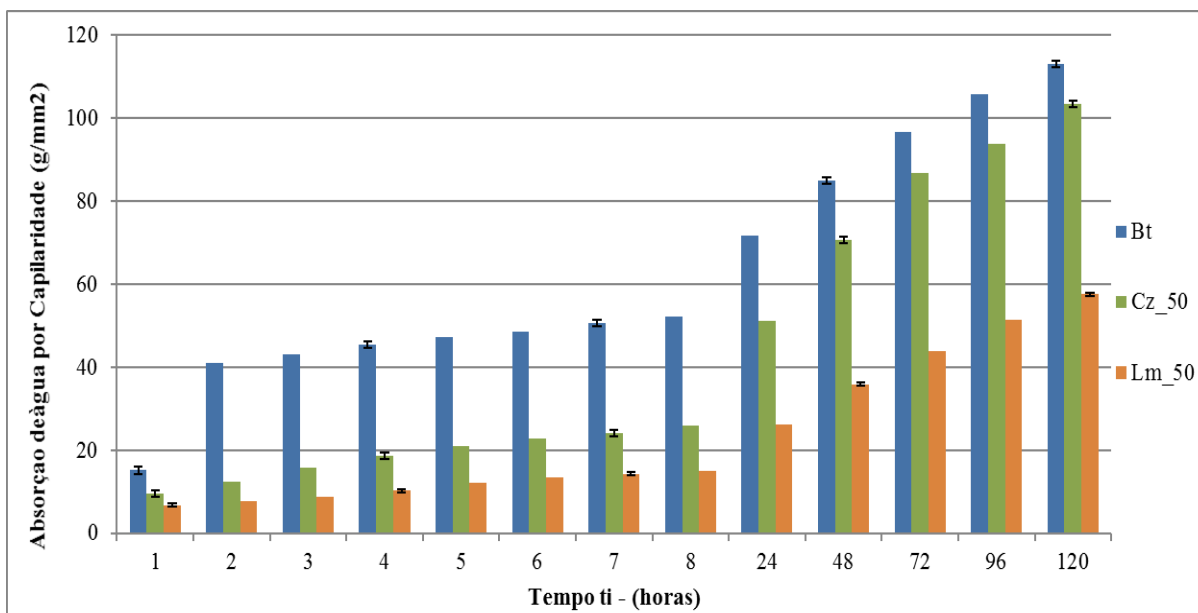


Figura 5-12: Absorção de água por capilaridade, no betão de referência e nos betões com 50% de incorporação de resíduos.

A Figura 5-12 mostra que os betões com incorporação de 50% de resíduos absorvem menos quantidade de água do que o betão de referência, ao longo de todo o ensaio.

O betão com incorporação de 50% de cinzas de biomassa continua a absorver mais água que o betão com incorporação de 50% de lamas de cal.

Na Figura 5-13 é visível que, a partir das 48 horas, o betão Cz100 ultrapassa a quantidade de água absorvida pelo betão Lm100 e, a partir das 72 horas, a quantidade de água absorvida é superior à do betão de referência. Também nesta comparação se verifica que o betão com incorporação de 100% de cinzas de biomassa absorve mais água por capilaridade do que o betão com 100% de lamas de cal.

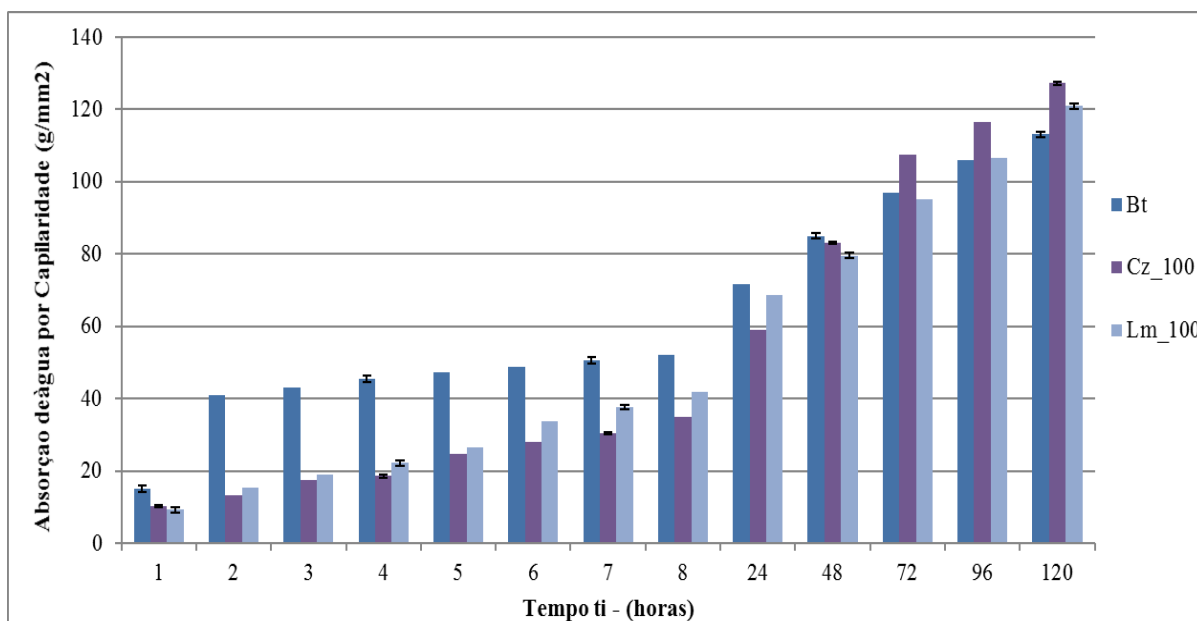


Figura 5-13: Absorção de água por capilaridade, no betão de referência e nos betões com 100% de incorporação de resíduos.

A diversidade de resultados obtida sugere que deveriam ser realizados ensaios com um maior número de provetes.

### 5.2.5 Absorção de água por imersão

Os resultados médios obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão encontram-se expostos no Quadro 5-8. Os resultados individuais de todos os provetes podem ser consultados no Apêndice K.

Quadro 5-8: Valores médios da absorção de água por imersão (%)

Tipo de Betão	Absorção de Água por Imersão, em função do tempo (%)		
	24 h	48 h	72 h
Bt	14,84	15,02	15,05
Cz20	17,32	17,51	17,71
Cz50	14,56	14,60	14,62
Cz100	16,38	16,87	16,91
Lm20	19,22	19,31	19,57
Lm50	15,56	15,94	15,99
Lm100	15,79	15,96	16,07

Na Figura 5-14 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão.

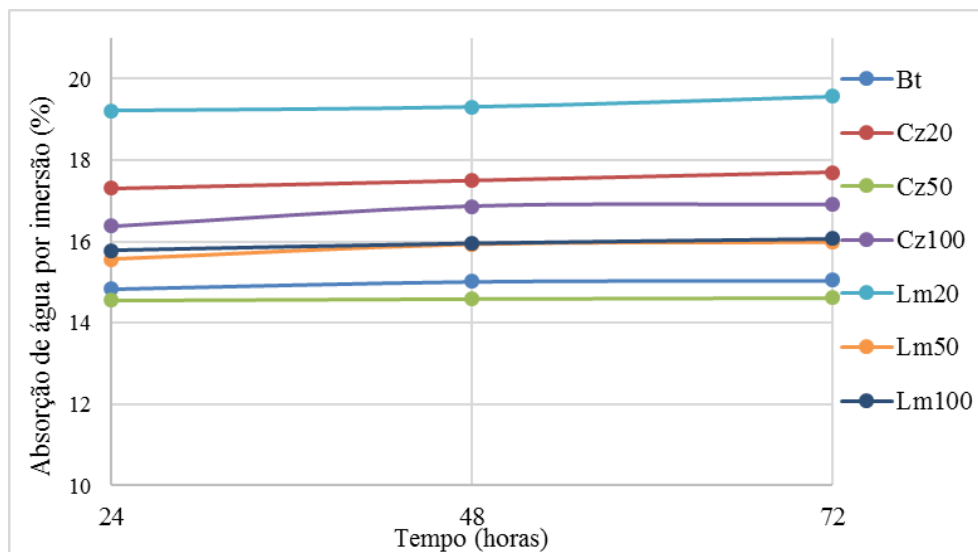


Figura 5-14: Absorção de água por imersão

Para facilitar a análise dos resultados representam-se na Figura 5-15 os resultados do betão de referência e dos betões com 20% de resíduos.

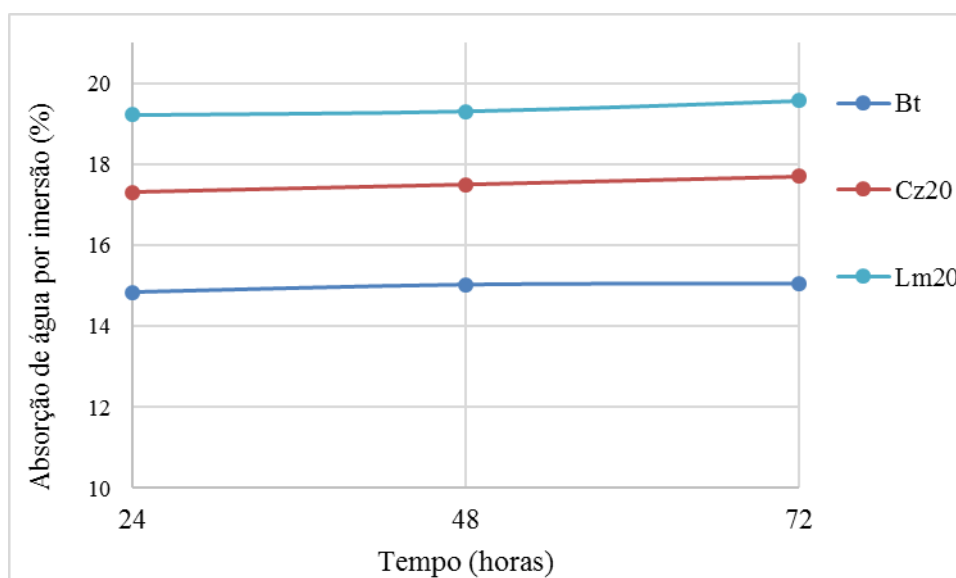


Figura 5-15: Absorção de água por imersão no betão de referência e nos betões com incorporação de 20% de resíduos

Na Figura 5-15 observa-se uma maior percentagem de absorção de água por imersão entre os betões com 20% de incorporação de resíduos em relação ao betão de referência Bt.

O betão com incorporação de lamas de cal é o que apresenta maior percentagem de absorção de água, tendo uma variação relativamente ao betão Cz20 na ordem dos 10% e relativamente ao betão de referência de aproximadamente 23%.

Na Figura 5-16 apresentam-se os resultados do betão de referência e dos betões com 50% de resíduos.

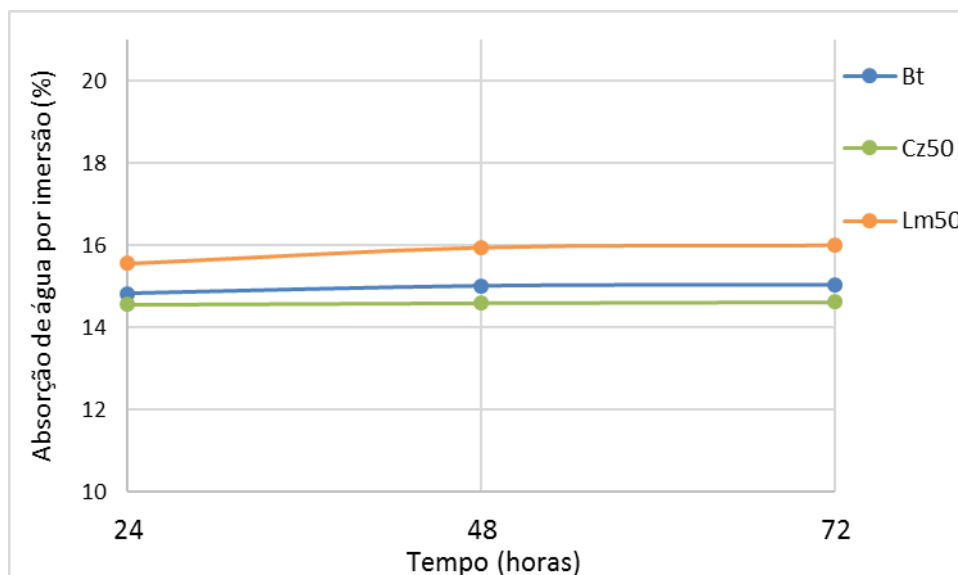


Figura 5-16: Evolução da absorção de água por imersão no betão de referência e nos betões com incorporação de 50% de resíduos

Para os betões com 50% de incorporação de resíduos observa-se também que o betão com incorporação de lamas de cal registou maior percentagem de absorção de água. Contudo, era espectável que Cz50 tomasse valores superiores ao betão de referência, contudo, tal não se verifica. Como Bt e Cz50 têm valores muito próximos estes podem ser considerados os mesmos.

Por último, apresentam-se na Figura 5-17 os resultados do betão de referência e dos betões com incorporação de 100% de resíduos.

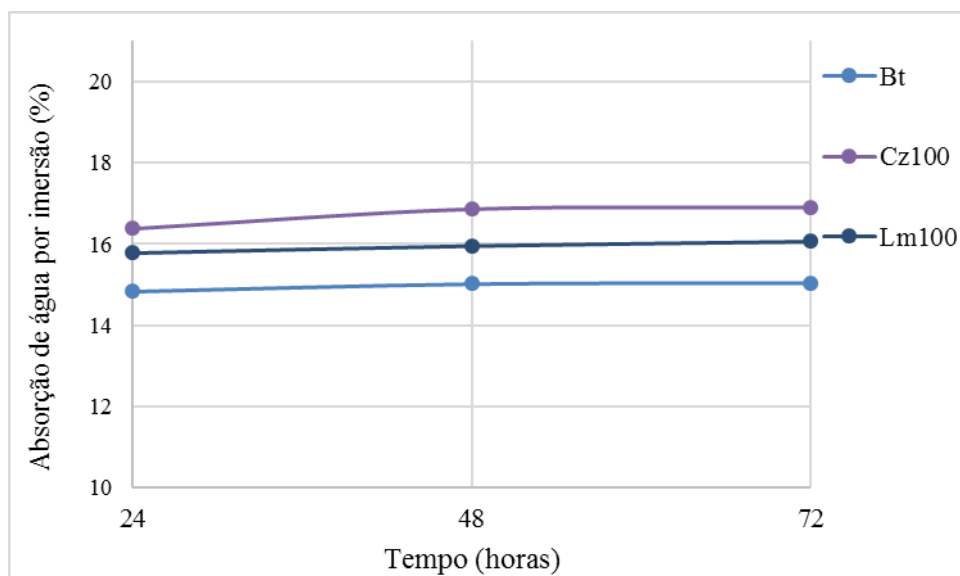


Figura 5-17: Evolução da absorção de água por imersão no betão de referência e nos betões com incorporação de 100% de resíduos

Com a incorporação de 100% de resíduos no betão, verifica-se que as cinzas de biomassa registam a maior percentagem de absorção de água. Neste caso, o betão de referência é o que absorve menos quantidade de água, menos cerca de 6% comparativamente a Lm100 e menos de 10% com Cz100.

De uma maneira generalizada, com este ensaio não foi possível observar qualquer tendência entre a quantidade de resíduo incorporado no betão e a percentagem de absorção de água, tal como se observou no ensaio de absorção de água por capilaridade. Na Figura 5-18 é possível constatar esse facto, através da comparação da quantidade de água absorvida no final de 72h.

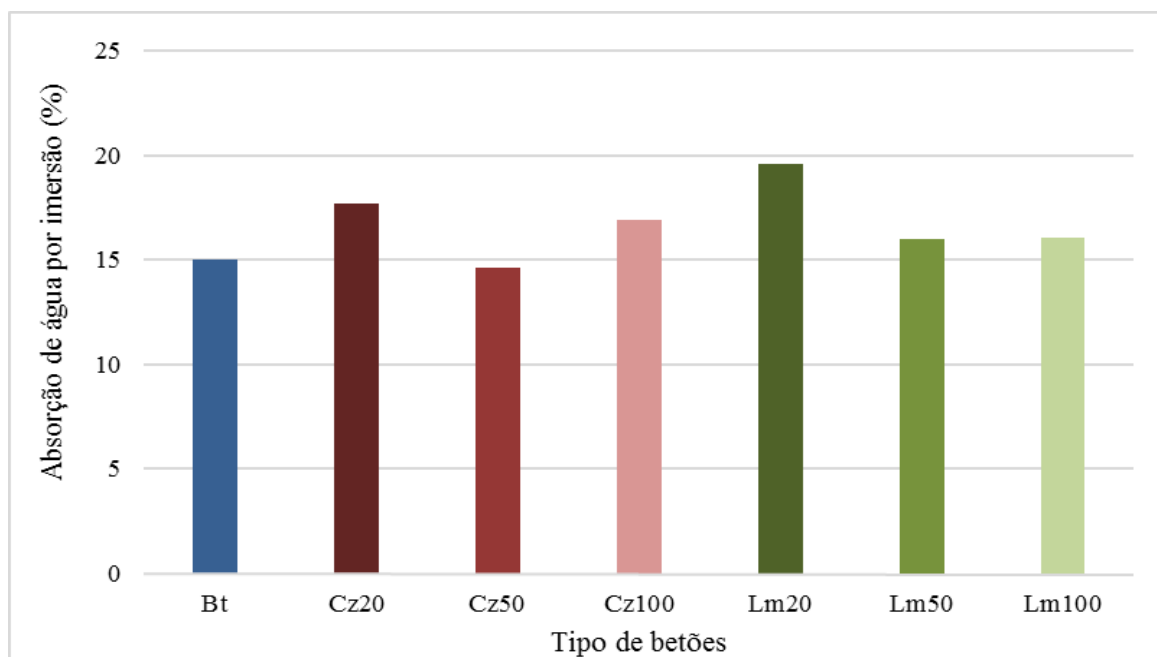


Figura 5-18: Absorção de água por imersão, decorridas 72 horas.

### 5.2.6 Ensaio ambientais

O ensaio de lixiviação permitiu a obtenção do grau de pH e condutividade de todos os betões estudados. Os resultados médios encontram-se expostos no Quadro 5-9 e nas Figuras 5-19 e 5-20, apresentando-se no Apêndice L os resultados individuais de todos os provetes.

Quadro 5-9: Valores médios de pH e de condutividade

Tipo de betão	pH	Condutividade (µs/cm)
Bt	12,0	2780,0
Cz20	11,8	1814,5
Cz50	11,9	2295,0
Cz100	11,8	2335,0
Lm20	12,0	3010,0
Lm50	12,0	1387,5
Lm100	11,8	2166,0

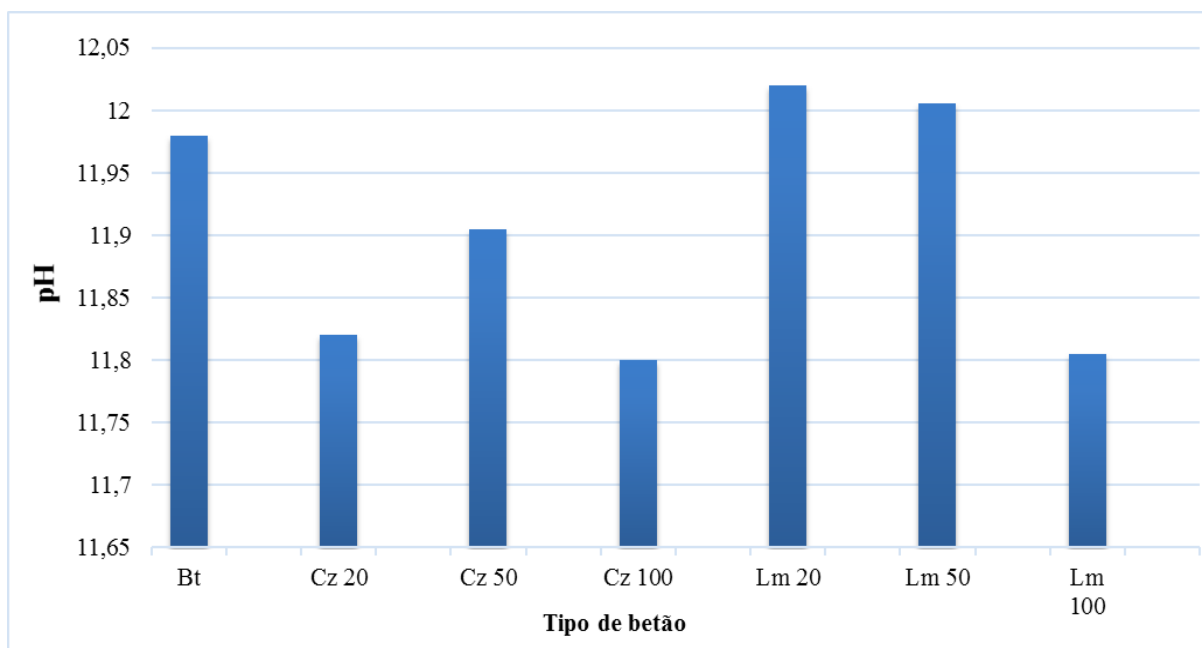


Figura 5-19: Valores médios de pH

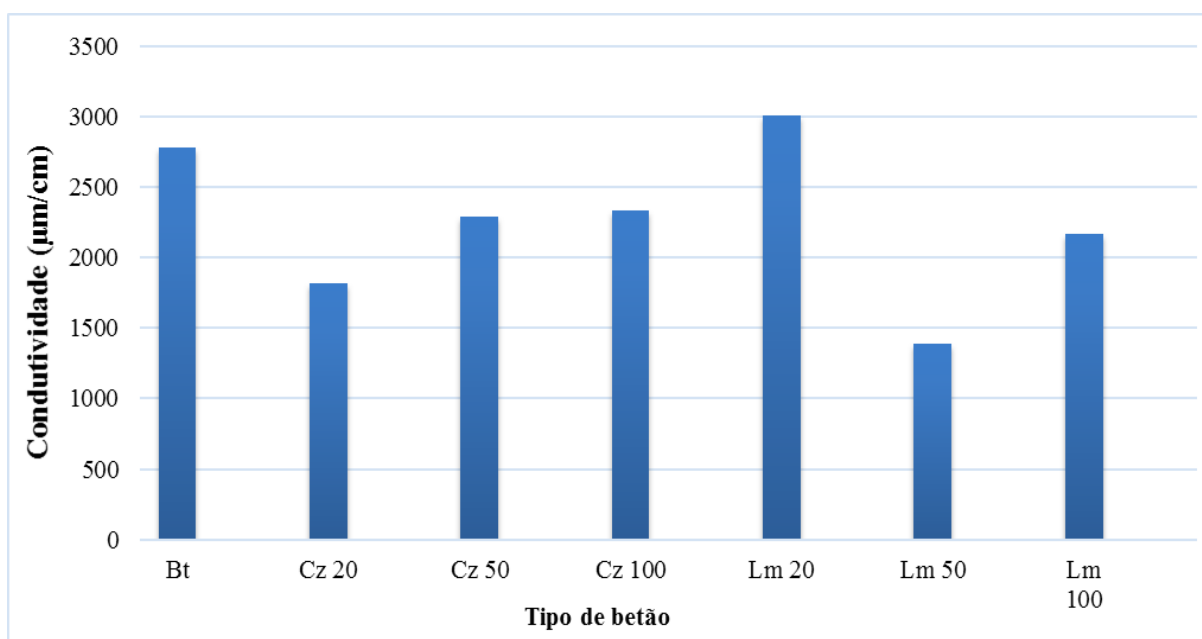


Figura 5-20: Valores médios para a condutividade

Pela observação dos resultados obtidos verifica-se, de uma maneira geral e para todos os betões produzidos, um valor de pH próximo de 12, o que significa que todos os betões têm carácter químico básico, enquadrando-se nos parâmetros normais entre betões.

Quanto à condutividade, verifica-se que, de uma forma geral o valor tende a diminuir, à exceção do betão com incorporação de 20% de lamas de cal que é o que apresenta maior valor de condutividade. Em contrapartida, é o betão com 50% de incorporação de lamas de cal que

apresenta a menor condutividade. A incorporação de cinzas de biomassa apresenta uma tendência entre quantidade de resíduo incorporado e grau de condutividade, facto não constatado nas lamas de cal.

O ataque químico do betão é normalmente caracterizado por agressão de sulfatos, mas, no caso do betão armado, também é desejável controlar a quantidade de cloretos. Nesse sentido, avaliou-se a concentração de cloretos e sulfatos (mg/kg) dos betões produzidos, apresentando-se no Quadro 5-10 os resultados obtidos.

Quadro 5-10: Concentração de cloretos e sulfatos

Tipo de betão	Cloretos		Sulfatos	
	(mg Cl/kg)	(%)	(mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg)	(%)
Bt	87,5	0,008	436,6	0,049
Cz20	37,5	0,004	501,5	0,050
Lm20	37,5	0,004	228,0	0,023
Cz50	25	0,003	540,9	0,054
Lm50	37,5	0,004	352,6	0,035
Cz100	37,5	0,004	873,9	0,087
Lm100	37,5	0,004	822,5	0,082

Comparando a concentração de cloretos e sulfatos presentes nos resíduos (Quadro 3-19) e a concentração destes compostos presentes nos betões (Quadro 5-10), verifica-se que a lixiviação de cloretos e sulfatos das estruturas sólidas decresce acentuadamente relativamente aos teores encontrados nos próprios resíduos. Se por um lado estes iões ficam encapsulados na matriz sólida, diminuindo a sua lixiviação, também é um facto a diferença de proporção de materiais estudados, isto é, nos resíduos a análise foi efetuada a 100% do material, nos betões a proporção dos materiais foi bastante inferior. Mas verifica-se que até no caso do cimento, a lixiviação de cloretos e sulfatos apresenta concentrações bastante inferiores quando comparado com o cimento, 526,4 mg/kg e 1027 mg/kg, respetivamente.

A presença de cloretos no betão pode alterar o tempo e a velocidade de presa, contudo a sua presença não é perigosa para o betão simples, uma vez que não forma compostos indesejáveis com os componentes do cimento. Quando se trata de betão armado ou pré-esforçado, a presença do ião de cloro já é relevante, uma vez que promove a oxidação das armaduras e posterior corrosão.

Apresenta-se também no Quadro 5-11 os resultados obtidos para o teor e humidade nos diversos betões produzidos.

Quadro 5-11: Teor de humidade

Betões	Teor de Humidade (%)
Bt	1,23
Cz20	1,73
Cz50	2,26
Cz100	2,23
Lm20	1,40
Lm50	1,90
Lm100	1,49

O betão que apresenta maior teor de humidade é o betão com 50% de introdução de cinzas de biomassa, sendo que, de uma maneira generalizada, são os betões com incorporação de cinzas de biomassa que apresentam maior teor de humidade. Genericamente os betões apresentam todos valores inferiores a 2%.

### 5.3 Análise comparativa

Nesta parte do trabalho procedeu-se à comparação do desempenho dos diversos betões através da quantificação das variações percentuais das suas propriedades e através da comparação dos resultados obtidos com os resultados existentes em estudos similares.

#### 5.3.1 Variações percentuais

De forma a sintetizar os valores obtidos ao longo deste trabalho, apresentam-se de seguida as variações percentuais das propriedades dos betões com incorporação de resíduos relativamente ao betão de referência.

No Quadro 5-12 sintetizam-se as variações registadas nos principais ensaios realizados ao betão em estado fresco.

Quadro 5-12: Percentagem de variação dos resultados dos ensaios de betão fresco em relação ao betão de referência

Tipo de Betão	Variação - $\Delta$ (%)	
	Massa Volúmica	Teor de ar no betão
Bt	2358,7 (Kg/m <sup>3</sup> )	A1 =1,4
Cz20	-2,12%	+7,14%
Cz50	-1,90%	+60,71%
Cz100	-1,37%	+100,00%
Lm20	-2,25%	+14,29%
Lm50	-1,09%	+17,86%
Lm100	+2,87%	+117,86%

No ensaio de determinação de massa volúmica, todas as variações são na ordem dos -2% relativamente ao betão de referência, exceto no betão Lm100, cuja a massa volúmica é maior do que Bt, tendo  $\Delta = +2,87\%$ .

Quanto ao ensaio de determinação de teor de ar no betão, todos os valores são maiores do que o betão de referência. Nos betões com incorporação de 100% de resíduo verificaram-se algumas dificuldades no enchimento dos provetes, dada a baixa trabalhabilidade da amassadura, sendo por isso possível que a quantidade de ar retido no interior da mistura tenha sido superior à do betão de referência.

No Quadro 5-13 apresentam-se as variações percentuais registadas no ensaio de determinação da massa volúmica dos betões em estado endurecido.

Quadro 5-13: Percentagem de variação dos resultados da massa volúmica dos betões com resíduos relativamente ao betão de referência

Tipo de Betão	Variação - $\Delta$ (%)		
	$m_x = 2410$ (kg/m <sup>3</sup> )	$m_o = 2260$ (kg/m <sup>3</sup> )	$m_{hid} = 1390$ (kg/m <sup>3</sup> )
Bt			
Cz20	-3,73%	-6,19%	-5,76%
Cz50	-0,41%	-0,88%	-1,44%
Cz100	-2,07%	-1,33%	-4,32%
Lm20	-2,07%	-3,10%	-2,16%
Lm50	-0,41%	-1,33%	-0,72%
Lm100	-0,41%	-1,33%	-0,72%

$m_x$  – massa do provete saturado;  $m_o$  – massa do provete seco;  $m_{hid}$  – massa hidrostática do provete

É perfeitamente visível que todas as percentagens são negativas, pois os valores obtidos para todos os betões com incorporação de resíduos, foram menores do que o betão de referência. A

maior variação da massa volúmica dos betões com resíduos relativamente ao betão de referência foi registada no betão Cz20.

No Quadro 5-14 apresentam-se as variações percentuais registadas no ensaio de compressão dos betões em estado endurecido.

Quadro 5-14: Percentagem de variação dos resultados da resistência à compressão dos betões com resíduo relativamente ao betão de referência

Tipo de Betão	Variação - $\Delta$ (%)		
	cubo, 7 dias de idade	Cubo, 28 dias de idade	Cilindro, 28 dias de idade
Bt	fcm, 7d = 33,5 MPa	fcm, 28d = 39,8MPa	fcm, 28d = 32,33 MPa
Cz20	-24,39%	-21,00%	-7,93%
Cz50	-14,82%	-6,00%	-1,75%
Cz100	-19,42%	-7,79%	-4,80%
Lm20	-16,08%	-17,10%	-4,75%
Lm50	-23,89%	-26,52%	-13,48%
Lm100	-26,97%	-34,17%	-21,52%

No ensaio de resistência à compressão, todas as resistências à compressão obtidas para betões com incorporação de resíduos são inferiores à resistência à compressão do betão de referência, o que leva a que todas as variações percentuais sejam negativas.

De entre todos os resultados obtidos, quer na resistência de provetes cúbicos aos 7 e 28 dias de idade, quer em provetes cilíndricos aos 28 dias, o betão Lm100 foi o que sofreu maior variação relativamente a Bt. O betão Cz50 foi o que apresentou menor variação, inferior a 10% em cubos e a 2% em cilindros.

As variações percentuais dos valores médios registados no ensaio de tração dos betões com resíduos relativamente ao betão de referência encontram-se no Quadro 5-15.

Quadro 5-15: Percentagem de variação dos resultados da resistência à tração dos betões com resíduo relativamente ao betão de referência

Tipo de Betão	Variação - $\Delta$ (%)
Bt	$f_{ct,sp} = 2,91$ MPa
Cz20	-15,42%
Cz50	-24,26%
Cz100	-23,58%
Lm20	-12,03%
Lm50	-31,30%
Lm100	-37,18%

No ensaio de resistência à tração as variações percentuais dos betões praticamente aumentam consoante o aumento da percentagem de incorporação de resíduos. O betão Lm100 é o que sofre maior variação comparativamente com Bt.

### 5.3.2 Comparação com outros estudos

Com vista a sintetizar qualitativamente os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados em betão em estado fresco e em betão em estado endurecido, apresentam-se no Quadro 5-16 os resultados de uma forma que facilmente se perceba se em relação a uma determinada propriedade houve uma melhoria ou não de desempenho dos betões com resíduos em comparação com o betão de referência (Bt).

Quadro 5-16: Consequência da incorporação dos resíduos nas propriedades do betão

Tipo de Betão	Ensaio em estado fresco		Ensaio em estado endurecido								
	Massa Volúmica	Teor de ar	Massa Volúmica			Resistência à Compressão			Resistência à Tração	Absorção de Água por Capilaridade	Absorção de Água por Imersão
			m <sub>x</sub>	m <sub>0</sub>	m <sub>hid</sub>	Cubo 7 dias	Cubo 28 dias	Cilindro 28 dias			
Cz20	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
Cz50	0	-	0	0	0	-	0	-	-	0	0
Cz100	0	-	0	0	0	-	0	-	-	-	-
Lm20	0	-	0	0	0	-	-	-	-	0	-
Lm50	0	-	0	0	0	-	-	-	-	-	0
Lm100	0	-	0	0	0	-	-	-	-	0	0

“+” - melhorou; “-” – não melhorou; “0” – indiferente (considerou-se indiferente quando a variação < 10%)

Pela observação do Quadro 5-16, retiram-se as seguintes conclusões:

- os resultados obtidos para a massa volúmica, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, foram valores satisfatórios, pois, não diferiram muito em relação ao betão de referência Bt,
- o teor de ar presente nos betões com incorporação de resíduos, apresenta valores superiores ao betão de referência;
- quanto aos ensaios mecânicos, observa-se que a incorporação de resíduos resulta numa redução da resistência à compressão e à tração do betão;
- em relação à absorção de água, verifica-se que o comportamento dos betões com resíduos varia consoante a absorção de água é feita por capilaridade ou por imersão, não sendo possível estabelecer uma relação entre a quantidade e o tipo de resíduo e a quantidade de água absorvida.

O Quadro 5-17 sintetiza de forma qualitativa os resultados dos estudos apresentados no capítulo 2 comparativamente com os resultados deste estudo. Estes dados são meramente indicativos, uma vez que os tipos de betões estudados e os resíduos utilizados pelos diversos autores não são comparáveis.

Quadro 5-17: Resumo dos resultados obtidos nos diversos ensaios pelos autores referidos no estado de arte

Estudos	Tipo de Resíduo	Ensaio em betão fresco		Ensaio em betão endurecido				
		Massa Volumica	Teor de ar	Massa Volumica	Resistência à Compressão	Resistência à Tração	Absorção de Água por Capilaridade	Absorção de Água por Imersão
Antunes (2013)	indústria petrolíferos	menor	maior	menor	maior	-	-	maior
Valadares (2009)	pneus usados	menor	-	menor	menor	menor	-	-
Sousa (2005)	casca de arroz	-	-	-	-	-	menor	menor
Silva (2012)	indústria do mármore	menor	-	menor	menor	menor	-	-
Rocha (2014)	pó de vidro	-	-	-	maior	maior	-	-
Park et al (2004)	pó de vidro	-	-	-	menor	menor	-	-
Vieira (2013)	trituração de loiças sanitárias e tijolos reciclados	menor	-	menor	menor	-	menor	-
Costa (2011)	cortiça	menor	menor	menor	menor	menor	menor	menor
Este estudo	lamas de cal e cinzas de biomassa	menor	maior	menor	menor	menor	variável	variável

Observando o quadro anterior verifica-se o seguinte:

- Os betões com resíduos, quer em estado fresco quer em estado endurecido apresentam uma massa volúmica inferior à do betão de referência;
- a resistência à compressão e a resistência à tração dos betões com resíduos é normalmente menor que a resistência do betão de referência, com exceção dos trabalhos de Antunes (2013) e Rocha (2014);
- o comportamento dos betões com resíduos relativamente à sua capacidade de absorção de água é variável, dependendo naturalmente de diversos fatores.

## **5.4 Síntese do capítulo**

Neste capítulo apresentaram-se os resultados obtidos na campanha experimental realizada e procedeu-se a uma análise dos mesmos. Estes resultados foram apresentados primeiro para o estado fresco e, posteriormente, para o estado endurecido. Foram também expostos os resultados de ensaios ambientais executados.

No final do capítulo faz-se uma análise comparativa da entre os betões com incorporação de resíduos e o betão de referência, apresentando as percentagens de variação das principais propriedades e a comparação dos resultados obtidos neste estudo com os estudos mencionados no capítulo 2.

Os resultados obtidos em cada ensaio e em cada provete testado estão expostos em vários Apêndices que podem ser consultados no final deste trabalho.

## 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Pretende-se neste capítulo apresentar as principais conclusões do trabalho e propõem-se um conjunto de sugestões para desenvolvimentos futuros.

### 6.1 Conclusões gerais

A incorporação de resíduos industriais ou naturais na composição de betões é objeto de interesse da comunidade científica e da indústria, quer por uma questão económica, quer por uma questão de sustentabilidade ambiental.

Com este trabalho pretendeu-se dar um contributo nesta área, avaliando-se, através da caracterização experimental dos betões, o potencial da utilização de resíduos de indústrias da região como substitutos do agregado fino. Foi efetuada uma análise comparativa entre os diversos betões produzidos com incorporação de resíduos e um betão de referência.

Aquando da produção constatou-se que o betão com incorporação de resíduos perde trabalhabilidade mais rapidamente que o betão de referência e que quanto maior a taxa de incorporação de resíduos, menor a trabalhabilidade do betão, podendo assim condicionar a utilização de quantidades significativas de resíduo. Um dos aspetos a ter em conta no futuro será avaliar adequadamente as dimensões do resíduo, estimando-se a superfície específica, e, assim, procurar ajustar-se a relação A/C ao tipo de resíduo e à respetiva quantidade.

De seguida, apresentam-se as conclusões mais relevantes deste estudo, quer para o desempenho dos betões em estado fresco, quer em estado endurecido.

#### **Ensaio no estado fresco**

Dos resultados dos ensaios de estado fresco destacam-se as seguintes conclusões:

- Quanto maior presença de resíduos na composição do betão, menos fluidez a mistura possui, pois, perde trabalhabilidade mais rapidamente. Nos betões com incorporação de 100% de ambos os resíduos a presa foi quase imediata, tendo sido bastante difícil o trabalho de enchimento dos moldes. A introdução de resíduos de lamas de cal em 50% e de resíduos de cinzas de biomassa em 20% e 50% não alterou a trabalhabilidade do betão, não se verificando alteração na classe de abaixamento. Relativamente à introdução de resíduos de lamas de cal em 20%, observou-se um aumento de classe de consistência;
- A massa volúmica em estado fresco dos betões com incorporação de resíduos decresceu em relação ao betão de referência. A única exceção observou-se no betão Lm100, cujo valor de massa volúmica aumentou. Nestes termos, com o ensaio da massa volúmica não se conseguiu aferir o impacto da adição de resíduos;
- Verificou-se uma ligeira tendência para o aumento do teor de ar com o aumento da adição de resíduos. Esta situação pode estar relacionada com a maior dificuldade na compactação, deixando mais vazios na mistura.

### **Ensaio no estado endurecido**

No que se refere às conclusões das propriedades avaliadas no estado endurecido, salientam-se as seguintes:

- O ensaio de massa volúmica do betão em estado endurecido revelou que, para todas as três diferentes condições ensaiadas (massa dos provetes logo após a remoção do tanque de cura ( $m_x$ ), massa dos provetes dentro de água ( $m_{hid}$ ) e massa dos provetes secos em estufa ( $m_0$ )), a massa volúmica diminuiu relativamente ao betão de referência. A maior variação pertenceu ao betão Cz20;
- O ensaio de resistência à compressão revelou que os betões com adição de resíduos perdem resistência. As cinzas de biomassa apresentaram melhores resultados, sendo Cz50 o betão que evidenciou um melhor comportamento;
- No ensaio de resistência à tração, a resistência diminuiu proporcionalmente à incorporação de lamas de cal; nas cinzas de biomassa, a resistência à tração também diminuiu, embora de forma variável relativamente à taxa de incorporação do resíduo. O betão Lm20 apresentou o melhor resultado;
- Os resultados dos dois ensaios de absorção de água não permitiram retirar conclusões sobre o efeito da taxa de incorporação de resíduo na capilaridade e na capacidade de absorção do material.

Convém referir que estes ensaios foram realizados utilizando apenas três provetes, condicionando assim as conclusões retiradas dos resultados. Desta forma, dever-se-ia repensar nos ensaios, aumentando o número de provetes e revendo a questão da razão A/C.

Refere-se ainda que o betão Cz20 revelou (para quase todos os ensaios) valores muito diferentes daquilo que era espectável. A causa mais provável passa por algum erro no ato de fabrico do betão.

### **6.2 Desenvolvimentos futuros**

Após o estudo apresentado nesta dissertação subsistem, ainda, questões que poderão ser esclarecidas no futuro. Destacam-se os seguintes desenvolvimentos:

- Caracterizar mais pormenorizadamente a granulometria dos resíduos, possibilitando assim uma análise mais sustentada da quantidade de água a incorporar na amassadura;
- Aumentar a dimensão da amostra como forma de validação dos resultados dos ensaios. Seria ainda interessante efetuar diferentes amassaduras para despistar erros associados ao processo de fabrico;
- Avaliar a durabilidade destes betões, nomeadamente, através de ensaios de envelhecimento acelerado;
- Realizar ensaios de penetração de cloretos e de carbonatação, de modo a perceber até que ponto estes poderão condicionar as propriedades dos betões.



## REFERÊNCIAS

- André, A. J. N. P., 2012. *Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.
- Aguiar, B., Camões, A., Figueiro, R., Cunha, S. e Kheradmand, M. 2014. *Materiais de Construção Sustentáveis*, ISSN 2183-1866, Vol 2, Universidade do Minho.
- Antunes, M. J., 2013. *ECO – Betão com adição de resíduo da indústria petrolífera*. Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Edificações. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- Brito, J., et al (2009) - *Técnicas de Inspeção de Estruturas de Betão Armado*. Slides da cadeira de Patologia e Reabilitação da Construção. Mestrado integrado em Engenharia Civil: Instituto Superior Técnico, 29p.
- Costa, A. & Appleton, J., (2002) - *Estruturas de Betão I: Parte II – Materiais*. Grupo de estruturas de betão pré-esforçado. Instituto Superior Técnico.
- Costa, M. L. B., 2011. *Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça*. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil especialidade de Construções.
- Coutinho, J. S., 1999. *Agregados para argamassa e betões*. Sebenta de Materiais de Construção I. Faculdade de Engenharia do Porto.
- Coutinho, A. S. & Gonçalves, A., (1994) *Fabrico e propriedades do betão – vol. III*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1994 – 2ª Edição.
- Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de março, alterado pelo Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho.
- Elouazzani, D. C.; Mansouri, K. & Fokam, C. B., (2013). *Étude préliminaire de la valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland*. Revue «Nature & Technologie ». A- Sciences fondamentales et Engineering, n° 09/Juin 2013, pag. 13-18.
- Elouazzani, D.C. (2005). *Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie*. Thèse pour l'obtention du Doctorat en Sciences et Techniques du Déchet. École Doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement).
- Eldin, N.N., Senouci, A.B., (1993) “Rubber-tire particles as concrete aggregate”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 4, pag. 478-496

Evangelista, F. (2003) - *Betões executados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil: Instituto Superior Técnico.

Ferreira, M. R., 2000. *Avaliação de Ensaios de Durabilidade de Betão*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do Minho para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Materiais e Reabilitação da Construção – Universidade do Minho.

Ferreira, L. M. M., 2007. *Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados do betão- Influência da pré-saturação*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

Gameiro, F. J. F., 2013. *Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados finos de resíduos da indústria do mármore*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970. E237.- *Betões – Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993. E393.- *Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade*.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993. E394. - *Betões – Determinação da absorção de água por imersão – Ensaio à pressão atmosférica*.

Marques, L. F. A., 2014. *Avaliação do desempenho de argamassas com incorporação de resíduos*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Politécnico de Viseu - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Marques, A. F. M., 2010. *Comportamento ao fogo de betões com agregados reciclados de borracha*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

MINASIT, “*Durabilidade e requinte para a sua obra*”, imagem recuperada a 19 de março de 2016, de <http://www.minasit.com.br/>.

NP EN 203 – 1:2007- “*Especificação, desempenho, produção e conformidade*”.

NP EN 206-1: 2007 - “*Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*”.

NP EN 197-1:2012. “*Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*”.

NP EN 933-1 - Parte 1: *Análise granulométrica – Método de peneiração*. Instituto Português da Qualidade, 2000.

NP EN 933-3 – *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento*. Instituto Português da Qualidade, 2002.

NP EN 933-4 – *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma*. Instituto Português da Qualidade, 2002.

NP EN 933-8: *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio de Equivalente de areia*. Instituto Português da Qualidade, 2002.

NP EN 1008 – *Água de amassadura de betão*”. Instituto Português da Qualidade, 2003.

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

NP EN 1097-3: *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Instituto Português da Qualidade, 2002.

NP EN 1097-6 – *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Instituto Português da Qualidade, 2003.

NP-2064 – *Cimentos – Definições, especificações e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 12350-2 - *Ensaio do betão fresco. - Parte 2: Ensaio de abaixamento*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 12350-6 - *Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 12350-7 - *Ensaio do betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar – Métodos Pressiométricos*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 12390-1:2012 – “*Ensaio do betão endurecido Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*”

NP EN 12390-2:2009 – “*Ensaio do betão endurecido Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*”.

NP EN 12390-3 - *Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 12390-6 - *Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes* Instituto Português da Qualidade, 2003.

NP EN 12390-7 - *Ensaio de betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 12390-19 - *Ensaio de betão endurecido. Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*. Instituto Português da Qualidade, 2009.

EN 12457-4:2002 – “*Characterisation of waste Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (Without or with size reduction)*”.

NP EN 12620 – *Agregados para betão*. Instituto Português da Qualidade, 2004.

NETresíduos – Portal Português da gestão de resíduos - Recuperado a 17 de Novembro de 2015 - <http://www.netresiduos.com/fluxosler.aspx?menuid=102>

Park, S.B., Lee, B.C., Kim, J.H., (2004) “Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate”, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No. 12, pag. 2181-2189.

Pereira, P. S. B., 2010. *Betões Estruturais com Incorporação de Agregados finos Reciclados de Betão – Influência de Superplastificantes*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

PESGRI (2001), Plano Estratégico dos Resíduos Industriais aprovado pelo Decreto-Lei nº 89/2002, de 9 de abril.

Portaria nº209/2004,2004, Lista Europeia de Resíduos (LER). Diário da República, Série N°209, 3 de Março de 2004.

Quina, M. M. J., 2005. *Processos de Inertização e Valorização de Cinzas Volantes – Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química.

Rocha, V. A. M., 2014. *Caracterização de Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras Incorporando Pó de Vidro*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Santos, E. (2013), *Concreto com Sustentabilidade*. Recuperado a 11 de dezembro de 2015, de <http://www.crea-sc.org.br>

Silva, D. C. C., 2012. *Desempenho em Termos Mecânicos de Betões com Incorporação de Agregados Finos Provenientes de Resíduos da Indústria do Mármore*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

Sílvia, M. A. G., 2006. *Utilização de Resíduos Finos de Pedreira no Betão*. Relatório do Projeto Realizado na AGREPOR AGREGADOS S.A.- Programa Operacional Ciência e Inovação, 2010. Departamento de Engenharia de Minas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Sousa, S. P. B., 2005. *Betão Eco-Eficiente com Cinza da Casca de Arroz*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Tran, H., 2008. *Lime Kiln chemistry and effects on kiln operations*. Pulp & Paper Center and Departement of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Canadá.

Valadares, F. V. S., 2009. *Desempenho Mecânico de Betões Estruturais com Granulado de Borracha Proveniente de Pneus Usados*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

Vieira, T. F., 2013. *Betões com incorporação de agregados finos reciclados cerâmicos – Desempenho em termos de durabilidade*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.

Yan, T. S. A., 2013. *Técnicas e Laboratórios de Ensaios de Betão*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade Técnica de Lisboa.



## **APÊNDICES**



# APÊNDICES



## APÊNDICE A – Análise Granulométrica de Agregados segundo NP EN 933-1:2000

No Quadro A-1 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica da areia fina.

Quadro A-1: Análise granulométrica da areia (A1)

AREIA - A1 (fina)				
M1 - Massa total da amostra seca				159,7 g
M2 - Massa seca após lavagem				144,7 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				15,0 g
Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
31,5		0,00	0	100
22,4		0,00	0	100
16		0,00	0	100
8		0,00	0	100
4		0,00	0	100
2		0,00	0	100
1	3,8	2,39	2	98
0,5	24,9	15,59	18	82
0,25	43,4	27,18	45	55
0,125	40,4	25,28	70	30
0,063	30,6	19,17	90	10
0,01	1,6			0
Resto	0,0			
<b>Total</b>	<b>144,7</b>			

No Quadro A-2 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica da areia grossa.

Quadro A-2: Análise granulométrica da areia (A2)

<b>AREIA - A2 (grossa)</b>				
M1 - Massa total da amostra seca				391,4 g
M2 - Massa seca após lavagem				375,3 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				16,1 g
<b>Abertura do peneiro (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Percentagem retida (%)</b>	<b>Percentagem retida acumulada (%)</b>	<b>Percentagem acumulados passados (%)</b>
31,5		0,00	0	100
22,4		0,00	0	100
16		0,00	0	100
8		0,00	0	100
4	0	0,00	0	100
2	106,4	27,18	27	73
1	91,3	23,32	51	49
0,5	65,8	16,80	67	33
0,25	50,3	12,85	80	20
0,125	35,1	8,96	89	11
0,063	25,2	6,45	96	4
0,01	1,2			0
Resto	0,0			
<b>Total</b>	<b>375,3</b>			

No Quadro A-3 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica da brita fina.

Quadro A-3: Análise granulométrica da brita (B1)

<b>BRITA - B1 (fina)</b>				
M1 - Massa total da amostra seca				632,6 g
M2 - Massa seca após lavagem				632,5 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				0,1 g
<b>Abertura do peneiro (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Percentagem retida (%)</b>	<b>Percentagem retida acumulada (%)</b>	<b>Percentagem acumulados passados (%)</b>
31,5	0,0	0,00	0	100
22,4	0,0	0,00	0	100
16	0,0	0,00	0	100
11,2	0,0	0,00	0	100
8	3,1	0,49	0	100
5,6	277,2	43,82	44	56
4	296,5	46,87	91	9
1	55,7	8,80	100	0
0,25		0,00	100	0
0,125		0,00	100	0
0,063		0,00	100	0
0,01				0
Resto				
<b>Total</b>	<b>632,5</b>			

No Quadro A-4 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica da brita grossa.

Quadro A-4: Análise granulométrica da areia (B2)

<b>BRITA - B2 (grossa)</b>				
M1 - Massa total da amostra seca				
M2 - Massa seca após lavagem				6570,9 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				
<b>Abertura do peneiro (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Percentagem retida (%)</b>	<b>Percentagem retida acumulada (%)</b>	<b>Percentagem acumulados passados (%)</b>
31,5	0,0	0,00	0	100
22,4	0,0	0,00	0	100
16	987,3	15,03	15	85
11,2	4213,9	64,13	79	21
8	1128,3	17,17	96	4
5,6	222,3	3,38	100	0
4	19,2	0,29	100	0
1		0,00	100	0
0,25		0,00	100	0
0,125		0,00	100	0
0,063		0,00	100	0
0,01				0
Resto				
<b>Total</b>	<b>6570,9</b>			

## APÊNDICE B – Ensaio de Índice de Achatamento NP EN 933-3:2002

No Quadro B-1 sintetiza-se os resultados alcançados para o índice de achatamento.

Quadro B-1: Ensaio de índice de achatamento

	Fração granulométrica $d_i/D_i$ (mm)	Massa retida da fração granulométrica $d_i/D_i$ (g)	Fração granulométrica $D_i/2$ (mm)	Massa retida da fração granulométrica $D_i/2$ (g)
B1	# 10	0,0	# 6,3	0,0
	# 8	0,0	# 5	0,0
	# 6,3	135,8	# 4	10,8
	# 5	148,0	# 3,5	10,1
	# 4	102,3	# 2,5	5,1
<b>Somatório</b>	M1	<b>386,1</b>	M2	<b>25,9</b>
B2	# 20	0,0	# 10	0,0
	# 16	292,8	# 8	107,6
	# 12,5	1331,5	# 6,3	44,3
	# 10	513,4	# 5	2,3
	# 8	157,9	# 4	2,9
	# 6,3	62,8	-	-
<b>Somatório</b>	M1	<b>2358,4</b>	M2	<b>157,1</b>

## APÊNDICE C – Massa Volúmica - NP EN 1097-6:2003

- Massa volúmica do material impermeável das partículas:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (C.1)$$

- Massa volúmica das partículas secas em estufa:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (C.2)$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (C.3)$$

onde:

- $M_1$  – massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, (g);
- $M_2$  – massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, (g);
- $M_3$  – massa do picnómetro apenas cheio de água, (g);
- $M_4$  – massa do ar do provete seco em estufa, (g).

Através das equações acima mencionadas, chegamos aos resultados da massa volúmica das areias, listadas no Quadro C-1.

Quadro C-1: Massa volúmica das areias

	Areia Fina	Areia Grossa
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm <sup>3</sup> )	1,5193	1,6626
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm <sup>3</sup> )	<b>1,5046</b>	<b>1,5979</b>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm <sup>3</sup> )	1,5143	1,6368

## APÊNDICE D – Baridade e índice de vazios da areia - NP EN1097-3:2002

No Quadro D-1 sintetiza-se os resultados alcançados para a baridade e volume de vazios das duas areias.

Quadro D-1: Resultados da baridade e do volume de vazios das areias

	Volume (dm <sup>3</sup> )	m <sub>1</sub> (kg)	m <sub>2</sub> (kg)	Baridade - $\rho_b$ - (Kg/dm <sup>3</sup> )	Volume de vazios - $\vartheta$ - (%)	Média Baridade - $\rho_b$ - (Kg/dm <sup>3</sup> )	Média Volume de vazios - $\vartheta$ - (%)		
Areia A1 (Fina)	1,000	1,502	2,783	1,28	14,86	<b>1,29</b>	<b>14,49</b>		
			2,786	1,28	14,64				
			2,796	1,29	13,98				
Areia A2 (Grossa)			1,000	1,502	2,967	1,46	8,33	<b>1,47</b>	<b>8,04</b>
					2,965	1,46	8,46		
					2,982	1,48	7,34		

## APÊNDICE E – Análise Granulométrica dos Resíduos segundo NP EN 933-1 2000

No Quadro E-1 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica dos resíduos de cinzas de biomassa.

Quadro E-1: Análise granulométrica das cinzas de biomassa

CINZAS DE BIOMASSA				
M1 - Massa total da amostra seca				164,2 g
M2 - Massa seca após lavagem				164,2 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				
Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
31,5		0,00	0	100
22,4		0,00	0	100
16		0,00	0	100
8		0,00	0	100
4		0,00	0	100
2	0,0	0,00	0	100
1	28,5	17,35	17	83
0,5	38,8	23,64	41	59
0,25	33,7	20,51	61	39
0,125	24,7	15,03	77	23
0,063	20,9	12,73	89	11
0,01	12,5			0
Resto	5,0			
<b>Total</b>	<b>164,1</b>			

No Quadro E-2 sintetiza-se os resultados alcançados para a análise granulométrica dos resíduos de lamas de cal.

Quadro E-2: Análise granulométrica das lamas de cal

<b>LAMAS DE CAL</b>				
M1 - Massa total da amostra seca				172,0 g
M2 - Massa seca após lavagem				172,0 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem (M1-M2)				
<b>Abertura do peneiro (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Percentagem retida (%)</b>	<b>Percentagem retida acumulada (%)</b>	<b>Percentagem acumulados passados (%)</b>
31,5		0,00	0	100
22,4		0,00	0	100
16		0,00	0	100
8		0,00	0	100
4	0	0,00	0	100
2	15,8	9,16	9	91
1	7,4	4,30	13	87
0,5	5,3	3,10	17	83
0,25	4,4	2,53	19	81
0,125	4,1	2,38	21	79
0,063	21,5	12,51	34	66
0,01	113,2			0
Resto	0,0			
<b>Total</b>	<b>171,6</b>			

## APÊNDICE F – Resultado do ensaio de determinação do teor de ar – Método pressiométrico

Do Quadro F-1 ao Quadro F-3 sintetizam-se os resultados alcançados para a calibração da campânula, para posterior determinação do teor de ar no betão.

Quadro F-1: Massa do recipiente cheio de água com vidro

Massa do recipiente cheio água + vidro (m <sup>2</sup> )	1º pesagem	12721
	2º pesagem	12721
	3º pesagem	12721
<b>Média (g)</b>		<b>12721</b>

Quadro F-2: Processo de calibração

<b>Operação de Calibração</b>	<b>(g)</b>
massa do recipiente vazio + vidro (m1)	5780
massa do recipiente cheio água + vidro (m2)	12722

Quadro F-3: Processo de calibração

	<b>1.ª Operação de Calibração</b>		<b>2ª Operação de Calibração</b>	
	<b>(g)</b>	<b>A1 (%)</b>	<b>(g)</b>	<b>A1 (%)</b>
massa do recipiente cheio de água (m <sup>2</sup> )	7132	<b>4,91</b>	7132	<b>4,93</b>
massa de água deslocada (m <sup>3</sup> )	350		352	

No Quadro F-4 e no Quadro F-5 sintetizam-se os resultados alcançados para a determinação do fator de correção dos agregados e a determinação do teor de ar no betão em estado fresco, respetivamente.

Quadro F-4: Determinação do fator de correção dos agregados

Tipo de Betão	Determinação do fator de correção dos agregados			
	G (<0,1%)			
Bt	h1	3,5	0	0
	h2	3,5		
	h3	3,5	0	
	h4	3,5		
Cz 20	h1	4,7	0,1	0,1
	h2	4,6		
	h3	4,7	0,1	
	h4	4,6		
Lm 20	h1	4,6	0	0
	h2	4,6		
	h3	3,6	0	
	h4	3,6		
Cz 50	h1	3,5	0,1	0,05
	h2	3,4		
	h3	3,5	0	
	h4	3,5		
Lm 50	h1	4,6	0,1	0,05
	h2	4,5		
	h3	4,5	0	
	h4	4,5		
Cz 100	h1	4,8	0,1	0,1
	h2	4,7		
	h3	4,5	0,1	
	h4	4,6		
Lm 100	h1	3,1	0	0,05
	h2	3,1		
	h3	3,2	0,1	
	h4	3,3		

Quadro F-5: Valores de teor de ar no betão fresco

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>A<sub>1</sub> (%)</b>	<b>G (%)</b>	<b>A<sub>c</sub> = A<sub>1</sub> - G (%)</b>
Bt	19996,50	1,40	0,00	1,40
Cz 20	19645,70	1,60	0,10	1,50
Lm 20	19817,00	1,60	0,00	1,60
Cz 50	19625,20	2,30	0,05	2,25
Lm 50	19770,10	1,70	0,05	1,65
Cz 100	19682,70	2,90	0,10	2,80
Lm 100	20470,00	3,10	0,05	3,05

## APÊNDICE G – Massa Volúmica do Betão Endurecido NP EN12390-7:2009

No Quadro G-1, sintetizam-se os resultados alcançados para a massa dos provetes em estado endurecido.

Quadro G-1: Massa dos provetes

Tipo de Betão	Provete	Massa provete saturado (g) [mx]	Massa hidrostática do provete (g) [m <sub>hid</sub> ]	Massa provete seco em estufa (g) [mo]
Bt	Bt_04	8038,0	4650,7	7559,2
	Bt_05	8175,1	4725,7	7671,3
	Bt_06	8149,2	4714,1	7673,2
	Média	<b>8120,8</b>	<b>4696,8</b>	<b>7634,6</b>
Cz20	Cz20_04	7815,6	4420,9	7189,5
	Cz20_05	7827,2	4434,2	7153,6
	Cz20_06	7789,2	4407,2	7156,8
	Média	<b>7810,7</b>	<b>4420,8</b>	<b>7166,6</b>
Lm20	Lm20_04	7974,2	4580,2	7404,3
	Lm20_05	8012,0	4598,3	7439,0
	Lm20_06	7909,4	4533,2	7336,8
	Média	<b>7965,2</b>	<b>4570,6</b>	<b>7393,4</b>
Cz50	Cz50_04	8123,8	4643,8	7599,2
	Cz50_05	8003,7	4577,1	7482,7
	Cz50_06	8134,7	4649,7	7607,2
	Média	<b>8087,4</b>	<b>4623,5</b>	<b>7563,0</b>
Lm50	Lm50_04	8097,7	4679,8	7569,1
	Lm50_05	8061,5	4648,1	7511,8
	Lm50_06	8099,2	4666,5	7548,2
	Média	<b>8086,1</b>	<b>4664,8</b>	<b>7543,0</b>
Cz100	Cz100_04	7943,4	4475,0	7507,7
	Cz100_05	7966,7	4507,6	7547,2
	Cz100_06	7942,3	4475,5	7483,5
	Média	<b>7950,8</b>	<b>4486,0</b>	<b>7512,8</b>
Lm100	Lm100_04	8149,3	4677,4	7703,8
	Lm100_05	8108,3	4642,4	7482,6
	Lm100_06	8032,4	4600,9	7416,8
	Média	<b>8096,7</b>	<b>4640,2</b>	<b>7534,4</b>

No Quadro G-2, sintetiza-se os resultados alcançados para a massa volúmica do betão em betão endurecido

Quadro G-2: Massa volúmica dos betões

Tipo de Betão	Tipo de massa	Massa (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Bt	mx	8,1208	0,0033750	2406
	m <sub>hid</sub>	4,6968		1391
	mo	7,6346		2262
Cz20	mx	7,8107		2314
	m <sub>hid</sub>	4,4208		1309
	mo	7,1666		2123
Lm20	mx	7,9652		2360
	m <sub>hid</sub>	4,5706		1354
	mo	7,3934		2190
Cz50	mx	8,0874		2396
	m <sub>hid</sub>	4,6235		1369
	mo	7,5630		2240
Lm50	mx	8,0861		2395
	m <sub>hid</sub>	4,6648		1382
	mo	7,5430		2234
Cz100	mx	7,9508		2355
	m <sub>hid</sub>	4,4860		1329
	mo	7,5128		2226
Lm100	mx	8,0967		2399
	m <sub>hid</sub>	4,6402		1374
	mo	7,5344		2232

## APÊNDICE H – Resistência à compressão dos provetes segundo a norma NP EN 12390-3:2009

Do Quadro H-1 ao Quadro H-4, sintetizam-se os resultados alcançados para a resistência à compressão dos provetes.

Quadro H-1: Resistência à compressão de cubos com 7 dias de idade

Tipo de Betão	Provete	Área da face carregada (mm <sup>2</sup> )	Massa do provete (g)	Força de Rotura (kN)	Tensão $\sigma$ (MPa)
BT	BT_01	22660	7975,6	739,9	32,65
	BT_02	23068	8118,9	795,2	34,47
	BT_03	22838	8055,6	762,1	33,37
Cz	Cz20_01	22825	7842,6	590,0	25,85
	Cz20_02	22875	7849,5	595,3	26,02
	Cz20_03	22873	7797,0	551,4	24,11
	Cz50_01	22937	7981,1	640,0	27,90
	Cz50_02	23480	8086,1	667,4	28,42
	Cz50_03	23070	7938,1	675,4	29,27
	Cz100_01	23712	8055,5	594,8	25,08
	Cz100_02	23495	8162,5	679,0	28,90
	Cz100_03	23866	8098,5	325,2	13,63
Lm	Lm20_01	22938	7985,1	654,8	28,55
	Lm20_02	23014	8029,5	648,0	28,16
	Lm20_03	22938	7967,8	633,9	27,63
	Lm50_01	23063	8037,5	580,6	25,17
	Lm50_02	22762	7939,5	585,2	25,71
	Lm50_03	23363	8121,5	598,1	25,60
	Lm100_01	22920	8074,5	601,4	26,24
	Lm100_02	23012	7975,0	549,3	23,87
	Lm100_03	22953	7982,0	534,4	23,28

Quadro H-2: Resistência à compressão de cubos com 28 dias de idade

Tipo de Betão	Provete	Área da face carregada (mm <sup>2</sup> )	Massa do provete (g)	Força de Rotura (kN)	Tensão $\sigma$ (MPa)
BT	BT_01	23116	8139,0	907,5	39,26
	BT_02	23036	8135,5	928,6	40,31
	BT_03	22737	8034,5	903,9	39,75
Cz	Cz20_01	23031	23031,5	718,0	31,17
	Cz20_02	23001	23001,8	719,5	31,28
	Cz20_03	22965	22965,3	730,4	31,80
	Cz50_01	23205	8021,0	876,0	37,75
	Cz50_02	23058	8051,0	801,1	34,74
	Cz50_03	23280	8019,0	846,3	36,35
	Cz100_01	23025	7935,0	796,9	34,61
	Cz100_02	22935	7948,0	837,6	36,52
	Cz100_03	23387	8105,0	840,9	35,96
Lm	Lm20_01	22785	7995,0	737,7	32,38
	Lm20_02	22749	7892,0	758,5	33,34
	Lm20_03	22906	7986,0	760,5	33,20
	Lm50_01	23223	8146,0	638,1	27,48
	Lm50_02	22882	8012,0	698,6	30,53
	Lm50_03	22937	8027,0	680,6	29,67
	Lm100_01	23299	8092,5	614,2	26,36
	Lm100_02	23013	7993,0	567,7	24,67
	Lm100_03	23281	8115,5	640,8	27,52

Quadro H-3: Resistência à compressão de cilindros com 28 dias de idade

Tipo de Betão	Provete	Área da face carregada (mm <sup>2</sup> )	Massa do provete (g)	Força de Rotura (kN)	Tensão $\sigma$ (MPa)
BT	BT_01	20060	12650,0	600,6	29,94
	BT_02	17695	12800,0	581,4	32,86
	BT_03	17444	12700,0	596,7	34,21
Cz	Cz20_01	17742	12215,0	527,5	29,73
	Cz20_02	17343	12277,0	540,3	31,15
	Cz20_03	17530	12224,0	498,3	28,42
	Cz50_01	17632	1230,0	549,3	31,15
	Cz50_02	17624	1230,0	547,8	31,08
	Cz50_03	17506	1245,0	579,0	33,07
	Cz100_01	17687	1235,0	482,5	27,28
	Cz100_02	17663	1225,0	580,1	32,84
	Cz100_03	17671	1200,0	569,5	32,23
Lm	Lm20_01	17561	1250,0	541,5	30,83
	Lm20_02	17514	1240,0	558,9	31,91
	Lm20_03	17687	1270,0	524,4	29,65
	Lm50_01	17569	12787,0	505,6	28,78
	Lm50_02	17640	12550,0	476,8	27,03
	Lm50_03	17640	12569,5	496,1	28,12
	Lm100_01	17257	12652,0	441,3	25,57
	Lm100_02	17750	12298,0	441,3	24,86
	Lm100_03	17421	12386,5	447,6	25,69

No Quadro H-4, sintetizam-se todos os resultados alcançados para a resistência à compressão dos provetes (resumo).

Quadro H-4: Resultados dos ensaios de compressão

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Provete</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Identificação do provete</b>	<b>Tensão <math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>Valor Médio (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>
<b>Bt</b>	Cubo	7	0.1	32,65	33,49	0,91	2,73
			0.2	34,47			
			0.3	33,37			
	Cubo	28	0.7	39,26	39,77	0,52	1,32
			0.8	40,31			
			0.9	39,75			
	Cilindro	28	13	29,94	32,33	2,18	6,74
			14	32,86			
			15	34,21			
<b>Cz20</b>	Cubo	7	0.1	25,85	25,32	1,06	4,18
			0.2	26,02			
			0.3	24,11			
	Cubo	28	0.7	31,17	31,42	0,33	1,07
			0.8	31,28			
			0.9	31,80			
	Cilindro	28	16	29,73	29,77	1,36	4,58
			17	31,15			
			18	28,42			
<b>Cz50</b>	Cubo	7	0.1	27,90	28,53	0,69	2,42
			0.2	28,42			
			0.3	29,27			
	Cubo	28	0.7	38,94	37,38	1,68	4,49
			0.8	35,60			
			0.9	37,62			
	Cilindro	28	16	31,15	31,76	1,12	3,55
			17	31,08			
			18	33,07			
<b>Cz100</b>	Cubo	7	0.1	25,08	26,99	2,69	9,99
			0.2	28,90			
			0.3	0,00			
	Cubo	28	0.7	35,42	36,67	1,08	2,96
			0.8	37,23			
			0.9	37,37			
	Cilindro	28	19	27,28	30,78	3,04	9,90
			20	32,84			
			21	32,23			

<b>Lm20</b>	Cubo	7	0.1	28,55	28,11	0,45	1,62
			0.2	28,16			
			0.3	27,63			
	Cubo	28	0.7	32,38	32,97	0,52	1,58
			0.8	33,34			
			0.9	33,20			
Cilindro	28	19	30,83	30,79	1,13	3,67	
		20	31,91				
		21	29,65				
<b>Lm50</b>	Cubo	7	0.1	25,17	25,49	0,28	1,10
			0.2	25,71			
			0.3	25,60			
	Cubo	28	0.7	27,48	29,22	1,57	5,38
			0.8	30,53			
			0.9	29,67			
Cilindro	28	22	28,78	27,97	0,88	3,15	
		23	27,03				
		24	28,12				
<b>Lm100</b>	Cubo	7	0.1	26,24	24,46	1,56	6,39
			0.2	23,87			
			0.3	23,28			
	Cubo	28	0.7	26,36	26,18	1,43	5,48
			0.8	24,67			
			0.9	27,52			
Cilindro	28	22	25,57	25,37	0,44	1,77	
		23	24,86				
		24	25,69				

## APÊNDICE I – Resistência à tração por compressão diametral de provetes NP EN 12390-6:2003

No Quadro I-1, sintetiza-se os resultados alcançados para a resistência à tração por compressão diametral.

Quadro I -1: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

Tipo de Betão	Provete	Força (kN)		$\sigma$ (MPa)		$f_{ct,sp}$ (MPa)		$f_{ct}$ (MPa)		Desvio Padrão	Coefficiente Variação (%)
BT	1	212,2	205,83	3,00	2,91	3,00	2,91	2,70	2,62	0,26	0,1001
	2	222,5		3,15		3,15		2,83			
	3	182,8		2,59		2,59		2,33			
Cz20	1	188,5	174,10	2,56	2,43	2,67	2,46	2,40	2,22	0,26	0,1165
	2	182,9		2,59		2,59		2,33			
	3	150,9		2,14		2,13		1,92			
Cz50	1	146,8	155,90	2,08	2,21	2,08	2,21	1,87	1,98	0,18	0,0908
	2	172,2		2,44		2,44		2,19			
	3	148,7		2,11		2,10		1,89			
Cz100	1	163,4	157,30	2,31	2,23	2,31	2,23	2,08	2,00	0,07	0,0337
	2	153,9		2,18		2,18		1,96			
	3	154,6		2,19		2,19		1,97			
Lm20	1	173,7	181,07	3,86	4,02	2,46	2,56	2,21	2,31	0,20	0,0877
	2	170,2		3,78		2,41		2,17			
	3	199,3		4,43		2,82		2,54			
Lm50	1	145,8	141,40	2,06	2,00	2,06	2,00	1,86	1,80	0,05	0,0270
	2	138,9		1,97		1,97		1,77			
	3	139,5		1,98		1,97		1,78			
Lm100	1	122,9	129,30	1,74	1,83	1,74	1,83	1,56	1,65	0,17	0,1043
	2	144,8		2,05		2,05		1,84			
	3	120,2		1,70		1,70		1,53			

## APÊNDICE J – Determinação de absorção de água por capilaridade - Especificação LNEC - E393-1993

Do Quadro J-1 ao Quadro J-7 sintetiza-se todos os resultados alcançados para as várias pesagens do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Quadro J-1: Determinação da massa dos provetes (pesagens 1 e 2)

Tipo de Betão	Provete	M_0h (g)	Média_0h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_1h (g)	Média_1h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7467,5	7535,5	65,47	0,87	7503,0	7569,3	60,17	0,79
	0.5	7598,1				7620,4			
	0.6	7541,0				7584,6			
Cz20	0.4	7201,0	7196,6	22,32	0,31	7215,5	7210,5	21,44	0,30
	0.5	7216,5				7229,0			
	0.6	7172,5				7187,0			
Cz50	0.4	7588,5	7554,6	65,65	0,87	7608,5	7576,1	62,61	0,83
	0.5	7479,0				7504,0			
	0.6	7596,5				7616,0			
Cz100	0.4	7366,0	7368,1	28,31	0,38	7389,0	7391,5	28,33	0,38
	0.5	7397,5				7421,0			
	0.6	7341,0				7364,5			
Lm20	0.4	7394,5	7383,8	49,86	0,68	7407,0	7396,8	50,52	0,68
	0.5	7427,5				7441,5			
	0.6	7329,5				7342,0			
Lm50	0.4	7563,5	7535,6	28,00	0,37	7576,5	7550,8	27,10	0,36
	0.5	7507,5				7522,5			
	0.6	7536,0				7553,5			
Lm100	0.4	7556,5	7502,5	59,32	0,79	7576,0	7523,5	57,23	0,76
	0.5	7512,0				7532,0			
	0.6	7439,0				7462,5			

Quadro J-2: Determinação da massa dos provetes (pesagens 3 e 4)

Tipo de Betão	Provete	M_2h (g)	Média_2h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_3h (g)	Média_3h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7553,5	7626,5	63,27	0,83	7559,0	7631,3	62,67	0,82
	0.5	7665,5				7669,0			
	0.6	7660,5				7665,0			
Cz20	0.4	7227,0	7221,8	21,72	0,30	7233,0	7227,7	21,99	0,30
	0.5	7240,5				7246,0			
	0.6	7198,0				7203,0			
Cz50	0.4	7614,0	7582,6	62,68	0,83	7620,0	7590,3	61,57	0,81
	0.5	7510,5				7519,0			
	0.6	7623,5				7631,0			
Cz100	0.4	7395,5	7398,1	28,59	0,39	7404,0	7407,3	27,86	0,38
	0.5	7428,0				7436,0			
	0.6	7371,0				7381,0			
Lm20	0.4	7412,5	7402,5	50,25	0,68	7418,0	7408,8	49,71	0,67
	0.5	7447,0				7453,0			
	0.6	7348,0				7355,0			
Lm50	0.4	7580,0	7553,3	27,81	0,37	7584,0	7555,7	29,26	0,39
	0.5	7524,5				7526,0			
	0.6	7555,5				7556,0			
Lm100	0.4	7583,0	7537,0	47,85	0,63	7593,5	7545,2	53,61	0,71
	0.5	7540,5				7554,5			
	0.6	7487,5				7487,5			

Quadro J-3: Determinação da massa dos provetes (pesagens 5 e 6)

Tipo de Betão	Provete	M_4h (g)	Média_4h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_5h (g)	Média_5h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7564,5	7636,7	62,54	0,82	7569,0	7640,8	62,23	0,81
	0.5	7675,0				7678,5			
	0.6	7670,5				7675,0			
Cz20	0.4	7238,0	7233,2	21,17	0,29	7244,5	7241,5	20,17	0,28
	0.5	7251,5				7260,0			
	0.6	7210,0				7220,0			
Cz50	0.4	7626,0	7596,8	61,21	0,81	7631,0	7602,1	61,54	0,81
	0.5	7526,5				7531,5			
	0.6	7638,0				7644,0			
Cz100	0.4	7410,5	7410,2	28,00	0,38	7422,0	7424,1	27,31	0,37
	0.5	7438,0				7452,5			
	0.6	7382,0				7398,0			
Lm20	0.4	7424,0	7414,8	48,90	0,66	7430,5	7420,3	49,05	0,66
	0.5	7458,5				7463,5			
	0.6	7362,0				7367,0			
Lm50	0.4	7587,5	7558,8	29,01	0,38	7591,9	7563,3	28,45	0,38
	0.5	7529,5				7535,0			
	0.6	7559,5				7563,0			
Lm100	0.4	7601,0	7552,7	54,56	0,72	7609,5	7562,5	55,68	0,74
	0.5	7563,5				7577,0			
	0.6	7493,5				7501,0			

Quadro J-4: Determinação da massa dos provetes (pesagens 7 e 8)

Tipo de Betão	Provete	M_6h (g)	Média_6h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_7h (g)	Média_7h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7573,5	7643,7	60,77	0,79	7578,0	7648,2	60,77	0,79
	0.5	7678,5				7684,0			
	0.6	7679,0				7682,5			
Cz20	0.4	7249,0	7246,0	21,66	0,30	7255,0	7251,7	21,69	0,30
	0.5	7266,0				7271,5			
	0.6	7223,0				7228,5			
Cz50	0.4	7634,0	7605,8	60,85	0,80	7636,5	7609,0	61,08	0,80
	0.5	7536,0				7539,0			
	0.6	7647,5				7651,5			
Cz100	0.4	7429,5	7431,6	27,81	0,37	7434,5	7436,6	27,31	0,37
	0.5	7460,5				7465,0			
	0.6	7405,0				7410,5			
Lm20	0.4	7435,0	7426,0	48,14	0,65	7440,0	7430,0	48,77	0,66
	0.5	7469,0				7473,0			
	0.6	7374,0				7377,0			
Lm50	0.4	7594,5	7566,1	28,50	0,38	7595,0	7567,8	27,25	0,36
	0.5	7537,5				7540,5			
	0.6	7566,5				7568,0			
Lm100	0.4	7614,5	7578,5	58,08	0,77	7623,0	7587,5	58,06	0,77
	0.5	7609,5				7619,0			
	0.6	7511,5				7520,5			

Quadro J-5: Determinação da massa dos provetes (pesagens 9 e 10)

Betão	Provete	M_8h (g)	Média_8h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_24h (g)	Média_24h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7581,5	7651,3	60,48	0,79	7630,0	7694,7	56,38	0,73
	0.5	7686,5				7720,5			
	0.6	7686,0				7733,5			
Cz20	0.4	7258,0	7254,3	21,24	0,29	7337,5	7334,3	21,43	0,29
	0.5	7273,5				7354,0			
	0.6	7231,5				7311,5			
Cz50	0.4	7640,0	7613,7	59,48	0,78	7688,0	7670,2	59,78	0,78
	0.5	7545,0				7603,5			
	0.6	7654,5				7719,0			
Cz100	0.4	7445,0	7446,3	27,30	0,37	7499,0	7501,7	28,81	0,38
	0.5	7475,0				7531,0			
	0.6	7420,5				7473,5			
Lm20	0.4	7443,5	7434,2	48,68	0,65	7507,5	7495,3	48,41	0,65
	0.5	7477,5				7536,5			
	0.6	7381,5				7442,0			
Lm50	0.4	7596,0	7569,3	26,75	0,35	7620,5	7594,7	25,51	0,34
	0.5	7542,5				7569,5			
	0.6	7569,5				7594,0			
Lm100	0.4	7636,5	7596,8	58,62	0,77	7689,5	7656,8	44,62	0,58
	0.5	7624,5				7675,0			
	0.6	7529,5				7606,0			

Quadro J-6: Determinação da massa dos provetes (pesagens 11 e 12)

Tipo de Betão	Provete	M_48h (g)	Média_48h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_72h (g)	Média_72h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7664,0	7724,5	54,43	0,70	7692,0	7750,7	55,57	0,72
	0.5	7740,0				7757,5			
	0.6	7769,5				7802,5			
Cz20	0.4	7420,0	7420,3	21,00	0,28	7469,0	7469,8	21,76	0,29
	0.5	7441,5				7492,0			
	0.6	7399,5				7448,5			
Cz50	0.4	7721,0	7713,8	58,08	0,75	7753,0	7750,2	58,30	0,75
	0.5	7652,5				7690,5			
	0.6	7768,0				7807,0			
Cz100	0.4	7553,0	7555,5	30,33	0,40	7607,0	7610,3	31,63	0,42
	0.5	7587,0				7643,5			
	0.6	7526,5				7580,5			
Lm20	0.4	7553,0	7539,3	44,60	0,59	7586,5	7569,5	43,09	0,57
	0.5	7575,5				7601,5			
	0.6	7489,5				7520,5			
Lm50	0.4	7645,0	7616,6	24,95	0,33	7675,5	7634,7	35,37	0,46
	0.5	7598,0				7613,5			
	0.6	7607,0				7615,0			
Lm100	0.4	7703,5	7681,6	39,56	0,52	7735,5	7717,0	34,23	0,44
	0.5	7705,5				7738,0			
	0.6	7636,0				7677,5			

Quadro J-7: Determinação da massa dos provetes (pesagens 13 e 14)

Tipo de Betão	Provete	M_96h (g)	Média_96h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	M_120h (g)	Média_120h (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	0.4	7714,5	7770,8	55,76	0,72	7733,0	7786,8	55,85	0,72
	0.5	7772,0				7783,0			
	0.6	7826,0				7844,5			
Cz20	0.4	7508,0	7511,0	22,65	0,30	7540,0	7544,8	23,13	0,31
	0.5	7535,0				7570,0			
	0.6	7490,0				7524,5			
Cz50	0.4	7765,5	7765,8	60,00	0,77	7782,5	7788,0	61,43	0,79
	0.5	7706,0				7729,5			
	0.6	7826,0				7852,0			
Cz100	0.4	7629,5	7630,8	32,02	0,42	7649,0	7654,8	36,60	0,48
	0.5	7663,5				7694,0			
	0.6	7599,5				7621,5			
Lm20	0.4	7612,5	7591,8	42,00	0,55	7640,0	7616,8	41,43	0,54
	0.5	7619,5				7641,5			
	0.6	7543,5				7569,0			
Lm50	0.4	7689,5	7651,4	33,02	0,43	7703,0	7665,5	32,52	0,42
	0.5	7633,5				7648,5			
	0.6	7631,2				7645,0			
Lm100	0.4	7758,5	7742,3	30,19	0,39	7787,5	7774,6	28,97	0,37
	0.5	7761,0				7795,0			
	0.6	7707,5				7741,5			

O cálculo da percentagem de absorção por capilaridade, foi efetuado pela expressão 4.7. Do Quadro J-8 ao Quadro J-14 apresentam-se o cálculo da percentagem de absorção por para os vários betões estudados.

Quadro J-8: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Bt

<b>Bt</b>					
<b>Provete</b>	<b>mi (g)</b>	<b>mo (g)</b>	<b>mi - mo (g)</b>	<b>Área face inferior (mm)</b>	<b>Absorção Capilaridade em ti (g/mm<sup>2</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>
m_1h (g)	7569,3	7535,5	33,8	22226	1,52
m_2h (g)	7626,5		90,9		4,09
m_3h (g)	7631,3		95,8		4,31
m_4h (g)	7636,6		101,3		4,55
m_5h (g)	7640,8		105,3		4,74
m_6h (g)	7643,6		108,1		4,87
m_7h (g)	7648,1		112,6		5,07
m_8h (g)	7651,3		115,0		5,21
m_24h (g)	7694,6		159,1		7,16
m_48h (g)	7724,5		188,9		8,50
m_72h (g)	7750,6		215,1		9,68
m_96h (g)	7770,8		235,3		1,06
m_120h (g)	7786,8		251,3		1,13

Quadro J-9: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Cz20

Cz20					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>
m_1h (g)	7210,5	7196,7	13,8	22537	0,61
m_2h (g)	7221,8		25,1		1,12
m_3h (g)	7227,6		31,0		1,38
m_4h (g)	7233,1		36,5		1,62
m_5h (g)	7241,5		44,8		1,99
m_6h (g)	7246,0		49,		2,19
m_7h (g)	7251,6		55,0		2,40
m_8h (g)	7254,3		57,7		2,56
m_24h (g)	7334,3		137,7		6,11
m_48h (g)	7420,3		223,6		9,92
m_72h (g)	7469,8		273,1		12,1
m_96h (g)	7511,0		314,3		13,9
m_120h (g)	7544,8		348,1		15,4

Quadro J-10: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em C50

Cz50					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>
m_1h (g)	7576,1	7554,7	21,5	22535	0,954
m_2h (g)	7582,6		28,0		1,24
m_3h (g)	7590,3		35,6		1,58
m_4h (g)	7596,8		42,1		1,87
m_5h (g)	7602,1		47,5		2,11
m_6h (g)	7605,8		51,1		2,27
m_7h (g)	7609,0		54,3		2,41
m_8h (g)	7613,1		58,5		2,60
m_24h (g)	7670,1		115,0		5,13
m_48h (g)	7713,8		159,7		7,06
m_72h (g)	7750,1		195,0		8,68
m_96h (g)	7765,8		211,1		9,37
m_120h (g)	7788,0		233,3		1,04

Quadro J-11: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Cz100

Cz100					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>
m_1h (g)	7391,5	7368,2	23,3	22536	1,04
m_2h (g)	7398,1		30,0		1,33
m_3h (g)	7407,3		39,1		1,74
m_4h (g)	7410,1		42,0		1,86
m_5h (g)	7424,1		56,0		2,48
m_6h (g)	7431,6		63,5		2,82
m_7h (g)	7436,6		68,5		3,04
m_8h (g)	7446,8		78,6		3,49
m_24h (g)	7501,1		133,0		5,90
m_48h (g)	7555,5		187,3		8,31
m_72h (g)	7610,3		242,1		10,7
m_96h (g)	7630,8		262,6		11,7
m_120h (g)	7654,8		286,6		12,7

Quadro J-12: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Lm20

Lm20					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>
m_1h (g)	7396,8	7383,8	13,0	22538	0,58
m_2h (g)	7402,5		18,6		0,83
m_3h (g)	7408,8		25,0		1,11
m_4h (g)	7414,8		31,0		1,38
m_5h (g)	7420,3		36,5		1,62
m_6h (g)	7426,0		42,1		1,87
m_7h (g)	7430,0		46,1		2,05
m_8h (g)	7434,1		50,3		2,23
m_24h (g)	7495,3		111,0		4,95
m_48h (g)	7539,3		155,5		6,90
m_72h (g)	7569,5		185,6		8,24
m_96h (g)	7591,8		208,0		9,23
m_120h (g)	7616,8		233,0		10,3

Quadro J-13: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Lm50

Lm50					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> )
m_1h (g)	7550,8	7535,7	15,1	22553	0,67
m_2h (g)	7553,3		17,6		0,78
m_3h (g)	7555,6		20,0		0,89
m_4h (g)	7558,8		23,1		1,03
m_5h (g)	7563,3		27,6		1,23
m_6h (g)	7566,1		30,5		1,30
m_7h (g)	7567,8		32,1		1,40
m_8h (g)	7569,3		33,6		1,49
m_24h (g)	7594,6		59,0		2,62
m_48h (g)	7616,6		81,0		3,59
m_72h (g)	7634,6		99,0		4,39
m_96h (g)	7651,4		115,3		5,13
m_120h (g)	7665,5		129,8		5,76

Quadro J-14: Cálculo da percentagem de absorção por capilaridade em Lm100

Lm100					
Provete	mi (g)	mo (g)	mi - mo (g)	Área face inferior (mm)	Absorção Capilaridade em ti (g/mm <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>
m_1h (g)	7523,5	7502,5	21,0	22522	0,93
m_2h (g)	7537,0		34,5		1,53
m_3h (g)	7545,1		42,6		1,89
m_4h (g)	7552,6		50,1		2,23
m_5h (g)	7562,5		60,0		2,66
m_6h (g)	7578,5		76,0		3,37
m_7h (g)	7587,5		85,0		3,77
m_8h (g)	7596,8		94,3		4,19
m_24h (g)	7656,8		154,3		6,85
m_48h (g)	7681,6		179,7		7,96
m_72h (g)	7717,0		214,5		9,52
m_96h (g)	7742,3		239,8		10,6
m_120h (g)	7774,6		272,1		12,1

## APÊNDICE K – Determinação de absorção de água por Imersão - Especificação LNEC - E394-1993

Do Quadro K1 ao Quadro K-5 apresentam-se os resultados para o ensaio de determinação de absorção de água por imersão.

Quadro K-1: Determinação da massa  $m_1$  dos provetes

m1 - massa do provete saturado (g) / por provete													
Tipo de betão	Tempo (h)	Provete 1	Média (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	Provete 2	Média (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)	Provete 3	Média (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
Bt	24h	8145,4	8151,7	5,45	0,07	8151,4	8155,5	3,60	0,04	8115,2	8120,8	4,84	0,06
	48h	8154,3				8157,2				8123,1			
	72h	8155,3				8158,0				8124,0			
Cz20	24h	7867,5	7876,4	8,80	0,11	7774,9	7782,7	8,18	0,11	7758,9	7765,9	6,95	0,09
	48h	7876,7				7781,9				7766,1			
	72h	7885,1				7791,2				7772,8			
Cz50	24h	8067,2	8068,0	0,70	0,01	8026,2	8027,4	1,37	0,02	7868,2	7870,2	1,80	0,02
	48h	8068,3				8027,2				7870,9			
	72h	8068,5				8028,9				7871,6			
Cz100	24h	8029,4	8036,7	6,37	0,08	7790,1	7796,8	5,92	0,08	8147,6	8156,0	7,35	0,09
	48h	8039,9				7799,0				8159,4			
	72h	8040,9				7801,3				8161,1			
Lm20	24h	7909,5	7914,6	7,82	0,10	7940,7	7946,3	6,30	0,08	8024,9	8029,7	5,19	0,06
	48h	7910,7				7945,0				8029,0			
	72h	7923,6				7953,1				8035,2			
Lm50	24h	7922,5	7933,1	9,23	0,12	8112,0	8123,7	10,16	0,13	8085,6	8096,0	9,09	0,11
	48h	7937,8				8128,4				8099,7			
	72h	7939,1				8130,6				8102,6			
Lm100	24h	8096,7	8106,0	8,43	0,10	7996,5	8002,8	6,16	0,08	8078,9	8082,0	3,05	0,04
	48h	8108,3				8003,2				8082,0			
	72h	8113,1				8008,8				8085,0			

Quadro K-2: Valores médios da massa  $m_1$

Tipo de Betão	Média (g)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
<b>Bt</b>	8142,7	4,63	0,06
<b>Cz20</b>	7808,3	7,98	0,10
<b>Cz50</b>	7988,6	1,29	0,02
<b>Cz100</b>	7996,5	6,55	0,08
<b>Lm20</b>	7963,5	6,43	0,08
<b>Lm50</b>	8050,9	9,50	0,12
<b>Lm100</b>	8063,6	5,88	0,07

Quadro K-3: Valores médios da massa  $m_2$

<b><math>m_2</math> – massa hidrostática do provete saturado (g)</b>							
	<b>Bt</b>	<b>Cz20</b>	<b>Cz50</b>	<b>Cz100</b>	<b>Lm20</b>	<b>Lm50</b>	<b>Lm100</b>
10	4729,40	4480,80	4362,30	4554,00	5126,80	4575,80	4715,4
11	4733,70	4428,50	4601,00	4416,20	5142,10	4693,70	4597,7
12	4708,10	4417,20	4501,30	4701,20	5184,80	4684,20	4597,7
<b>Média</b>	4723,73	4442,17	4488,20	4557,13	5151,23	4651,23	4636,9

Quadro K-4: Valores médios da massa  $m_3$

<b><math>m_3</math> – massa do provete seco (g)</b>							
	<b>Bt</b>	<b>Cz20</b>	<b>Cz50</b>	<b>Cz100</b>	<b>Lm20</b>	<b>Lm50</b>	<b>Lm100</b>
10							
11	7647,3	7195,3	7521,0	7234,3	7401,8	7577,6	7436,5
12	7606,9	7178,4	7345,0	7585,8	7480,4	7562,9	7519,9
Média	7627,1	7186,9	7433,0	7410,1	7441,1	7570,3	7478,2

Quadro K-4: Absorção de água por imersão

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Tempo (h)</b>		
	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>
	<b>(%)</b>		
Bt	14,95	15,13	15,16
Cz20	17,32	17,51	17,71
Cz50	14,56	14,60	14,62
Lm20	19,22	19,31	19,57
Lm50	15,56	15,94	15,99
Lm100	15,79	15,96	16,07

## APÊNDICE L – Ensaio de Lixiviação

O Quadro L-1 sintetiza os resultados para o ensaio de lixiviação ao betão, enquanto que o Quadro L-2 sintetiza os resultados para o ensaio de lixiviação aos agregados. A Figura L-1 ilustra-se a curva de calibração dos sulfatos.

Quadro L-1: Ensaio de lixiviação aos betões

Amostra		Massa (g)	Volume (ml)	Volume final (ml)	Volume de AgNO <sub>3</sub> 0,0141M (mL)	Concentração (mg Cl <sup>-</sup> /L)	Concentração (mg Cl <sup>-</sup> /kg )	NTU	Abs	mg/L	Concentração (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg )
Bt	A	19,7097	197,10	187,00	0,3	7,5	75	124	0,437	51,42	488
	A duplicado	20,7528	207,53	196,00	0,35	10	100	96,3	0,340	40,80	385
Cz 20	B	21,8865	218,87	207,00	0,25	5	50	130	0,459	53,72	508
	B duplicado	22,0400	220,40	206,00	0,2	2,5	25	128	0,451	52,95	495
Lm 20	C	19,3385	193,39	190,00	0,25	5	50	45,9	0,162	21,48	211
	C duplicado	24,2653	242,65	236,00	0,2	2,5	25	55,6	0,196	25,20	245
Cz 50	D	20,3204	203,20	198,00	0,2	2,5	25	120	0,423	49,88	486
	D duplicado	18,9893	189,89	182,00	0,2	2,5	25	152	0,536	62,15	596
Lm 50	E	19,2620	192,62	184,00	0,2	2,5	25	110	0,330	39,75	380
	E duplicado	20,8802	208,80	192,00	0,25	5	50	83,2	0,290	35,40	326
Cz 100	F	20,6920	206,92	193,00	0,2	2,5	25	213	0,877	99,21	925
	F duplicado	19,5054	195,05	192,00	0,25	5	50	203	0,733	83,55	822
Lm 100	G	20,6764	206,76	194,00	0,25	5	50	232	0,877	99,21	931
	G duplicado	20,0723	200,72	184,00	0,2	2,5	25	202	0,681	77,90	714

Quadro L-2: Ensaio de lixiviação aos agregados naturais

Amostra		Massa (g)	Volume (ml)	Volume final (ml)	Volume de AgNO <sub>3</sub> 0,0141M (mL)	Concentração (mg Cl <sup>-</sup> /L)	Concentração (mg Cl <sup>-</sup> /kg )	NTU	Abs	mg/L	Concentração (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg )
A1	1	19,8170	198	189	0,15	0	<ld	110	0,388	46,05	439
	2	20,0468	200	190	0,15	0	<ld	112	0,395	46,82	444
A2	1	20,0601	201	190	0,15	0	<ld	115	0,406	47,97	454
	2	20,3411	203	192	0,15	0	<ld	117	0,413	48,73	460
B1	1	20,5355	205	196	0,15	0	<ld	69,9	0,247	30,68	293
	2	21,0405	210	170	0,15	0	<ld	72,1	0,254	31,52	255
B2	1	21,1595	212	209	0,15	0	<ld	62,3	0,220	27,76	274
	2	20,8731	209	203	0,15	0	<ld	65,4	0,231	28,95	282

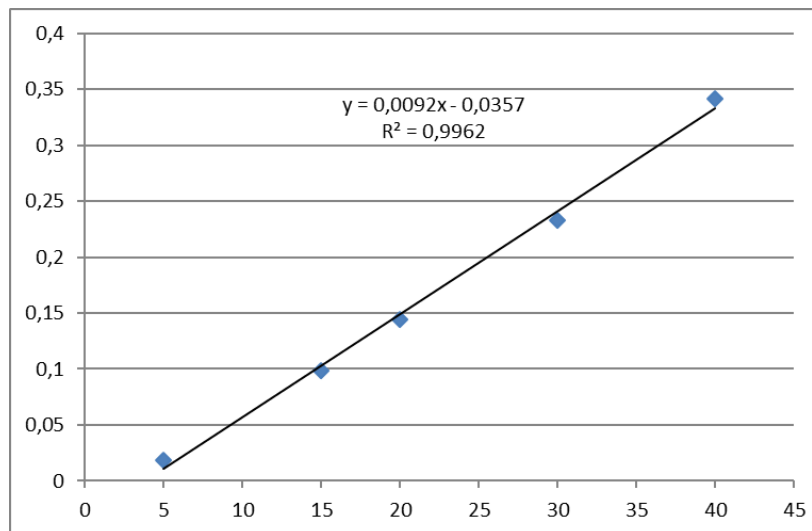


Figura L – 1: Curva de calibração de sulfatos



