



Departamento  
de Engenharia Civil

---

# **Formulação e caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil com Especialização em Construção Urbana

**Autora**  
**Helena Isabel Simões Alves**

**Orientador**  
**Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa**  
**Prof. Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, dezembro, 2015**



## RESUMO

Os avanços científicos e tecnológicos no estudo dos betões, particularmente ao nível da microestrutura de materiais compósitos cimentícios e dos seus constituintes, associados às preocupações ambientais relacionadas com a produção e elevado consumo de cimento Portland, conduziram ao desenvolvimento de betões com baixa dosagem de cimento.

A redução da dosagem de cimento pode ser conseguida através da sua substituição parcial por adições, o que resulta em betões com diferente desempenho da matriz ligante e com diferentes propriedades mecânicas, relativamente aos betões correntes.

Com o estudo de optimização granulométrica e com a utilização de superplastificantes é possível reduzir a quantidade de água na mistura e aumentar a compacidade, fatores que influenciam positivamente a resistência e a durabilidade.

A presente dissertação tem como principais objetivos o estudo da composição de betões com baixa dosagem de cimento, em comparação a betões com parâmetros de composição correntes; a influência da redução do cimento, com substituição parcial por adições, e da otimização granulométrica, variando as proporções dos agregados, nas propriedades mecânicas dos betões.

Comparativamente aos betões correntes, os betões com menor dosagem de pasta ligante demonstraram menor trabalhabilidade no estado fresco, mas revelaram propriedades mecânicas com elevada eficiência no estado endurecido. Ainda assim, a redução da dosagem de cimento na pasta ligante, influencia a redução do desempenho mecânico em ambos os casos.

O presente estudo provou que betões com baixa dosagem de pasta ligante e reduzidas quantidades de cimento conseguem obter melhor eficiência nas características mecânicas que os betões correntes.

### **Palavras chave:**

Betão com baixa dosagem de cimento, sustentabilidade, cimento, adições, otimização granulométrica, resistência mecânica, módulo de elasticidade.

## **ABSTRACT**

The scientific and technologic advances in the study of concrete, particularly on the microstructure of cement based composites and its constituents, associated with the environmental concerns related to the production and high consumption of Portland cement lead to the development of low cement concrete.

The cement reduction can be achieved through its partial replacement by additions, which results in concrete with different performance of the paste matrix and different mechanical properties relatively to the ordinary concrete.

By studying the optimization of the particle size distribution and with the use of superplasticizers it is possible to reduce the amount of water in the mixture and increase its packing density, factors that positively influence the strength and durability.

The main goals of the present dissertation are the study of the mixture design of low cement concrete, in comparison to concrete with ordinary composition parameters; the influence of the cement reduction, considering partial replacement by additions, and the optimization of the particle size distribution, by varying the aggregates proportions in the mechanical properties of concrete.

Concrete with lower dosage of paste volume have shown, in comparison to ordinary concrete, reduced workability in fresh state, but in hardened state they shown better mechanical properties, in hardened state. In both cases, the reduction of cement dosage in the matrix influences the decrease of mechanical performance.

The present study has proven that concrete with low dosage of binding paste volume and low amount of cement can achieve better efficiency in mechanical properties then ordinary concretes.

### **Keywords:**

Low cement concrete, sustainability, cement, addition, optimization of the particle size distribution, mechanical resistance, modulus of elasticity.

# ÍNDICE

<b>RESUMO</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>IX</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ORGANIZAÇÃO	2
<b>2 BETÃO COM REDUZIDA DOSAGEM DE CIMENTO</b>	<b>3</b>
2.1 APLICAÇÕES	3
2.2 MATERIAIS	3
2.2.1 LIGANTES	4
2.2.1.1 Cimento	4
2.2.1.2 Adições	6
2.2.2 AGREGADOS	9
2.2.3 ÁGUA DE AMASSADURA	11
2.2.4 ADJUVANTES	11
2.3 METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO	12
2.3.1 EVOLUÇÃO DAS METODOLOGIAS DE COMPOSIÇÃO	12
2.3.2 METODOLOGIA PARA O ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES DE GRANULOMETRIA ÓTIMA	14
2.4 PROPRIEDADES	17
2.4.1 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO	17
2.4.1.1 Massa volúmica	17
2.4.1.2 Consistência	17
2.4.2 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	18
2.4.2.1 Resistência à compressão	18
2.4.2.2 Resistência à tração e ao corte	19
2.4.2.3 Módulo de elasticidade e relação tensão-extensão	20
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1 CARATERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES	23

3.1.1	AGREGADOS	23
3.1.2	ÁGUA DE AMASSADURA	24
3.1.3	LIGANTES	24
3.1.3.1	Cimento	24
3.1.3.2	Adições	25
3.1.4	ADJUVANTE SUPERPLASTIFICANTE	25
<b>3.2</b>	<b>METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO</b>	<b>25</b>
3.2.1	ESPECIFICAÇÃO DO BETÃO	27
3.2.1.1	Classe de resistência	27
3.2.1.2	Classe de exposição ambiental	27
3.2.1.3	Classe de consistência	28
3.2.1.4	Dimensão máxima do agregado	29
3.2.2	ESCOLHA E CARATERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES	29
3.2.2.1	Agregados	29
3.2.2.2	Ligantes	30
3.2.2.3	Adjuvantes	31
3.2.3	COMPACIDADE	31
3.2.4	QUANTIFICAÇÃO DA PASTA LIGANTE	33
3.2.5	QUANTIFICAÇÃO DOS AGREGADOS	35
3.2.5.1	Curva de Faury	35
3.2.5.2	Curva de Alfred	37
3.2.5.3	Ajustamento da curva da mistura a qualquer das curvas de referencia, para determinação das proporções em volume absoluto	38
3.2.5.4	Determinação das massas de cada classe, a partir das proporções	38
3.2.6	QUADRO DA COMPOSIÇÃO ESTUDADA	38
3.2.7	ENSAIOS DE ESTUDO	39
<b>3.3</b>	<b>MÉTODOS DE PREPARAÇÃO, CURA E ENSAIO DE PROVETES</b>	<b>39</b>
3.3.1	ARMAZENAMENTO DOS CONSTITUINTES	39
3.3.2	EQUIPAMENTO USADO NA AMASSADURA DOS BETÕES	39
3.3.2.1	Misturadoras	39
3.3.2.2	Moldes dos provetes	40
3.3.2.3	Compactação	40
3.3.3	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	41
3.3.3.1	Ensaio de abaixamento	41
3.3.3.2	Grau de compactabilidade	42
3.3.4	CONDIÇÕES DE CURA	42
3.3.5	ENSAIOS DOS PROVETES DE BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	43
3.3.5.1	Resistência à compressão	44
3.3.5.2	Resistência à tração por compressão diametral	44
3.3.5.3	Resistência à flexão	45
3.3.5.4	Módulo de elasticidade	46
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>47</b>

<b>4.1</b>	<b>COMPOSIÇÕES ESTUDADAS</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO FRESCO</b>	<b>48</b>
4.2.1	ENSAIO DE ABAIXAMENTO	48
4.2.2	GRAU DE COMPACTABILIDADE	50
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO</b>	<b>51</b>
4.3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	51
4.3.1.1	Evolução da resistência à compressão com a idade	53
4.3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	57
4.3.3	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	58
4.3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	59
<b>4.4</b>	<b>INFLUÊNCIA DA CURVA GRANULOMÉTRICA</b>	<b>61</b>
4.4.1	TRABALHABILIDADE	62
4.4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	62
4.4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	64
4.4.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	64
<b>4.5</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS NORMAS</b>	<b>66</b>
4.5.1	MASSA VOLÚMICA	66
4.5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	66
4.5.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	67
4.5.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	<b>71</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>71</b>
<b>5.2</b>	<b>ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>75</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Coeficiente de endurecimento com a idade $t$ , previsto no EC2, em função do cimento (Costa H. S., 2007)	19
Figura 2.2 Diagramas tensão extensão do betão de diferentes resistências (Costa & Appleton, 2002)	20
Figura 2.3 Hipóteses da lei constitutiva do betão considerada no EC2 (NP EN 1992-1, 2010)	21
Figura 2.4 Representação esquemática da relação tensões extensões para a análise estrutural (NP EN 1992-1, 2010)	22
Figura 3.1 Análise granulométrica dos agregados	24
Figura 3.2 Fluxograma representativo do estudo da composição de um betão (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	26
Figura 3.3 Comparação do volume ocupado por uma mistura de compacidade normal e por uma mistura de elevada compacidade (Fennis & Walraven, 2012)	30
Figura 3.4 Comparação do volume ocupado por uma pasta ligante com adições (F) com finura idêntica à do cimento (C) e por adições com finura superior à do cimento (Fennis, Walraven, & Uijl, 2013)	31
Figura 3.5 Ábacos de previsão da compacidade, para classes de consistência S2, S3 e S4 (Lourenço <i>et al.</i> 2004)	33
Figura 3.6 Curva de Faury	36
Figura 3.7 Misturadora de eixo vertical de 20 l usada nas amassaduras	40
Figura 3.8 Moldes dos provetes betonados	40
Figura 3.9 Mesa vibratória usada para a compactação	41
Figura 3.10 Ensaio de abaixamento do cone de Abrams	42
Figura 3.11 Ensaio de compactabilidade	42
Figura 3.12 Tanque de água para cura dos provetes	43
Figura 3.13 Câmara termo-higrométrica	43
Figura 3.14 Ensaio de resistência à compressão do betão	44
Figura 3.15 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	45
Figura 3.16 Ensaio de resistência à flexão	45
Figura 3.17 Ensaio do módulo de elasticidade	46
Figura 4.1 Abaixamento obtido no ensaio de abaixamento	49
Figura 4.2 Grau de compactabilidade obtido no ensaio de compactabilidade	50
Figura 4.3 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 7 dias	52
Figura 4.4 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 28 dias	52

Figura 4.5 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 56 dias	52
Figura 4.6 Evolução da resistência à compressão dos betões da tipologia C	54
Figura 4.7 Evolução da resistência à compressão dos betões da tipologia LC	54
Figura 4.8 Evolução da resistência dos betões com $75\text{Kg}/\text{m}^3$ de cimento	54
Figura 4.9 Evolução da resistência à compressão dos betões com $175\text{Kg}/\text{m}^3$ de cimento	55
Figura 4.10 Evolução da resistência à compressão de betões com $250\text{Kg}/\text{m}^3$ de cimento	55
Figura 4.11 Comparação da evolução da resistência à compressão de betões C75, LC75 prevista no EC2 (considerando o $s=0,38$ ) com a evolução da resistência quando $s=0,6$	56
Figura 4.12 Comparação da evolução da resistência à compressão de betões C125 prevista no EC2 (considerando o $s=0,38$ ) com a evolução da resistência quando $s=0,6$	57
Figura 4.13 Resistência à tração por compressão diametral média em provetes prismáticos	58
Figura 4.14 Resistência à flexão média dos provetes prismáticos aos 90 dias	59
Figura 4.15 Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias	60
Figura 4.16 Resistência à compressão dos betões LC75 e LC75F aos 7 e aos 28 dias	62
Figura 4.17 Resistência à compressão dos betões LC125 e LC125F aos 7 e aos 28 dias	63
Figura 4.18 Resistência à compressão dos betões LC175 e LC175F aos 7 e aos 28 dias	63
Figura 4.19 Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias nos provetes prismáticos LC125 e LC125F	64
Figura 4.20 Módulo de elasticidade médio aos 28 dias dos provetes prismáticos de betão	65
Figura 4.21 Relação entre as resistências à tração por compressão diametral obtidas experimentalmente e as previstas no EC2	68
Figura 4.22 Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e previsto no EC2	69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Características dos componentes do clínquer Portland (E378, 1996)	5
Tabela 2.2 Requisitos mecânicos expressos como valores característicos específicos (NP EN 197-1, 2001)	6
Tabela 3.1 Massa volúmica dos agregados	24
Tabela 3.2 Massa volúmica dos ligantes	25
Tabela 3.3 Classes de resistência à compressão do betão de massa volúmica normal e pesada (NP EN 206, 2000)	27
Tabela 3.4 Classes de exposição ambiental (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	28
Tabela 3.5 Classes do ensaio de abaixamento e de compactabilidade (NP EN 206, 2000)	28
Tabela 3.6 Previsão de vazios com base na dimensão máxima do agregado (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	34
Tabela 3.7 Metodologia de quantificação dos parâmetros da pasta ligante (Costa H. S., 2007)	34
Tabela 3.8 Coeficientes de Feret $K_{1,j}$ (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	35
Tabela 3.9 Valor do parâmetro $A_F$ de Faury (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	36
Tabela 3.10 Valor do parâmetro $B_F$ de Faury (Lourenço <i>et al.</i> , 2004)	37
Tabela 4.1 Caracterização das misturas realizadas	47
Tabela 4.2 Classe de abaixamento obtida através do ensaio	49
Tabela 4.3 Resultados do grau de compactabilidade	50
Tabela 4.4 Resistência à compressão dos provetes cúbicos de betão	51
Tabela 4.5 Resistência à tração por compressão diametral média em provetes prismáticos	57
Tabela 4.6 Resistência à flexão média dos provetes prismáticos aos 90 dias	59
Tabela 4.7 Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias	60
Tabela 4.8 Distribuição percentual dos diferentes agregados	61
Tabela 4.9 Resistência à compressão média em provetes cúbicos de betão da categoria LC e LC_F	62
Tabela 4.10 Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias nos provetes prismáticos LC125 e LC125F	64
Tabela 4.11 Módulo de elasticidade médio aos 28 dias dos provetes prismáticos de betão	65
Tabela 4.12 Classificação do betão quanto à massa volúmica	66
Tabela 4.13 Classe de resistência dos betões estudados	67

Tabela 4.14 Valores da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias obtidos experimentalmente e previstos no EC2 e a sua relação	67
Tabela 4.15 Valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e previstos no EC2 e a sua relação	68

## SIMBOLOGIA

### Abreviaturas

**ACI** – American Concrete Institute

**EC2** – Eurocódigo 2

**LC** – Tipologia de betão produzido com baixa dosagem de pasta ligante ( $250 \text{ Kg/m}^3$ ), e dimensionado pela curva de referencia de Alfred

**LC\_F** – Tipologia de betão produzido com baixa dosagem de pasta ligante ( $250 \text{ Kg/m}^3$ ), e dimensionado pela curva de referencia de Faury

**LC\_A** – Tipologia de betão produzido com baixa dosagem de pasta ligante ( $250 \text{ Kg/m}^3$ ), e dimensionado pela curva de referencia de Alfred e com elevada relação A/L

**C** – Tipologia de betão produzido com dosagem corrente da pasta ligante corrente ( $350 \text{ Kg/m}^3$ ), e dimensionado pela curva de referencia de Faury

### Gregas

**$\beta(t)$**  – coeficiente de endurecimento do betão, em função da idade

**$\epsilon$**  – extensão

**$\gamma$**  – compacidade da pasta ligante

**$\sigma$**  – compacidade do betão

**$\sigma_c$**  – tensão de compressão aplicada no betão

**$\sigma_{m\acute{a}x}$**  – tensão máxima aplicada no ensaio do módulo de elasticidade

**$\sigma_{m\acute{i}n}$**  – tensão mínima aplicada no ensaio do módulo de elasticidade

**$\sigma$ - $\epsilon$**  – relação tensão-extensão (lei constitutiva)

**$\rho$**  – massa volúmica do betão

**$\rho_A$**  – massa volúmica da água

**$\rho_{Adj}$**  – massa volúmica do adjuvante

**$\rho_c$**  – massa volúmica do cimento

**$\rho_{c.v.}$**  – massa volúmica das cinzas volantes

$\rho_F$  – massa volúmica do fíler calcário

$\rho_{p,i}$  – massa volúmica dos vários agregados

### **Latinas maiúsculas**

**A** – dosagem ponderal de água

**A/(C+CV)** – relação ponderal água efetiva / (cimento + cinzas volantes)

**A/L** – relação ponderal água efetiva / ligante

**A/C** – relação ponderal água efetiva / cimento

**Adj** – dosagem ponderal de adjuvante

**A<sub>F</sub>** – coeficiente da curva granulométrica de Faury dependente da forma dos agregados e da energia de compactação

**AF0/3** – areia fina 0/3 mm

**Ag** – dosagem ponderal do agregado i

**Ag<sub>i</sub>** – dosagem ponderal de cada um dos agregados

**AM0/4** – areia média 0/4 mm

**Areão** – areão 4/8 mm

**B<sub>F</sub>** – coeficiente da curva granulométrica de Faury dependente dos meios de compactação

**Brita 1** – brita 6/14 mm

**C** – dosagem ponderal do cimento

**CaO** – óxido de cálcio

**CO<sub>2</sub>** – dióxido de carbono

**CV** – dosagem ponderal das cinzas volantes

**D<sub>máx</sub>** – dimensão máxima do agregado, correspondente à dimensão do peneiro com mais de 90% de passados

**E<sub>cm</sub>** – valor médio do módulo de elasticidade

**E<sub>cm</sub> (t)** – valor médio do módulo de elasticidade à idade t

$F$  – dosagem ponderal do fíler calcário

$I$  – Índice de vazios

$K$  – é o coeficiente numérico que depende da consistência do betão, da potência de compactação, da natureza dos agregados e também da utilização dos adjuvantes que alteram a reologia do betão enquanto fresco;

$K'$  – é um parâmetro que depende da potencia de compactação

$S$  – dosagem ponderal de adição

$SI$  – abaixamento do betão no cone de Abrams

### **Latinas minúsculas**

$a$  – volume absoluto de água

$adj$  – volume absoluto de adjuvante

$ag$  – volume absoluto de agregado

$c$  – volume absoluto de cimento

$c$  – grau de compactabilidade

$d$  – dimensão da malha do peneiro

$dmín$  – dimensão mínima do agregado, correspondente à dimensão do peneiro com menos de 5% de passados

$c$  – volume absoluto do fíler calcário

$f_{cfm}$  – valor médio da tensão de rotura à flexão do betão

$f_{c,j}$  – previsão da resistência da matriz da pasta ligante à idade  $j$

$f_{ck}$  – valor caraterístico da tensão de rotura à compressão do betão

$f_{cm}$  – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão

$f_{cm}$  – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão à idade  $t$

$f_{cm,cil}$  – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos

$f_{ctk}$  – valor caraterístico da tensão de rotura à tração do betão

$f_{ctm}$  – valor médio da tensão de rotura à tração do betão

$f_{ctm,EC2}$  – valor médio da tensão de rotura à tração do betão previsto pelo EC2

$f_{ck,cil}$  – valor característico da tensão de rotura à tração em provetes cilíndricos

$k_{1,j}$  – coeficiente de Feret

$mag$  – volume absoluto da mistura de agregados

$p(d)$  – percentagem de passados, em volume absoluto, do conjunto dos agregados e ligante

$p'(d)$  – percentagem de passados, em volume absoluto, do conjunto dos agregados

$p_{mist}(d_j)$  – percentagem da mistura, das  $r$  classes de agregados utilizadas, que passa através do peneiro de malha  $d_j$

$p_i$  – proporção, em volume absoluto, com que o agregado da classe  $i$  entra na mistura

$p_i(d_j)$  – percentagem do agregado da classe  $i$  que passa através do peneiro da malha  $d_j$

$q$  – coeficiente que distribuição

$s$  – volume absoluto da adição

$s$  – coeficiente que depende do tipo de cimento para estimar o endurecimento

$t$  – idade do betão

$v$  – volume de vazios na pasta ligante

$vl$  – volume absoluto do pó ligante

$vpl$  – volume absoluto da pasta ligante

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O betão é um material compósito formado pela mistura de ligante, agregados, água e possivelmente adjuvantes e adições.

Com uma produção de cerca de 25.000 toneladas por ano, o betão é o segundo produto mais consumido pelo Homem, apenas superado pela água. Com o crescimento da população mundial e com o conseqüente acréscimo do volume de construções este consumo torna-se cada vez mais preocupante, uma vez que o betão corrente não é considerado um material amigo do ambiente (Malhotra & Metha, 2002, *apud* Camões, 2011).

O betão convencional é constituído por cerca de 12% de cimento, principal ligante do betão, e 80% de agregados, e a energia consumida no fabrico do cimento representa cerca de 80 a 90% da energia necessária para o fabrico do betão (Camões, 2011). Sendo a produção anual do cimento cerca de 3.000 toneladas e sabendo que a produção de uma tonelada de cimento Portland consome cerca de 4GJ de energia e que a sua fabricação lança aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a indústria do cimento é responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, devido principalmente à descarbonatação do pó calcário (Metha, 2001).

Para garantir a competitividade do betão no futuro, é necessário torná-lo num produto mais sustentável. Uma das formas de o conseguir é através da redução do consumo de cimento. Esta redução pode ser conseguida através da optimização granulométrica, da utilização de cimentos de elevada resistência, da diminuição da água de amassadura, da utilização de superplastificantes, e da máxima substituição possível do cimento por adições (Tilo Proske, 2014).

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho passa por desenvolver betões com reduzidas dosagens do cimento e do pó ligante, avaliar as suas características mecânicas e a influência da redução do cimento e da variação das proporções granulométricas nos resultados.

Principais objetivos específicos do estudo:

- Estudar a formulação de betões com baixa dosagem de cimento, com variação dos parâmetros de composição e optimização da compacidade por ajuste granulométrico;
- Caracterizar as propriedades mecânicas dos betões em estudo, nos estados fresco e endurecido;
- Comparar os resultados das propriedades de betões com duas dosagens diferentes de pó ligante na matriz, uma dosagem corrente ( $350 \text{ kg/m}^3$ ) e uma dosagem reduzida ( $250 \text{ kg/m}^3$ );
- Estudar a influência da curva granulométrica de referência, bem como a variação da dosagem de cimento, em regime de substituição por adições, nas propriedades dos betões;
- Confrontar os resultados experimentais com as previsões estabelecidas no Eurocódigo 2.

### **1.3 Organização**

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do trabalho e os objetivos do mesmo.

O capítulo 2 sintetiza o resultado da revisão bibliográfica realizada, referindo os materiais usados na sua composição e as aplicações estruturais, passando pelas metodologias de composição adotadas, aos estudos de caracterização das propriedades mecânicas.

O capítulo 3 trata a caracterização dos materiais utilizados na concepção do betão, seguindo-se a metodologia para a composição do betão, e por fim apresentam-se os métodos de preparação, cura e ensaio dos provetes.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios. Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, em função dos objetivos propostos.

## **2 BETÃO COM REDUZIDA DOSAGEM DE CIMENTO**

O grande impacto ambiental causado pela indústria do betão é causado pela emissão de CO<sub>2</sub> durante a produção do cimento. Para assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, tem-se encorajado a redução da percentagem de cimento usada na pasta ligante. O uso de cimentos de elevada resistência, de superplastificantes de alta gama, que promovem uma forte redução da água de amassadura, bem como a otimização da curva granulométrica, permitem uma significativa redução do cimento Portland na composição do betão. Nesse sentido, é essencial aumentar a compacidade através da introdução de adições como o fíler calcário, cinzas volantes, entre outras (Camões, 2011; Tilo Proske, 2014).

Afim de obter a informação mais relevante para o estudo da composição de betões com reduzida dosagem de cimento, realizou-se neste capítulo uma síntese dos trabalhos desenvolvidos nos últimos anos, dando especial atenção aos materiais constituintes, aos métodos de composição, assim como às principais propriedades deste material.

### **2.1 Aplicações**

Os betões com reduzidas dosagem de cimentos não têm tido grande aplicação até aos dias de hoje, uma vez que só recentemente se tem procurado integrar práticas de sustentabilidade no desenvolvimento de novos materiais cimentícios. No entanto, devido ao reduzido custo inicial e à ampla vantagem ambiental, estes betões poderão ter um papel de extrema importância na indústria da construção. O seu uso pode ser estendido a diversos tipos de estruturas, especificamente em elementos com baixas necessidades de desempenho mecânico e de durabilidade, ou integrados em elementos compósitos de betão com uma camada de revestimento em betão de desempenho mais elevado.

### **2.2 Materiais**

O betão é uma rocha artificial formada pela mistura devidamente proporcionada do material ligante com um conjunto de agregados, juntando-lhes a dosagem de água apropriada, e eventualmente adjuvantes. O ligante reage com a água, ganha presa e endurece, adquirindo a mistura coesão e resistência mecânica.

Não descuidando a importância que o betão teve nas construções Greco-Romanas, a notoriedade atual do betão como material de construção deu-se com a invenção do cimento Portland por Louis Vicat em 1817, que permitia ao betão alcançar um endurecimento mais

rápido e com maior resistência. Em 1848, Lambot descobriu que ao aplicar armadura de aço no betão, o compósito passava a obter resistências à tração bastante superiores às resistências à tração do material betão e, em 1899, o arquiteto Auguste Perret integrou o uso deste material nas suas obras. Estes acontecimentos foram os pontos de partida essenciais de um novo rumo da construção no século XX , e ainda hoje é o material mais usado na construção (Coutinho S., 1973).

Em 1991, Mehta referiu que a evolução do betão nos últimos 50 anos se deu fundamentalmente devido aos melhoramentos da produção no cimento, às novas tecnologias implementadas com a utilização do betão pronto, ao aparecimento dos adjuvantes e à utilização de adições (Camões, 2006; Shah, 2000).

O sucesso deste material de construção deve-se, fundamentalmente, à facilidade de moldagem de elementos com geometria mais ou menos complexas, ao baixo custo dos materiais e processos utilizados, à sua elevada resistência à compressão e durabilidade que permite que os custos de manutenção durante o ciclo de vida sejam quase nulos (Mehta, 1999, *apud* Camões, 2002).

Quanto ao custo final do betão, verifica-se que este incide maioritariamente sobre o custo do cimento. Desta forma, a redução da quantidade de cimento a utilizar na formulação do betão torna-se extremamente vantajosa tanto do ponto de vista económico como do ambiental, principalmente quando se conseguem obter resistências desejáveis, ou até superiores às especificadas em cada caso de estudo.

### **2.2.1 Ligantes**

Na atualidade a pasta ligante do betão é geralmente constituída por cimento Portland e ou adições que quando misturada com a parte líquida reagem, ganham presa e endurecem, formando assim uma matriz resistente (Costa H. S., 2007; Lourenço *et al*, 2004).

#### **2.2.1.1 Cimento**

Segundo a norma NP EN 197-1 (2001), o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água.

A produção deste material resume-se em extrair da pedra, esmagar e misturar os compostos minerais adequados, seguidos da moagem e cozedura a elevada temperatura, da mistura homogeneizada, de onde se obtém o clínquer, que é posteriormente moído em pó de cimento (Costa H. S., 2007). Este processo é o principal responsável pela

insustentabilidade do betão, daí ser importante reduzir a quantidade de cimento na constituição da pasta ligante do betão.

O cimento é o elemento mais importante da pasta ligante do betão. Dado que existem vários tipos de cimento, é fundamental conhecer as características de cada um, afim de saber escolher o cimento indicado para as especificações pretendidas de cada betão. A norma NP EN 197-1 define os cinco tipos de cimentos que podem ser utilizados na fabricação do betão: CEM I – cimento Portland; CEM II – cimento Portland composto pela mistura de diferentes adições; CEM III – cimento de alto forno; CEM IV – cimento pozolânico; CEM V – cimento composto.

As propriedades do cimento, nomeadamente o seu comportamento mecânico, dependem da sua composição química e da finura obtida na moagem. O endurecimento hidráulico do cimento deve-se, fundamentalmente, à hidratação dos silicatos de cálcio, embora outros químicos, tais como os aluminatos, também participem no processo de endurecimento (NP EN 197-1, 2001).

Tabela 2.1 Características dos componentes do clínquer Portland (E378, 1996)

Componentes do clínquer		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Proporções médias		60%	20%	8%	12%
Velocidade de hidratação		Elevada	Moderada	Muito elevada	Elevada
Calor de hidratação	Quantidade	Elevada (120 cal/g)	Pequena (60 cal/g)	Muito elevada (200 cal/g)	Moderada (100 cal/g)
	Desenvolvimento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Desenvolvimento da resistência mecânica		Rápido e prolongado	Lento e muito prolongado	Muito rápido e de curta duração	Lento e pouco significativo
Resistência ao ataque químico		Pequena	Moderada	Muito pequena	Grande

O silicato tricálcico contribui para as resistências iniciais, uma vez que reage rapidamente com a água. Já o silicato bicálcico contribui principalmente para as resistências a longo prazo, dada a sua reação ser bastante morosa, conforme se indica na Tabela 2.1 (Gomes *et al.* 2013).

Também a finura do cimento, medida pela superfície específica, é um parâmetro importante. A finura afeta propriedades como a velocidade de hidratação, a

trabalhabilidade, a consistência, a segregação, a resistência, a fissuração devido à retração e a quantidade de ar ocluído. Como apenas a superfície dos grãos de cimento participa nas reações de hidratação, quanto maior a finura do cimento, maior será a quantidade de componentes hidratados, resultando em uma maior resistência inicial da pasta de cimento, anulando-se em idades mais avançadas. Com isto, a velocidade do processo de hidratação aumenta, no entanto, a aceleração das reações químicas nas menores idades implica uma rápida perda da trabalhabilidade. Com o aumento da superfície específica, também aumentam as tensões devidas à retração, e por isso os cimentos tornam-se mais fissuráveis (Costa & Appleton, 2002; Camões, 2011).

Quanto à resistência mecânica, a norma define três classes de resistência (32,5, 42,5 e 52,5), estando estas relacionadas com a resistência à compressão aos 28 dias, que é o período onde o endurecimento da pasta atinge cerca de 80 a 85% da resistência final. A cada classe de resistência está associada uma designação “N” (normal) ou “R”(rápido) que distingue a forma do endurecimento, ou seja, se as resistências iniciais são normais ou mais elevadas (Tabela 2.2) (NP EN 197-1 , 2001).

**Tabela 2.2 Requisitos mecânicos expressos como valores característicos específicos (NP EN 197-1 , 2001)**

Classes de resistência	Resistência à compressão ( <i>Mpa</i> )				Tempo de início de presa ( <i>min</i> )	Expansibilidade ( <i>mm</i> )				
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência							
	2 dias	7 dias	28 dias							
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10				
32,5 R	≥10,0	-								
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5			≥60	≤10		
42,5 R	≥20,0	-								
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-					≥45	≤10
52,5 R	≥30,0	-								

### 2.2.1.2 Adições

As adições são materiais inorgânicos, finamente divididos que podem ser adicionados ao betão com o intuito de melhorar algumas das suas propriedades ou para lhes conferir outras especificadas (Lourenço J. F., 2010). Estas têm finura superior ou igual à do cimento e dividem-se em adições do tipo I (quase inertes) e adições do tipo II (pozolanas e adições de carácter hidráulico latente), de acordo com a norma NP EN 197-1 (2001).

Inicialmente as adições eram vistas essencialmente como um substituto do cimento. A sua utilização era considerada apenas sobre o ponto de vista económico. Nos dias de hoje a

utilização destes produtos tem também sido incrementada com o objetivo de melhorar algumas propriedades do betão, tais como a resistência, a durabilidade e a trabalhabilidade (Costa & Appleton, 2002).

Como já referido, as adições do tipo I são materiais que se consideram quase inertes e são usadas para aumentar as partículas finas, aumentando a trabalhabilidade e a compacidade da mistura, ou para alterar a cor do betão. Como exemplo deste tipo de adições temos o fíler calcário e os pigmentos.

As adições do tipo II são usadas para melhorar a reologia do betão fresco e as propriedades do betão endurecido. Entre estas distinguem-se as adições pozolânicas, tendo como exemplo as pozolanas naturais, as cinzas volantes e as sílicas de fumo, e as que apresentam propriedades hidráulicas latentes como são as escórias granuladas de alto forno e cais hidráulicas (Camões, 2011).

Os materiais com propriedades hidráulicas latentes, e alguns materiais pozolânicos, permitem a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, ou seja, são verdadeiros cimentos, mas que reagem muito lentamente quando utilizados isoladamente. Desta forma, devem ser usados juntamente com materiais como hidróxidos de sódio ou de potássio, silicato de sódio, cal, ou cimento Portland (Coutinho J. S., 2006; Costa H. S., 2012).

As pozolanas apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reatividade para com o hidróxido de cálcio mas insolúveis e inertes na água (Coutinho S., 1973; Gomes *et al.* 2013).

### Cinzas Volantes

As cinzas volantes são resíduos provenientes da combustão do carvão em centrais termoelétricas. A sua utilização na indústria do betão teve início nos anos 30, principalmente devido ao facto de reduzir a dosagem de cimento necessária na pasta ligante e conseqüente diminuição dos custos do betão. Contudo, com o decorrer dos anos tornou-se evidente que este material tem muitas outras vantagens. Por ser um subproduto industrial torna-se um material sustentável e económico, para além disso a sua incorporação no betão origina um aumento da trabalhabilidade, uma redução do calor de hidratação, uma redução da permeabilidade e uma conseqüente melhoria da durabilidade (Camões, 2002).

A norma NP EN 450-1 (2006) define as cinzas volantes como um pó fino constituído, principalmente, por partículas esféricas e vítreas oriundas da queima do carvão pulverizado,

com propriedades pozolânicas e constituído, essencialmente por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , contendo no mínimo 25% em massa de  $\text{SiO}_2$  reativo, para que seja adequada ao fabrico do betão.

As cinzas volantes subdividem-se em dois grupos conforme o seu teor em CaO (óxido de cálcio):

- Cinza volante siliciosa:  $\text{CaO} < 10\%$  → Têm como principais características um baixo calor de hidratação e um maior controlo da reação alcalis-sílica
- Cinza volante calcária:  $\text{CaO} > 10\%$  → Devido às suas propriedades pozolânica e hidráulicas latentes são utilizadas com o objetivo de substituir uma parte do cimento no fabrico do betão, sem perder a resistência à compressão

Devido a ser um material com uma finura elevada, os vazios existentes entre as partículas do cimento, de dimensão superior, ficam preenchidos pelas cinzas volantes, verificando-se um aumento da compacidade e da densidade da pasta. Além do mais, a sua forma esférica também contribui para o aumento da trabalhabilidade (Borges, 2013).

Ao contrário do que se regista com recurso a outros materiais pozolânicos, a utilização de cinzas volantes na pasta ligante leva à necessidade de menor quantidade de água de amassadura para obter a mesma consistência. Para além disso, leva a uma redução do calor de hidratação e da permeabilidade do betão, caso este seja sujeito a condições adequadas de cura húmida (Gomes *et al.* 2013).

Apesar do desenvolvimento das resistências iniciais ser mais lento, em relação a betões correntes, é possível obter betões com resistências mecânicas superiores em idades mais avançadas, devido às reações pozolânicas serem lentas mas prolongadas (Camões, 2002).

### Fíler Calcário

O fíler calcário, pertencente às adições do tipo I, é um material finamente moído, com um módulo de finura idêntica à do cimento Portland. Pode ser de origem natural ou minerais inorgânicos processados (Coutinho J. S., 2006).

O efeito de fíler consiste no preenchimento dos espaços vazios entre os agregados, contribuindo para o aumento da compacidade e conseqüente aumento da resistência. Uma vez que a sua ação é predominantemente física, deve-se ter o cuidado de escolher um fíler compatível com o cimento a ser utilizado ou vice-versa.

Quando adicionado ao betão traz benefícios no estado fresco como o aumento da trabalhabilidade, redução da exsudação, da permeabilidade e do calor de hidratação e no estado endurecido atenua a tendência do betão para fendilhar para além de aumentar a compacidade, melhorando a resistência (Gomes *et al.* 2013).

### 2.2.2 Agregados

Os agregados são materiais granulares, podendo ser naturais ou artificiais, britados ou rolados, que constituem o “esqueleto” do betão.

Este material pode ser agrupado de várias formas consoante o ponto de vista considerado: petrográfico, massa volúmica, modo de obtenção e dimensão das partículas.

Do ponto de vista petrográfico podem ser classificados como ígneos, sedimentares e metamórficos. Esta classificação não permite fazer uma distinção entre as suas qualidades, deste modo o seu interesse é reduzido.

Quanto à massa volúmica classificam-se em agregados leves, normais e pesados, consoante este parâmetro seja inferior a  $2000 \text{ Kg/m}^3$ , se encontre entre os  $2000 \text{ Kg/m}^3$  e os  $3000 \text{ Kg/m}^3$ , ou ultrapasse os  $3000 \text{ Kg/m}^3$ , respetivamente.

No que se refere ao modo de obtenção podem classificar-se em naturais ou rolados, britados e reciclados. Os primeiros são de origem sedimentar e natureza clástica, enquanto os segundos são obtidos por fratura de rochas não clásticas. Já os agregados reciclados derivam de materiais inorgânicos muitas vezes provenientes de outras construções.

Relativamente à dimensão das partículas classificam-se em areias, se a dimensão máxima for inferior a  $5 \text{ mm}$ , e agregados grossos, caso apresentem dimensões superiores a  $5 \text{ mm}$ . Considera-se a areia rolada quando é natural e britada se for obtida por fratura artificial. Já os agregados grossos se forem de origem natural são apresentados como godos e se forem conseguidos por fratura artificial são designados por britas (Coutinho S., 1973).

A dimensão máxima do agregado é um fator de extrema importância, pois quanto maior for a dimensão do agregado menores serão as quantidades de cimento e água necessárias. No entanto, os agregados grossos podem trazer alguns problemas se a sua dimensão máxima for excessivamente elevada. Por exemplo, o material graúdo pode ter dificuldades em passar nas armaduras, podendo levar a que o betão não preencha completamente o molde, proporcionando a formação de ninhos de brita. Então, a máxima dimensão do agregado deve ser definida tendo em conta a largura mínima da secção do betão, o recobrimento e o espaçamento entre as armaduras, de modo que este possa ser colocado e compactado sem que haja qualquer risco de segregação.

A granulometria é uma das propriedades mais importantes dos agregados. Esta condiciona a compacidade do betão, que quanto maior for, menor será o número de vazios e, portanto, menor a quantidade de cimento e água necessária. Com uma granulometria contínua, isto é, com as partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões da mais pequena à maior, e com partículas com forma adequada, consegue-se obter um betão muito compacto

e resistente para uma dosagem mínima de cimento. Para além da compacidade, a granulometria também afeta a trabalhabilidade. À medida que a compacidade aumenta a trabalhabilidade tende a diminuir. Para se obter um betão com boa trabalhabilidade é necessário dotar a mistura de um teor ótimo de agregados finos. As partículas finas têm uma superfície específica (razão entre a superfície total e o volume das partículas) grande, o que implica um aumento da quantidade de água. Posto isto, é necessário alcançar um equilíbrio que satisfaça a compacidade da granulometria e o teor ótimo de finos (Coutinho J. d., 1999; Costa & Appleton, 2002).

Tal como a composição granulométrica e a dimensão máxima dos agregados, também a sua forma e textura da superfície devem ser tomadas em consideração. Estas interferem significativamente nas propriedades do betão fresco, tais como a trabalhabilidade, ângulo de atrito, compacidade e sobre outras propriedades que estão dependentes da quantidade de água de amassadura. De um modo geral, os agregados arredondados e lisos conferem maior trabalhabilidade, visto que a sua forma arredondada provoca menor atrito, resultando em uma menor necessidade de água. Já os agregados britados aumentam a resistência à tração, uma vez que a sua superfície rugosa resulta numa melhor aderência entre os agregados e a pasta ligante, originando um material mais coeso. Apesar de os agregados naturais não possuírem uma aderência tão elevada como os britados, necessitam de menores quantidades de água de amassadura, assim sendo, em termos de resistências, torna-se quase indiferente utilizar agregados rolados ou britados (Cunha, 2011).

Em betões correntes a resistência à compressão do agregado raramente constitui um problema. Normalmente, é a pasta de cimento quem resiste às tensões instaladas, mas o tipo e as propriedades mecânicas dos agregados têm também um papel importante, quer na distribuição interna das tensões, quer nas resistências mecânicas do betão (Costa H. S., 2012).

Interessa que os materiais a empregar se encontrem limpos, evitando acumulações de pó ou de argila na superfície das partículas. Caso contrário haverá necessidade de usar maiores quantidades de água e a ligação da pasta de cimento ao agregado será comprometida, afetando as resistências à compressão e, principalmente à tração e flexão.

A melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento e propriedades do betão produzido com esse mesmo agregado e não exclusivamente a partir de resultados de ensaios sobre os agregados que apenas permitem prever o seu comportamento no betão. Justifica-se recorrer a ensaios apenas ao agregado no sentido de prever a possibilidade do seu emprego em betão, pois um agregado considerado inadequado a mais do que uma propriedade, dificilmente irá constituir um betão de qualidade (Coutinho J. d., 1999).

Os agregados ocupam em geral 70 a 75% do volume do betão, por isso a sua escolha deve ser feita tendo em conta as suas propriedades mais importantes e o fim para o qual o betão é concebido.

### 2.2.3 Água de amassadura

A água de amassadura confere ao betão, no estado fresco, a trabalhabilidade adequada à sua colocação em obra. Já no estado endurecido, a água participa nas reações de hidratação das partículas do material ligante, dando origem à presa e ao endurecimento.

A quantidade de água que garante a trabalhabilidade do betão é bastante superior à necessária no processo de hidratação do ligante. Após a evaporação da água em excesso fica dentro do betão uma rede capilar de vazios responsável pela diminuição da resistência e durabilidade do betão. Deste modo deve-se utilizar apenas a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade pretendida (Costa H. S., 2007).

Segundo a norma NP EN 1008 (2003), a qualidade da água de amassadura para o fabrico de betão pode influenciar os tempos de presa, o desenvolvimento da resistência do betão e a proteção da armadura contra a corrosão. Assim, a norma especifica os requisitos para que a água seja apta para o fabrico do betão. As águas potáveis, ou a água de rede, assim como outras que não apresentem cheiro nem sabor, normalmente satisfazem os requisitos (NP EN 1008, 2003).

### 2.2.4 Adjuvantes

Os adjuvantes têm como função modificar características do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido. São adicionados em pequenas quantidades, comparativamente com a massa de cimento (<5%), antes ou durante a amassadura.

Atualmente existe uma vasta gama de adjuvantes no mercado que procuram alcançar as seguintes alterações no betão (Lourenço J. F., 2010):

- Melhorar a trabalhabilidade;
- Acelerar ou retardar a presa;
- Diminuir a permeabilidade;
- Melhorar as resistências ao gelo-degelo;
- Inibir a corrosão das armaduras;
- Modificar a viscosidade;
- Compensar a retração.

Devido à necessidade de utilizar o mínimo de água possível na pasta ligante, os adjuvantes destinados a melhorar a trabalhabilidade são os que merecem especial atenção, uma vez que permitem reduzir a água de amassadura sem afetar a trabalhabilidade, aumentando a resistência. Estes adjuvantes são designados por redutores de água, dos quais se distinguem os plastificantes e os superplastificantes. Enquanto os plastificantes permitem uma redução de água na ordem de 5 a 15%, os superplastificantes permitem reduções até cerca de 40% (Costa & Appleton, 2002).

Os plastificantes e os superplastificantes atuam sobre o betão segundo os seguintes princípios:

- Redução da tensão superficial da água, obtendo-se uma melhor dispersão das partículas finas;
- Efeito lubrificante, onde se diminui o atrito entre as partículas finas e entre estas e a água;
- Efeito dispersor e desfloculante devido à absorção das moléculas do adjuvante pelas partículas sólidas que as torna eletricamente carregadas e assim repelentes.

O surgimento dos plastificantes e superplastificantes revelou-se um dos maiores progressos no melhoramento das características do betão. Atualmente é possível fabricar betões trabalháveis com razões água / ligante próximas de 0,2, e atingir resistências na ordem dos 150 MPa (Camões, 2002; Costa & Appleton, 2002).

## **2.3 Metodologia de Composição**

### **2.3.1 Evolução das metodologias de composição**

Desde cedo que se compreendeu que o estudo da composição de betões deve ser feito de modo a obter um sólido o mais compacto possível.

As primeiras misturas eram realizadas segundo regras empíricas, isto é, através de regras fixas obtidas através da experiência obtida ao longo dos anos. Estas regras não tinham em conta a natureza dos componentes, apenas asseguravam uma compacidade elevada com excesso óbvio de ligante. Apesar de até ao início do século XIX pouco se saber acerca das qualidades a exigir às matérias primas, já havia a consciência de que a natureza dos agregados, desde que fossem de qualidade, era pouco relevante para a resistência do betão e que apenas a sua granulometria influenciava este parâmetro. Preconizava-se a utilização de agregados tão grossos quanto possíveis, tendo em conta a espessura das juntas da alvenaria a ligar. Mesmo após a descoberta das cais hidráulicas e do cimento Portland, estas

regras prevaleciam, o que levava à produção de betões com resistências bastante superiores às necessárias.

Os estudos sobre a composição do betão começaram com Vicat, em 1828, onde referia a importância da granulometria dos agregados e da dosagem de água de amassadura na resistência das argamassas. Mais tarde, em 1881, aparece o primeiro método de cálculo da composição do betão e da argamassa elaborado por Préaudeau.

Já em 1892 marca-se o início do estudo da composição racional do betão, onde Feret descobre a lei fundamental que relaciona a resistência à compressão e a compacidade, definindo-a como o quociente entre a dosagem de cimento e a soma dos volumes de água e vazios. Também nesta altura, Feret descobre que o máximo da resistência era obtido através de misturas descontínuas. Em 1901 William B. Fuller fazia uma pesquisa independente à de Feret, onde também estudava a granulometria dos agregados, e juntamente com S.E. Thompson, em 1907, propuseram pela primeira vez uma curva granulométrica da mistura ótima dos agregados. Após Abrams, em 1918, introduzir a noção de módulo de finura e trabalhabilidade, Bolomey aperfeiçoa o trabalho de Fuller e Thompson em relação à curva granulométrica, em 1925 .

É em 1937 que surge o princípio do efeito de parede proposto por Caquot que também estabelece a lei da variação do índice de vazios com a máxima dimensão do agregado. Os aperfeiçoamentos de Bolomey e as noções de Caquot levaram Faury, em 1941, a apresentar uma nova curva granulométrica de referência que tem em conta a trabalhabilidade e o efeito de parede. Ainda nos dias de hoje o método de Faury é considerado como a mais cómoda aplicação das curvas de referência, pela sua simplicidade e parâmetros fundamentais que toma em consideração. Dez anos mais tarde Joisel também propõem uma curva granulométrica que para além de ter em conta a trabalhabilidade e o efeito de parede, também entra com a dosagem de cimento e de água (Coutinho S., 1973).

Continuando o trabalho de Fuller e Thompson, em 1931, Furnas enuncia o princípio fundamental da granulometria descontínua, onde refere que a compacidade do agregado grosso aumenta com a introdução de um componente mais fino, sem que haja expansão do volume total. Paralelamente ao trabalho de Furnas, e também com o objetivo de melhorar a curva de referência de Fuller a fim de obter uma compacidade maior, em 1930, Andreasen e Andersen, propõem um modelo semi-empírico onde se pressupõem a existência de uma distribuição contínua até partículas infinitamente pequenas. Em 1980 Funk e Dinger reconhecem que qualquer curva granulométrica de referência deve ter em conta a dimensão da menor partícula. Assim, estes investigadores combinaram a distribuição de Andreasen e Furnas, criando a distribuição de Alfred, onde o tamanho da menor partícula é considerado (Fennis & Walraven, 2012).

Para além dos métodos de composição de betões obtidos através das curvas de referência, onde o objetivo é obter uma mistura com o maior número de pontos possíveis coincidentes com a curva granulométrica de referência, foram também desenvolvidos métodos experimentais e métodos baseados em ábacos ou tabelas. Os métodos experimentais baseiam-se em realizar várias amassaduras até atingir a mistura ótima pretendida para um determinado fim e, quando essa mistura é alcançada, registam-se as quantidades de materiais utilizados, para que se possam realizar mais misturas a partir dos resultados obtidos. Este tipo de método é realizado em laboratório e é bastante moroso. Como exemplo desde métodos temos os métodos de Vallette, Buisson e Lézy. Já os métodos baseados em ábacos ou tabelas, como por exemplo o método ACI, consistem em obter uma mistura com base em misturas de composições preestabelecidas, com constituintes normalizados.

Nos últimos anos, com a necessidade de obter betões mais sustentáveis, com menores dosagens de cimento, aperfeiçoaram-se e desenvolveram-se métodos onde o objetivo é obter misturas de elevada compacidade, seguindo o princípio de que os elementos sólidos devem ser escolhidos de forma a que os vazios entre as partículas de grandes dimensões sejam preenchidos por partículas de menores dimensões e assim sucessivamente. Assim, para determinar a distribuição dos agregados, para além das curvas granulométrica de referência já referidas, existem ainda os modelos de otimização granulométrica, e os métodos de elementos discretos. O método de otimização granulométrica é um método analítico onde se calcula a compacidade total da mistura com base nas combinações geométricas dos grupos de partículas. Já o método de elementos discretos gera uma mistura de agregados virtual a partir de uma distribuição granulométrica (Fennis & Walraven, 2012).

### **2.3.2 Metodologia para o estudo da composição de betões de granulometria ótima**

O método de composição proposto por Lourenço *et al.* (2004) adotado no estudo apresentado nesta dissertação, baseia-se no método de composição das curvas de referência. É um método iterativo e versátil, permitindo a quem formula a composição, a correção de parâmetros e opções tomadas até obter o betão pretendido.

Seguem-se as etapas que constituem a metodologia da composição:

#### **1º. Especificação do comportamento do betão**

Este primeiro passo, normalmente especificado por parte de quem solicita o estudo, define a classe de resistência, a classe de exposição ambiental, a classe de consistência e a dimensão máxima do agregado, de acordo com a NP EN 206 (2000).

#### **2º. Escolha e caracterização dos constituintes**

A escolha do cimento, das adições, do adjuvante e dos agregados depende das especificações do comportamento do betão, visando a obtenção de um betão com o desempenho pretendido e com custo reduzido.

Após a escolha dos materiais deve-se proceder à caracterização das suas propriedades necessárias à correta composição do betão.

### 3º. **Previsão da compacidade**

A compacidade do betão,  $\sigma$ , representa-se pelo quociente entre o volume dos constituintes sólidos (agregado + ligante) e o seu volume unitário. Este valor é complementar ao índice de vazios,  $I$ , que por sua vez se define pelo volume total dos constituintes fluidos (água + ar + adjuvantes), por unidade de volume aparente de betão.

A previsão da compacidade é feita em função da consistência, do tipo e dosagem dos adjuvantes, da dimensão máxima e forma dos agregados.

Com base na expressão do índice de vazios atribuída a Faury, os autores deste método propõem ábacos de previsão da compacidade para classes de consistência de S2 a S4, que permitem prever a compacidade inicial, quando se utilizam areias roladas com britas. Contudo, após a realização das amassaduras experimentais, pode ser necessário proceder a pequenos acertos.

### 4º. **Quantificação dos constituintes da pasta ligante**

Nesta fase, há um conjunto de dados e conceitos fundamentais que permitem obter as quantidades dos constituintes. De um modo geral, a quantificação da pasta ligante pode ser feita seguindo o procedimento que se segue, determinando a:

#### *i. Compacidade da pasta ligante*

Sabendo as resistências mecânicas e o parâmetro de Feret ( $k_{1,j}$ ), pode-se determinar a compacidade da pasta ligante.

#### *ii. Dosagens do cimento e, eventual adição*

A quantidade destes constituintes pode ser obtida pela expressão de Feret ( $f_{c,j} = k_{1,j} \cdot \gamma^2$ ), o volume da parte fluida e as relações ponderais entre o cimento e adição.

#### *iii. Quantidade do adjuvante*

Conhecida a quantidade de cimento, a pernilagem do adjuvante em relação a este e a massa volúmica do adjuvante, determina-se o volume deste constituinte.

*iv. Quantidade de água*

A quantidade de água obtém-se retirando ao volume da parte fluida o volume de vazios e de adjuvante.

*v. Volume da pasta ligante*

É a soma do volume de todos os constituintes da pasta ligante.

**5º. Quantificação dos agregados, segundo as curvas de referencia**

Após a determinação do volume absoluto da pasta ligante, calcula-se o volume da mistura dos agregados, com base na expressão dos volumes absolutos (2.1):

$$mag = \sum_{i=1}^n ag_i = 1 - vpl = 1 - (c + s + a + adj + v) \quad (2.1)$$

A distribuição do volume absoluto da mistura de agregados, *mag*, pelos vários agregados, *agi*, é feita através das respetivas proporções, que são obtidas pelo ajuste da curva granulométrica da mistura dos agregados à curva granulométrica de referencia.

Neste trabalho adotaram-se duas curvas de referencia, a de Faury e a de Alfred, tendo como objetivo a comparação direta dos resultados entre ambas.

**6º. Quadro da composição estudada**

Calculadas as quantidades dos constituintes, deve elaborar-se um quadro constituído pelas quantidades em massa e em volume absoluto de cada material, para o volume aparente de  $1m^3$  de betão e para o volume a ensaiar.

**7º. Ensaio de estudo**

Por fim, são efetuados ensaios para caracterizar as propriedades do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Os resultados obtidos são comparados com as propriedades especificadas inicialmente, para validação da mistura definida.

Caso a especificação não se cumpra, devem ser efetuadas correções até que esta seja garantida.

Os ensaios devem ser realizados, preferencialmente, em laboratório.

## 2.4 Propriedades

Para a compreensão deste trabalho é importante perceber algumas propriedades do betão, como a trabalhabilidade no estado fresco e as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade no estado endurecido. Desta forma, neste subcapítulo abordar-se-á de uma forma genérica esses assuntos.

### 2.4.1 Propriedades do betão no estado fresco

No estado fresco pretende-se que o betão obtenha uma boa trabalhabilidade, isto é, deve ter plasticidade suficiente para que seja amassado, transportado, colocado, compactado e acabado, sem que haja a possibilidade de ocorrência de segregação.

A trabalhabilidade de um betão cresce com o aumento do volume de água, mas em contrapartida a compacidade diminui e com isto o betão fica mais poroso, com menores resistências mecânicas e mais permeável.

Apesar de não existir nenhum processo para medir a trabalhabilidade, esta relaciona-se com algumas características como a consistência e a coesão.

Para além da consistência também é importante determinar a massa volúmica, para averiguar se esta está de acordo com a prevista na composição.

#### 2.4.1.1 *Massa volúmica*

A massa volúmica no estado fresco deve estar de acordo com a massa volúmica prevista na composição. A sua determinação consiste na determinação da massa de betão fresco que preenche um determinado volume representativo, compactado com os meios previstos.

#### 2.4.1.2 *Consistência*

A consistência pode ser medida através de vários ensaios normalizados (abaixamento, Vêbê, compactação e espalhamento), contudo o método de abaixamento (Slump test), utilizando o cone de Abrams, é o que tem maior utilização a nível mundial. Neste ensaio mede-se o grau de deformação de um tronco de cone de betão, quando o molde é retirado rapidamente, e classifica-se a consistência do betão em 5 classes, onde a classe S1 corresponde a um material seco e a classe S5 a um material muito fluido. No entanto este ensaio não é ideal para caracterizar betões muito secos e de baixa coesão. Para esses casos pode-se recorrer ao

ensaio de compactação, onde se prevê também 5 classes de compactação consoante o grau de compactabilidade (Cunha, 2011; NP EN 206, 2000).

## 2.4.2 Propriedades do betão no estado endurecido

De todas as propriedades atribuídas ao betão no estado endurecido a resistência à compressão é, regra geral, a mais importante. Contudo, também a resistência à tração, bem como o módulo de elasticidade são propriedades importantes para fazer uma caracterização mecânica mais completa do betão.

### 2.4.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do betão. Este parâmetro, além de permitir obter uma ideia geral sobre a qualidade do betão, também permite relacionar a maioria das restantes propriedades do betão (Coutinho S., 1973).

Os resultados da resistência à compressão são obtidos com recurso a ensaios normalizados, usando para isso provetes cilíndricos ou cúbicos. Existe uma diferença de resultados para os dois tipos de provetes. Geralmente os valores obtidos nos provetes cúbicos são 20% superiores aos obtidos em provetes cilíndricos. Na caracterização do betão, as normas utilizam o valor obtido nos provetes cilíndricos como o valor de referencia. Segundo o EC2, para obter o valor característico da resistência à compressão,  $f_{ck}$ , subtrai-se 8 MPa ao valor médio de rotura aos 28 dias,  $f_{cm}$  (NP EN 1992-1, 2010; NP EN 206, 2000).

A tensão de rotura à compressão do betão em determinada idade,  $f_{cm}(t)$ , depende do tipo de cimento, da temperatura e das condições de cura. O EC2 considera que a uma temperatura de 20°C e uma cura adequada, esta tensão pode ser obtida pelas seguintes expressões:

$$f_{cm}(t) = \beta(t) \cdot f_{cm} \quad (2.2)$$

com,

$$\beta(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \right\} \quad (2.3)$$

O coeficiente de endurecimento,  $\beta(t)$ , representa a relação entre a resistência do betão à idade  $t$  e a resistência aos 28 dias;  $s$  é um coeficiente que depende do tipo de cimento e varia entre 0,20, para cimentos muito resistentes, e 0,38, para cimentos menos resistentes (NP EN 1992-1, 2010).

A Figura 2.1 define a evolução do coeficiente de endurecimento com o tempo para diferentes tipos de cimento.

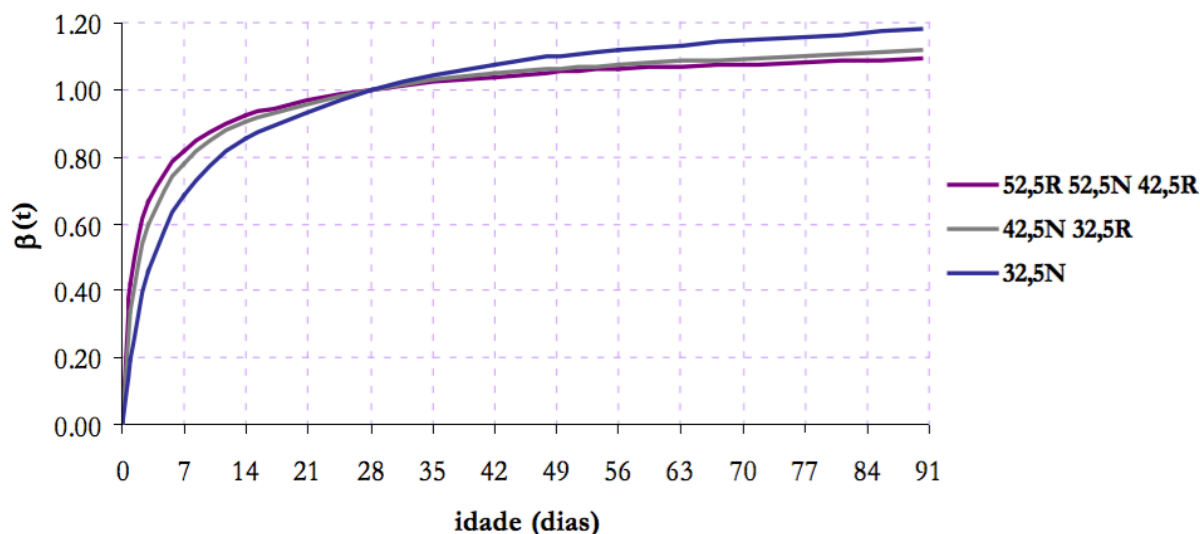


Figura 2.1 Coeficiente de endurecimento com a idade  $t$ , previsto no EC2, em função do cimento (Costa H. S., 2007)

Devido às reações pozolânicas lentas das cinzas volantes, as resistências iniciais nos betões onde parte do cimento é substituído por cinzas volantes são inferiores às resistências dos betões correntes. Contudo, é de notar que ao longo do tempo as resistências continuam a evoluir devido à reação pozolânica das cinzas volantes (Camões & Reis, 2012).

#### 2.4.2.2 Resistência à tração e ao corte

É de conhecimento geral que os betões têm fraco comportamento à tração. Pode-se afirmar que a sua resistência à tração é cerca de 90% inferior à resistência à compressão (Coutinho S., 1973).

Os valores da resistência à tração podem ser obtidos através do ensaio de compressão diametral, do ensaio de flexão e do ensaio de tração direta. Normalmente utiliza-se o primeiro ensaio referido.

Tal como acontece com a resistência à compressão, também a resistência à tração,  $f_{ctm}$ , pode estimar-se nas várias idades, com o recurso ao coeficiente de endurecimento referido anteriormente, sendo igual a:

$$f_{ctm}(t) = \beta(t)^\alpha \cdot f_{ctm} \quad (2.4)$$

onde os valores de  $\alpha$  dependem do tempo; para tempos inferiores a 28 dias utiliza-se  $\alpha = 1$ , e para tempos iguais ou superiores a 28 dias  $\alpha = 2/3$ .

Sabendo a tensão característica de rotura do betão à compressão aos 28 dias,  $f_{ck}$ , podem relacionar-se os valores de  $f_{ctm}$  através das seguintes expressões analíticas.

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \leq C50/60 \quad (2.5)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60 \quad (2.6)$$

#### 2.4.2.3 Módulo de elasticidade e relação tensão-extensão

A lei constitutiva do betão é constituída por um troço ascendente praticamente linear, por um troço ascendente de deformação elasto-plástica até à rotura e por fim o troço descendente pós rotura.

Na Figura 2.2 apresentam-se alguns diagramas, medidos em prismas carregados axialmente, que ilustram o comportamento do betão quando sujeito a ações quase instantâneas:

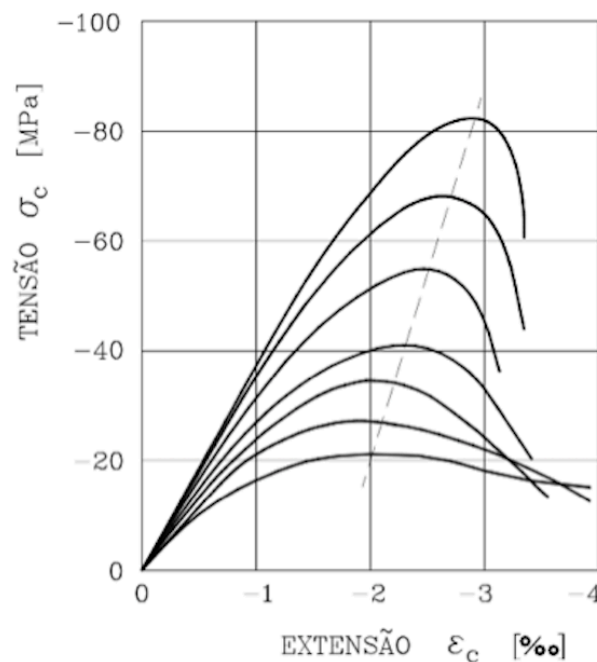


Figura 2.2 Diagramas tensão extensão do betão de diferentes resistências (Costa & Appleton, 2002)

Através dos diagramas podemos verificar que as tensões máximas de compressão,  $\sigma_c$ , são atingidas para valores de deformação,  $\varepsilon_c$ , entre 2 e 3%, aumentando com a resistência do betão à compressão. Também se observa que os betões com menor resistência apresentam diagramas com maior curvatura até ao ponto de tensão máxima e uma maior capacidade de deformação, apresentando deste modo um comportamento mais dúctil do que os betões de maior resistência.

Para o dimensionamento das secções de betão, o EC2 estabelece três hipóteses para a relação tensão-extensão: diagrama parábola-rectângulo, diagrama bi-linear, e a distribuição retangular de tensões.

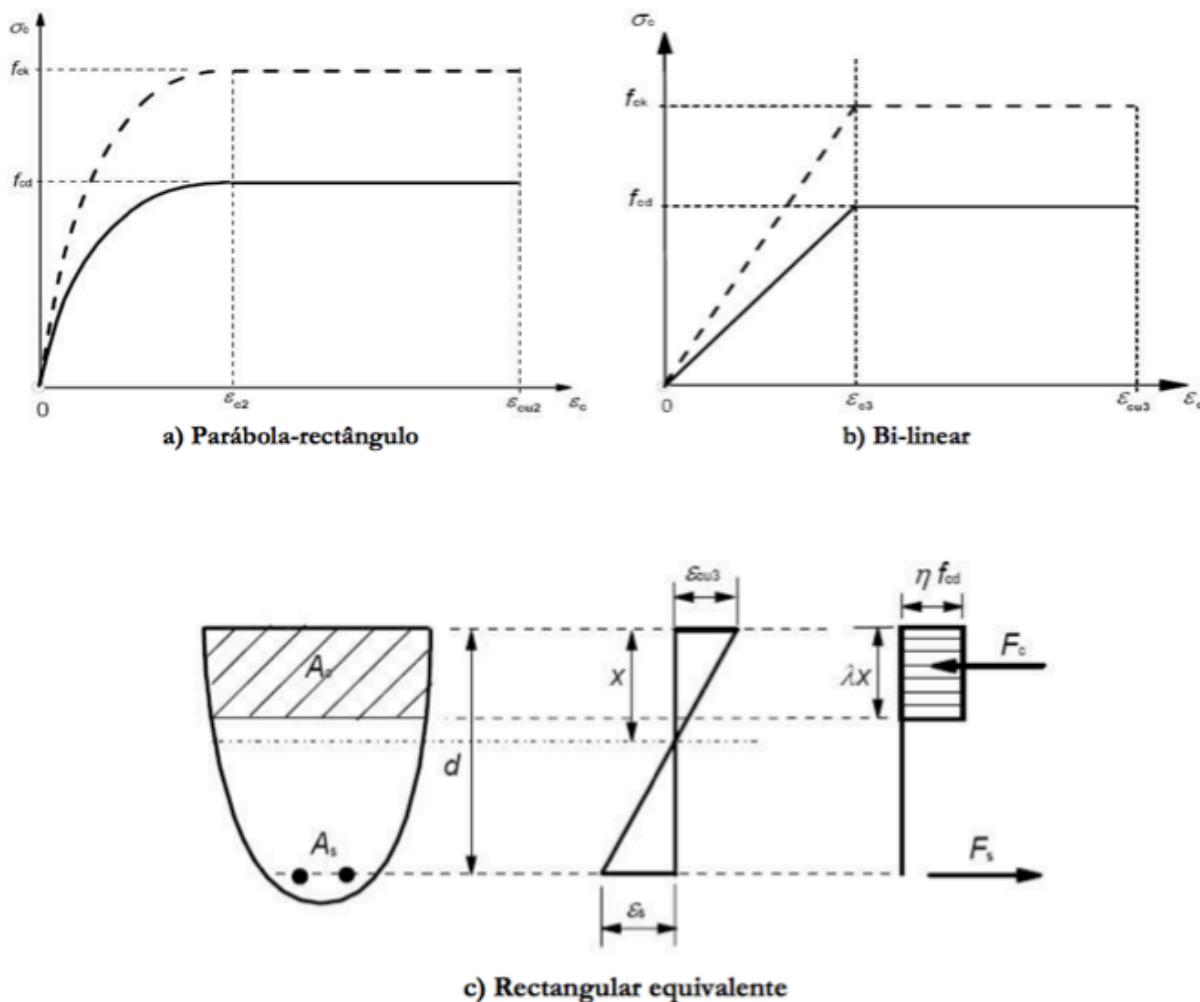


Figura 2.3 Hipóteses da lei constitutiva do betão considerada no EC2 (NP EN 1992-1, 2010)

O módulo de elasticidade do betão é uma característica que serve para caracterizar a deformabilidade deste material e é influenciado pela pasta ligante, pelo agregado, pelas ligações cimento/agregado e pela compactidade do betão. Visto que a pasta ligante endurece ao longo do tempo, o módulo de elasticidade depende também da idade do betão, podendo afirmar-se que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do betão (Costa & Appleton, 2002).

Devido ao facto de o diagrama tensão-extensão não ser linear, existem dois tipos de módulo de elasticidade: o módulo tangente e o módulo secante. O primeiro é definido pela inclinação da tangente a cada ponto da curva, já o segundo define-se pela inclinação da reta que une a origem a cada ponto da curva.

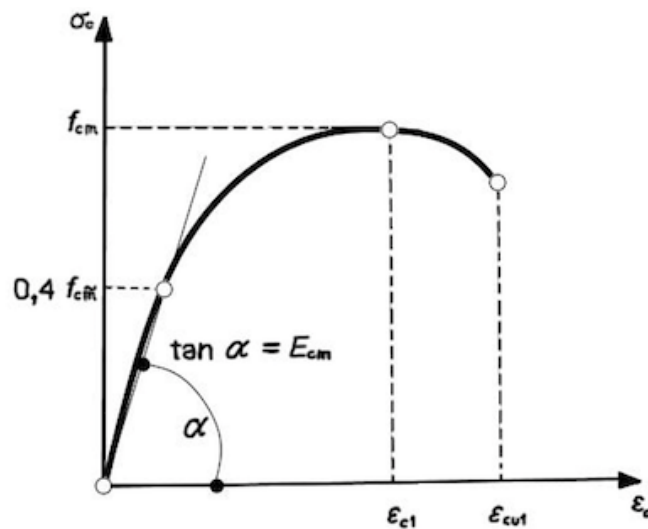


Figura 2.4 Representação esquemática da relação tensões extensões para a análise estrutural (NP EN 1992-1, 2010)

Para o cálculo das deformações numa estrutura para cargas próximas das de serviço, pode-se recorrer ao módulo de elasticidade secante definido para uma tensão na ordem de 40% da tensão de rotura, uma vez que é este o valor representativo da tensão do betão para essa situação de carga (NP EN 1992-1, 2010).

O módulo de elasticidade à idade  $t$ ,  $E_{cm}(t)$ , previsto pelo EC2 depende do coeficiente de endurecimento,  $\beta(t)$ , e do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias,  $E_{cm}$ , e é dado pela seguinte expressão:

$$E_{cm}(t) = E_{cm} \cdot \beta(t)^{0,3} \quad (2.7)$$

O EC2 também estabelece uma expressão para comparar os valores do módulo de elasticidade experimentais, com base no valor da tensão média de rotura à compressão como se pode ver pela expressão (2.8).

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (2.8)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, apresentam-se as principais propriedades dos materiais selecionados para a realização do estudo experimental de betões com reduzida dosagem de cimento, bem como a metodologia usada na sua formulação. Além disso, descrevem-se os métodos de preparação, cura e ensaio dos provetes.

#### 3.1 Caracterização dos constituintes

A prévia caracterização dos constituintes é essencial a qualquer metodologia de composição de betões.

##### 3.1.1 Agregados

A classificação dos agregados em relação às suas formas e dimensões é importante para garantir uma elevada compacidade, e um baixo índice de vazios, melhorando as propriedades físicas e mecânicas. Selecionaram-se e caracterizam-se 4 tipos de agregados com diferentes dimensões; uma areia fina 0/3 *mm* (agregado 1), uma área média 0/4 *mm* (agregado 2), um areão 4/8 *mm* (agregado 3) e uma brita calcária 6/14 *mm* (agregado 4).

As partículas das areias e do areão são predominantemente roladas ao contrário da brita 1 (agregado 4), que devido à britagem mecânica apresenta partículas de forma angular.

As curvas granulométricas dos agregados utilizados na formulação do betão estão representadas na Figura 3.1, e as massas volúmicas na Tabela 3.1.

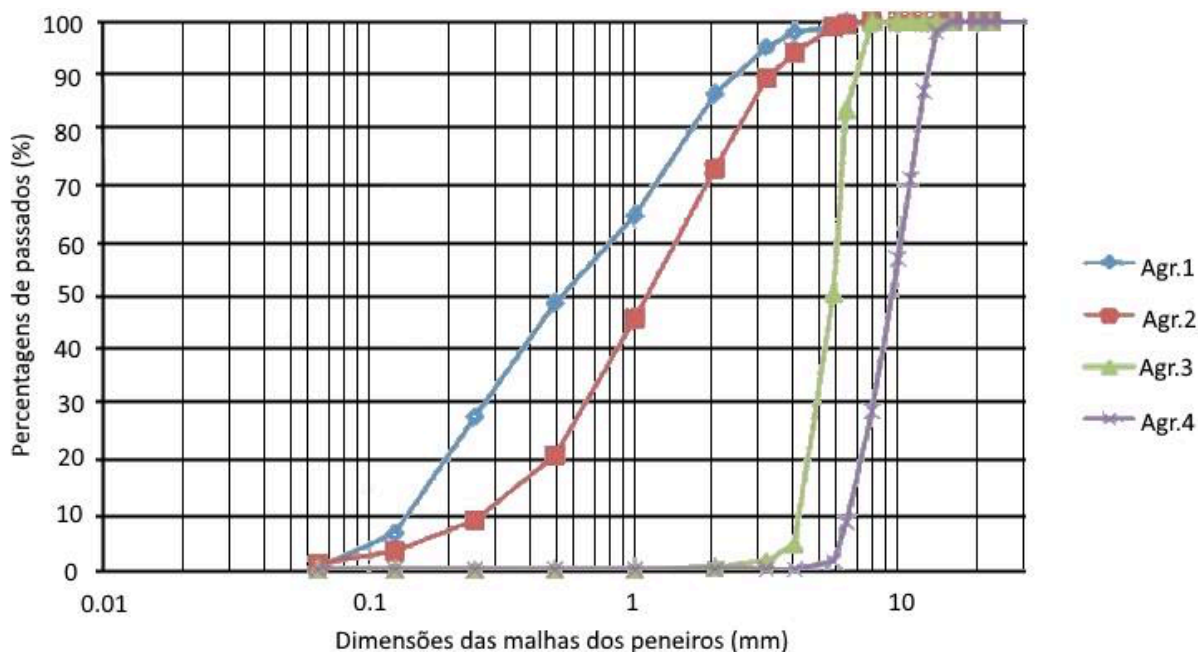


Figura 3.1 Análise granulométrica dos agregados

Tabela 3.1 Massa volúmica dos agregados

Agregado	AF 0/3	AM 0/4	Areão	Brita 1
Massa volúmica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	2,63	2,63	2,66

### 3.1.2 Água de amassadura

A água utilizada em todas as amassaduras foi a proveniente da rede pública de Coimbra. Não foram analisadas as suas características, uma vez que a especificação do LNEC E372 (1993) considera que basta a água ser potável para que seja considerada adequada para a produção de betões (E372, 1993).

### 3.1.3 Ligantes

Nos betões com reduzida dosagem de cimento, a pasta ligante deve ser constituída por cimento em baixa dosagem e complementada com adições.

#### 3.1.3.1 Cimento

Para a formulação deste tipo de betões é essencial o uso de um cimento de elevada resistência. O cimento utilizado no fabrico dos betões produzidos no decurso da campanha

experimental foi do CEM I 52,5R fornecido pela Secil. Este cimento tem na sua composição uma percentagem de clínquer entre 95 e 100%.

### 3.1.3.2 Adições

As adições têm como finalidade aumentar a trabalhabilidade e a compacidade da pasta ligante, e melhorar algumas propriedades do betão. Nas composições estudadas, as adições utilizadas foram o fíler calcário e as cinzas volantes, cujas massas volúmicas se apresentam na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Massa volúmica dos ligantes

Ligante	Cimento 52,5 R	Fíler Calcário	Cinzas Volantes
Massa volúmica (Kg/dm <sup>3</sup> )	3,12	2,70	2,30

### 3.1.4 Adjuvante superplastificante

Com o objetivo de reduzir a água de amassadura utilizada na pasta ligante, é essencial o uso de adjuvantes redutores de água, também conhecidos como superplastificantes. Este material aumenta a dispersão das partículas sólidas, levando à necessidade de menores quantidades de água de amassadura, sem que a trabalhabilidade seja afetada.

O superplastificante utilizado na mistura foi o Glenium Sky 526 da BASF. A massa volúmica deste adjuvante é de 1,06 Kg/dm<sup>3</sup> e o seu fabricante recomenda uma dosagem de 0,4 a 1,0 litros por 100 Kg de ligante.

## 3.2 Metodologia de composição

No desenvolvimento do trabalho experimental, a composição dos betões com reduzidas dosagens de cimento baseou-se na metodologia proposta por Lourenço *et al.* (2004), a qual se baseia no método das curvas granulométrica de referência. O procedimento consiste no cumprimento das etapas expostas no fluxograma da Figura 3.2:

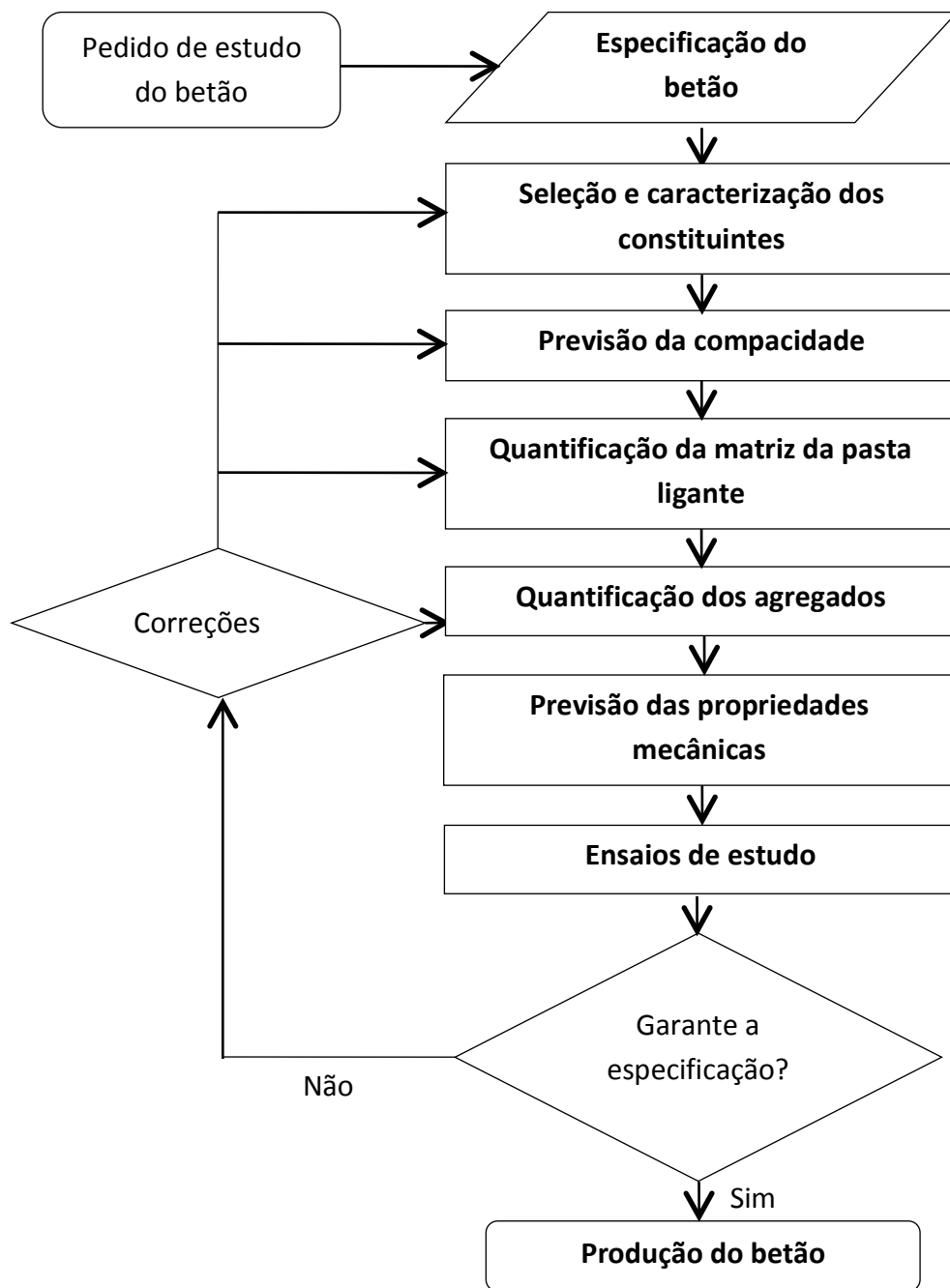


Figura 3.2 Fluxograma representativo do estudo da composição de um betão (Lourenço *et al.*, 2004)

### 3.2.1 Especificação do betão

O primeiro passo do estudo da composição do betão é a sua especificação que deve ter em conta os aspetos que se seguem que por sua vez devem estar de acordo com a norma NP EN 206 (2000):

- Classe de resistência;
- Classe de exposição ambiental;
- Classe de consistência;
- Dimensão máxima dos agregados.

#### 3.2.1.1 Classe de resistência

O betão classifica-se de acordo com a sua resistência à compressão. A Caracterização da resistência à compressão é feita através das classes, que estão apresentadas na Tabela 3.3, cujos índices representam os valores mínimos característicos da tensão resistente à compressão aos 28 dias,  $f_{ck}$ , para provetes cúbicos e cilíndricos respetivamente (Lourenço *et al.* (2004); NP EN 206, 2000).

Tabela 3.3 Classes de resistência à compressão do betão de massa volúmica normal e pesada (NP EN 206, 2000)

Classe de resistência		C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115
$f_{ck}$ (Mpa)	Cilindros	8	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
	Cubos	10	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115

#### 3.2.1.2 Classe de exposição ambiental

A classe de exposição depende da agressividade das diversas ações ambientais, físicas e químicas a que o betão vai estar exposto. A norma NP EN 206 (2000) define as seguintes classes de exposição, com vários graus de intensidade da ação prevista (Lourenço *et al.*, 2004):

Tabela 3.4 Classes de exposição ambiental (Lourenço *et al.*, 2004)

Classe	Descrição do ambiente
X0	Classe de exposição para ausência de risco ou ataque
XC1, XC2, XC3 e XC4	Classe de exposição para o risco de corrosão induzida por carbonatação
XD1, XD2 e XD3	Classe de exposição para o risco de corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar
XS1, XS2 e XS3	Classe de exposição para o risco de corrosão induzida por cloretos da água do mar
XF1, XF2, XF3 e XF4	Classes de exposição para o ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes

### 3.2.1.3 Classe de consistência

Para a classificação da consistência a norma NP EN 206 (2000) elege 4 tipos de ensaios (abaixamento, Vêbê, compactação e espalhamento). Para definir este parâmetro, utilizou-se, no trabalho desenvolvido, o ensaio de abaixamento. Quando o betão não apresenta coesão suficiente para medir a consistência, recorre-se ao ensaio de compactabilidade. A classe de consistência por abaixamento varia entre a classe S1 a S5, enquanto a de compactabilidade varia entre C0 a C4. Em ambos os ensaios a classe inferior corresponde a betões mais secos e a classe superior betões mais fluidos (Lourenço *et al.*, 2004; NP EN 12350-2, 2009).

Tabela 3.5 Classes do ensaio de abaixamento e de compactabilidade (NP EN 206, 2000)

Classe	Abaixamento (mm)	Classe	Grau de compactabilidade
S1	10 a 40	C0	$\geq 1,46$
S2	50 a 90	C1	1,45 a 1,26
S3	100 a 150	C2	1,25 a 1,11
S4	160 a 210	C3	1,10 a 1,04
S5	$\geq 220$	C4	$<1,04$

#### 3.2.1.4 *Dimensão máxima do agregado*

A máxima dimensão do agregado corresponde à máxima dimensão do agregado mais grosso. Neste estudo o agregado mais grosso utilizado foi a Brita 1 que tem como dimensão máxima o valor de 14 *mm*.

### **3.2.2 Escolha e caracterização dos constituintes**

A escolha dos constituintes é função da especificação do betão solicitado, visando obter um material com o desempenho pretendido a um custo reduzido.

#### 3.2.2.1 *Agregados*

Uma vez que a distribuição granulométrica influencia a compacidade, e que quanto maior a compacidade da mistura maiores são as resistências mecânicas obtidas, vários autores afirmam que um dos princípios de formulação de betões com reduzidas dosagens de cimento passa pela utilização de uma distribuição granulométrica contínua. A ideia é preencher os vazios entre as partículas de grandes dimensões com partículas mais pequenas e assim sucessivamente. Assim, forma-se uma mistura estável sob o efeito da gravidade, dado que as partículas se encontram em contacto umas com as outras.

Como se pode observar na Figura 3.3, quando a mesma quantidade de partículas ocupa um volume menor, o resultado é uma mistura com maior compacidade, e conseqüentemente, com menos vazios. Com a redução de vazios, aumenta o excesso de água, melhorando a fluidez e conseqüentemente a trabalhabilidade da mistura (Fennis & Walraven, 2012).

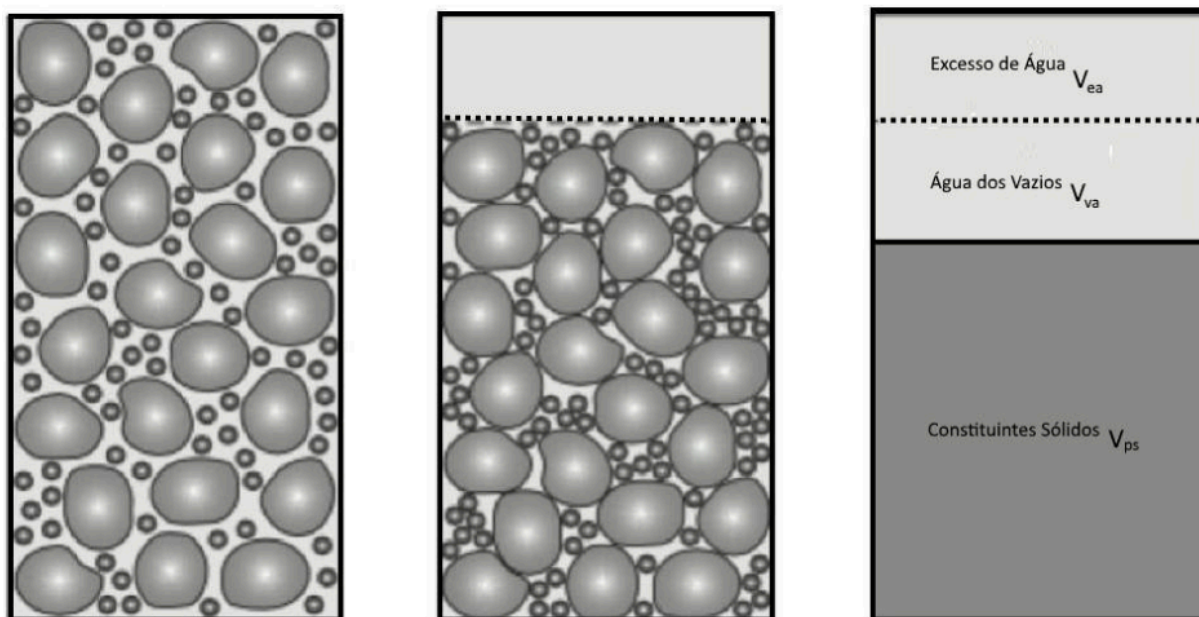


Figura 3.3 Comparação do volume ocupado por uma mistura de compactação normal e por uma mistura de elevada compactação (Fennis & Walraven, 2012)

### 3.2.2.2 Ligantes

#### 3.2.2.2.1 Cimento

Outro princípio para o desenvolvimento de um betão com baixa dosagem de cimento consiste na escolha do cimento. Este deve ter o menor impacto ambiental possível e ao mesmo tempo deve ter um bom desempenho e elevada resistência. Os cimentos compósitos (CEM II e CEM III) com classes de resistência de 42,5 e 52,5, bem como o cimento Portland (CEM I) com classe de resistência 52,5 são apropriados para a composição deste tipo de betões (Tilo Proske, 2014).

#### 3.2.2.2.2 Adições

O aumento da compactação, além de ser benéfico quanto à necessidade de água de amassadura, permite também diminuir o volume entre as partículas de cimento. Quanto menor for esse volume, menor é a quantidade necessária de produtos de hidratação, levando à obtenção de maiores resistências.

Na Figura 3.4, encontram-se dois recipientes de igual volume com partículas de cimento, onde parte dele é substituído por adições. Nos recipiente da esquerda as partículas da adição têm dimensões semelhantes às do cimento, enquanto no da direita as partículas são de dimensões inferiores às do cimento. Observa-se que a compactação da pasta do recipiente do lado direito é superior à do recipiente do lado esquerdo, levando a uma

diminuição do volume de pasta ligante, enquanto as partículas de cimento se mantêm próximas.

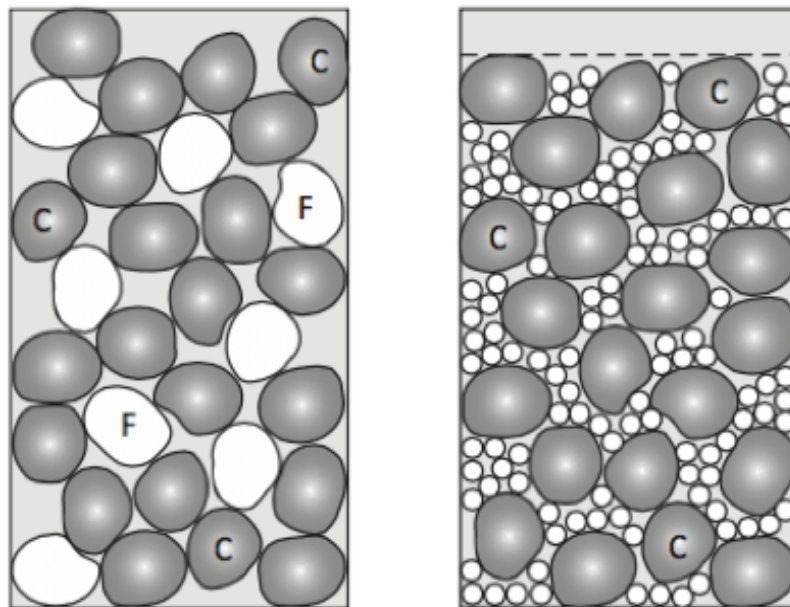


Figura 3.4 Comparação do volume ocupado por uma pasta ligante com adições (F) com finura idêntica à do cimento (C) e por adições com finura superior à do cimento (Fennis , Walraven, & Uijl, 2013)

### 3.2.2.3 Adjuvantes

Afim de diminuir a quantidade de água de amassadura, é fulcral a utilização de um superplastificante, uma vez que permite uma redução da dosagem de água, sem que a trabalhabilidade seja muito afetada.

### 3.2.3 Compacidade

A compacidade,  $\sigma$ , define-se pelo volume da parte sólida do betão por unidade de volume aparente do mesmo. Já o índice de vazios,  $I$ , é o seu valor complementar para a unidade ( $\sigma + I = 1$ ) e determina-se pelo volume total da parte líquida por unidade de volume aparente de betão (Lourenço *et al.*, 2004).

Alguma bibliografia apresenta ábacos de previsão da compacidade, com base na expressão de índice de vazios atribuída a Faury:

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} + \frac{K'}{R/D_{max} - 0,75} \quad (3.1)$$

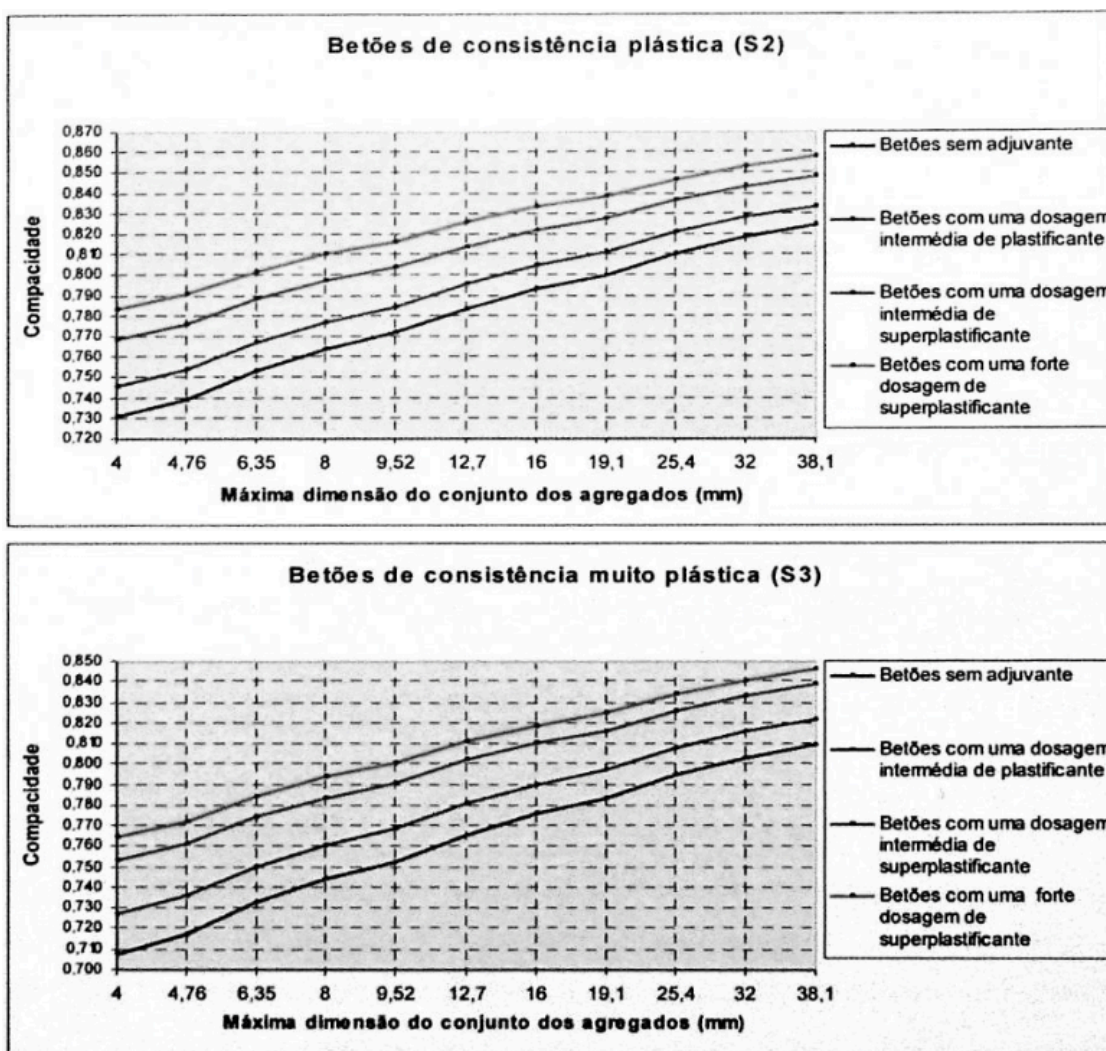
onde,

$K$  é o coeficiente numérico que depende da consistência do betão, da potencia de compactação, da natureza dos agregados e também da utilização dos adjuvantes que alteram a reologia do betão enquanto fresco;

$K'$  é um parâmetro que depende da potencia de compactação;

$R$  é o raio médio do molde da peça, e deve-se considerar, em segurança, a situação limite de  $R=D_{máx}$ .

Lourenço *et al.* (2004) desenvolveu ábacos de previsão de compacidade para consistências S2, S3 e S4 que constituem uma boa previsão inicial; no entanto, após uma ou mais amassaduras, pode ser necessário proceder a eventuais acertos (Figura 3.5).



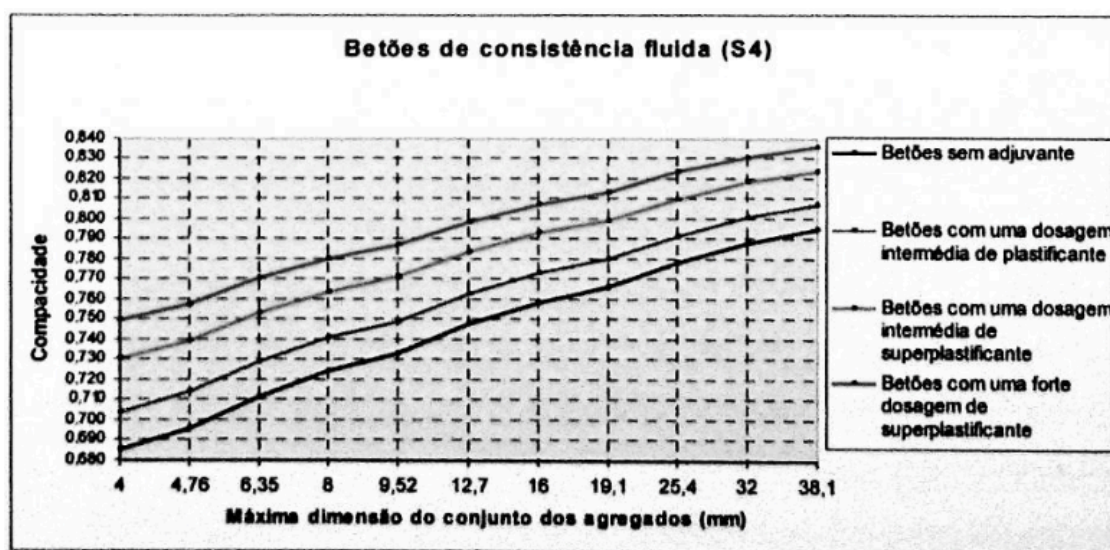


Figura 3.5 Ábacos de previsão da compactação, para classes de consistência S2, S3 e S4 (Lourenço *et al.* 2004)

Como já foi várias vezes referido, nos betões com reduzida dosagem de cimento, a compactação da mistura é um parâmetro de extrema importância. Quanto mais compacta for, mais próximas estão as partículas de cimento e, além disso, o índice de vazios será menor, levando à necessidade de menores quantidades de água para a hidratação (Fennis, Walraven, & Uijl, 2013).

### 3.2.4 Quantificação da pasta ligante

Na quantificação da pasta ligante é necessário definir o tipo de ligante e as suas dosagens, bem como a dosagem de água e de adjuvantes. Note-se que os betões com reduzidas dosagens de cimento são de estudo bastante recente e as dosagens de cimento utilizadas são inferiores às requeridas na norma NP EN 206 (2000). Resume-se um procedimento de quantificação da matriz ligante:

- 1º. Escolha de um cimento com elevada resistência, como os cimentos compósitos e de escórias (CEM II e CEM III) com classes de resistência de 42,5 e 52,5, ou o cimento Portland (CEM I) com classe de resistência 52,5, e estabelece-se a dosagem;
- 2º. Escolha da adição, sendo adequadas as cinzas volantes e o fíler calcário como substituto do volume das partículas de cimento. Define-se a sua dosagem em função da dosagem de cimento;
- 3º. Escolha de um adjuvante superplastificante. A sua dosagem normalmente é recomendada pelo fabricante, em função da massa de cimento;

- 4º. Estimativa do volume de vazios,  $v$ , que depende, essencialmente da dimensão máxima e da forma do conjunto dos agregados, embora também dependa da compactidade e da compactação do betão. (Tabela 3.6)

**Tabela 3.6 Previsão de vazios com base na dimensão máxima do agregado (Lourenço et al, 2004)**

Máxima dimensão do conjunto dos agregados (mm)	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8
Volume de vazios (litros de ar/m <sup>3</sup> de betão)	30	25	20	15	10	5

- 5º. Saber as propriedades dos constituintes da pasta e determinar as proporções volumétricas e ponderais dos mesmos, por m<sup>3</sup> de betão.

A dosagem pretendida dos constituintes pode ser definida com recurso à Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 Metodologia de quantificação dos parâmetros da pasta ligante (Costa H. S., 2007)**

Constituinte ou parâmetro	Massa (Kg)	Vol. Abs. (m <sup>3</sup> )	Parâmetros conhecidos	Parâmetros a determinar
Cimento	$C$	$c$	$C, \rho_c$	$c=C/\rho_c$
Cinzas Volantes	$CV$	$cv$	$CV, \rho_{cv}$	$cv=CV/\rho_{cv}$
Fíler	$F$	$f$	$F, \rho_f$	$f=F/\rho_f$
Adição	$S$	$s$	$cv, f$	$s=cv+f$
Adjuvante	$Adj$	$adj$	$Ad, \rho_{Ad}$	$adj=Ad/\rho_{Adj}$
Ar	-	$v$	$v$	-
Água	$A$	$a$	$l, v, adj$	$a=l-adj-v$
Ligante	$L=C+CV+F$	$vl$	$c, cv, f$	$vl=c+cv+f$
Pasta ligante	$L+A+Adj$	$vpl$	$vl, a, v, adj$	$vpl=vl+a+v+adj$
Razão A/C	-	-	$A, C$	$A/C$
Razão A/L	-	-	$A, L$	$A/L$
$\gamma$	-	-	$vl, vpl$	$\gamma=vl/vpl$

A fim de prever a tensão de rotura à compressão, utiliza-se a expressão (3.2) de Feret:

$$f_{c,j} = K_{1,j} \cdot \gamma^2 \tag{3.2}$$

onde,  $\gamma$  corresponde à compactidade da pasta ligante e  $K_{1,j}$  é um parâmetro caracterizador do cimento ou da sua combinação com adições e neste trabalho considerou-se a Tabela 3.8 elaborada por Lourenço et al. (2004):

Tabela 3.8 Coeficientes de Feret  $K_{1,j}$  (Lourenço *et al.*, 2004)

Classe de resistência do cimento	32,5 N	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R	42,5 R
Tipo de adição	-	-	Cinzas volantes	Cinzas volantes	Cinzas volantes	Cinzas volantes	Cinzas volantes	Cinzas volantes	Sílicas de fumo	Sílicas de fumo	Sílicas de fumo
Porcentagem da adição em relação ao cimento	0%	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	5%	10%	15%
k1,7 (domínio de variação do parâmetro atribuído para resistências aos 7 dias após a amassadura)	165 a	265 a	240 a	235 a	225 a	215 a	205 a	195 a	290 a	285 a	275 a
	195	300	260	250	245	235	225	215	310	300	295
k1,28 (domínio de variação do parâmetro atribuído para resistências aos 28 dias após a amassadura)	265 a	315 a	300 a	290 a	285 a	275 a	265 a	255 a	340 a	330 a	320 a
	290	350	320	310	305	295	285	275	360	350	340

### 3.2.5 Quantificação dos agregados

Após a determinação do volume absoluto da pasta ligante,  $vpl$ , calcula-se o volume absoluto da mistura de agregados, com base na expressão dos volumes absolutos:

$$mag = \sum_{i=1}^n ag_i = 1 - vpl = 1 - (c + s + a + adj + v) \quad (2.1)$$

A distribuição do volume absoluto da mistura de agregados,  $mag$ , pelos vários agregados,  $ag_i$ , é feita através das respetivas proporções, que são obtidas pelo ajuste da curva granulométrica da mistura de agregados à curva granulométrica de referencia (Lourenço *et al.*, 2004).

Neste trabalho adotaram-se duas curvas de referencia, a de Faury e a de Alfred.

#### 3.2.5.1 Curva de Faury

A curva granulométrica de referencia de Faury é constituída por dois segmentos de reta,  $\overline{UV}$  e  $\overline{VW}$ , num diagrama em que as ordenadas correspondem ao material que passa no peneiro, em %, e as abcissas correspondem à abertura da malha dos peneiros, em  $mm$  (Coutinho S., 1973). Assim, observando a Figura 3.6, pode-se concluir que o segmento  $\overline{UV}$  representa o domínio do material granular fino e médio, e o segmento  $\overline{VW}$  representa o material grosso.

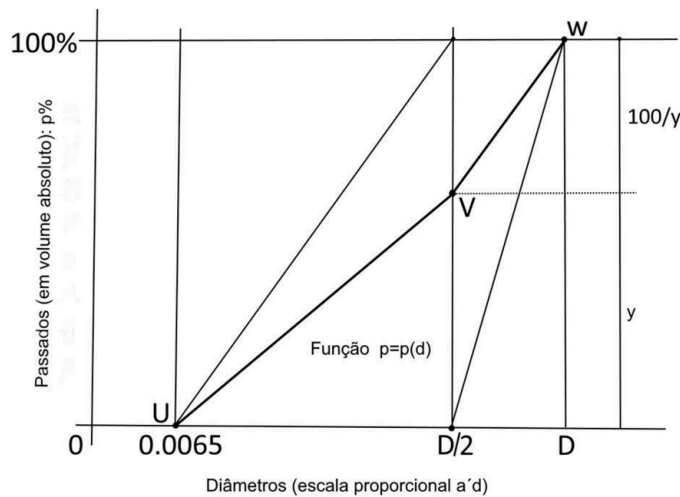


Figura 3.6 Curva de Faury

Os segmentos de reta  $\overline{UV}$  e  $\overline{VW}$  dependem do tipo de agregados, da consistência pretendida e dos meios de compactação. A evolução das retas é dada pelas seguintes expressões:

$$\overline{UV}: p(d) = \frac{y \left( \sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{d} \right)}{\sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}/2}} \quad (3.3)$$

$$\overline{VW}: p(d) = \frac{x \sqrt[5]{d} + y \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} - 100 \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}/2}}{\sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} - \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}/2}} \quad (3.4)$$

onde,

$$y = A_F + 17 \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B_F}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (3.5)$$

$$x = 100 - y \quad (3.6)$$

y: igual a  $p(D/2)$  é a ordenada correspondente ao ponto de abcissa  $D/2$

$A_F$ : coeficiente que varia com a natureza dos agregados e a potencia de compactação necessária à colocação do betão em molde, sendo este obtido pela soma do abaixamento pretendido,  $Sl$ , com o coeficiente  $A_{F0}$ , cujos valores se encontram definidos na Tabela 3.9:

Tabela 3.9 Valor do parâmetro  $A_F$  de Faury (Lourenço *et al.*, 2004)

$A_F = A_{F0} + Sl$ (cm)	
Agregados	$A_{F0}$
Areias roladas e agregados grossos britados	20
Areias e agregados grossos rolados	18

$B_F$ : é um coeficiente dependente dos meios de compactação utilizados. Os seus valores encontram-se atribuídos na tabela 3.10:

Tabela 3.10 Valor do parâmetro  $B_F$  de Faury (Lourenço *et al.*, 2004)

Compactação	potente	média	fraca
B	1	1,5	2

A curva granulométrica de Faury,  $p(d)$ , refere-se ao conjunto de agregados e ligante. Para determinar a curva de referencia referente só à totalidade dos agregados,  $p'(d)$ , necessita-se retirar à curva  $p(d)$  a percentagem de cimento e adição,  $p_{c+s}$ .

$$p_{c+s} = \frac{c + s}{(1 - I)} \cdot 100 = \frac{c + s}{1 - \left(\frac{a + adj + v}{1000}\right)} \cdot 100 \quad (3.7)$$

$$p'(d) = (p(d) - p_{c+s}) \frac{100}{(100 - p_{c+s})} \quad (3.8)$$

### 3.2.5.2 Curva de Alfred

A curva de referência de Alfred, desenvolvida por Funk e Dinger, é dada pela seguinte expressão:

$$p'(d) = 100 \left( \frac{d^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \right) \quad (3.9)$$

onde:

$p'(d)$ : é a percentagem de passados, em volume absoluto, do conjunto de agregados, em  $d$  (peneiro com malha com esta abertura, em  $mm$ )

$d$ : dimensão da malha do peneiro, em  $mm$ , onde passa determinada quantidade de elementos granulares

$D_{\max}$ : corresponde à máxima dimensão do agregado mais grosso, medido em  $mm$

$D_{\min}$ : corresponde à mínima dimensão do agregado mais fino, medido em  $mm$

$q$ : coeficiente de distribuição

Através de simulações computacionais, Funk e Dinger concluíram que para obter uma elevada compacidade deve-se utilizar um valor de 0,37 para o coeficiente de distribuição.

### 3.2.5.3 Ajustamento da curva da mistura a qualquer das curvas de referencia, para determinação das proporções em volume absoluto

A curva granulométrica da mistura real, correspondente à mistura proporcional dos agregados, define-se pela seguinte expressão:

$$p_{mist}(d_j) = \sum_{i=1}^r (p_i \cdot p_i(d_j)) \quad (3.10)$$

onde,

$p_{mist}(d_j)$  : percentagem da mistura, das  $r$  classes de agregados utilizadas, que passa através do peneiro de malha  $d_j$

$p_i$  : proporção, em volume absoluto, com que o agregado da classe  $i$  entra na mistura

$p_i(d_j)$  : percentagem do agregado da classe  $i$  que passa através do peneiro da malha  $d_j$

As proporções dos vários agregados,  $P$ , obtêm-se através do ajuste da curva granulométrica da mistura à curva granulométrica de referencia. Este ajuste pode ser feito através de um processo gráfico, quando não se utilizem meios de cálculo baseados em programação, ou no processo baseado no método dos mínimos quadrados.

### 3.2.5.4 Determinação das massas de cada classe, a partir das proporções

Depois de conhecidas as proporções  $P_i$  em relação ao volume absoluto da mistura de agregados,  $mag$ , também conhecido, determinam-se os vários volumes absolutos das classes granulométricas consideradas,  $ag_j$ :

$$ag_i = P_i \cdot mag \quad (3.11)$$

Sabendo as massas volúmicas das partículas referentes a cada uma das classes,  $\rho_{p,i}$ , calcula-se a massa dos vários agregados,  $Ag_j$ :

$$Ag_i = ag_i \cdot \rho_{p,i} \quad (3.12)$$

## 3.2.6 Quadro da composição estudada

Definidas as quantidades volumétricas e ponderais de cada um dos constituintes para a composição do betão, cujas somas representam o volume unitário do betão e a massa volúmica do betão no estado fresco, deve-se elaborar um quadro resumo com esses valores que permitirá estudar a mistura do betão.

As quantidades dos constituintes do betão obtêm-se através do produto dos respetivos valores unitários pela quantidade de betão a produzir.

Pode, também, constar na tabela valores de quantidades que são indicadores importantes, bem como valores de algumas relações.

### **3.2.7 Ensaio de estudo**

Por fim, chega-se à fase de examinar os desempenhos em relação ao que foi especificado.

Na secção que se segue abordar-se-ão os métodos de preparação, cura e ensaio de provetes, e no capítulo seguinte analisar-se-ão os resultados dos ensaios mecânicos.

## **3.3 Métodos de preparação, cura e ensaio de provetes**

### **3.3.1 Armazenamento dos constituintes**

O armazenamento dos ligantes foi realizado em recipientes com fecho herméticos, enquanto os adjuvantes se mantiveram no recipiente hermético do fabricante.

No que diz respeito aos agregados, estes foram secos em estufa e de seguida conservados em recipientes idênticos aos utilizados nos ligantes.

### **3.3.2 Equipamento usado na amassadura dos betões**

Na preparação das amassaduras do betão, começou por utilizar-se uma balança digital com precisão de um grama para pesar os constituintes, uma misturadora de eixo vertical para efetuar as amassaduras, o cone de Abrams para caracterizar a consistência do betão no estado fresco, e por fim utilizaram-se os moldes para moldar os provetes de betão durante as primeiras 24 horas e a mesa vibratória para compactar os provetes de betão.

#### *3.3.2.1 Misturadoras*

Para a realização da amassadura utilizou-se uma misturadora de eixo vertical de 20 l (Figura 3.7).



Figura 3.7 Misturadora de eixo vertical de 20 l usada nas amassaduras

### 3.3.2.2 Moldes dos provetes

Para moldar os provetes de betão, após a betonagem, foram utilizados os seguintes moldes (Figura 3.8):

- Provetes cúbicos, de 150 mm de aresta, para ensaios de resistência à compressão;
- Provetes prismáticos, de 100x100x200 mm<sup>3</sup>, para ensaios de tração por compressão diametral;
- Provetes prismáticos, de 100x100x400 mm<sup>3</sup>, para ensaios de módulo de elasticidade e de resistência à flexão.



Figura 3.8 Moldes dos provetes betonados

### 3.3.2.3 Compactação

A compactação do betão foi realizada com o recurso a uma mesa vibratória (Figura 3.9).



Figura 3.9 Mesa vibratória usada para a compactação

### 3.3.3 Ensaios no estado fresco

Para avaliar a trabalhabilidade do betão recorreu-se ao ensaio de abaixamento. Nos casos dos betões com baixa dosagem de ligante, em que não foi possível medir a consistência, por desmoronamento do cone, devido à insuficiente coesão do betão fresco, recorreu-se ao grau de compactabilidade.

#### 3.3.3.1 Ensaio de abaixamento

A consistência do betão foi medida através do ensaio de abaixamento com recurso ao cone de Abrams. Este ensaio consiste em encher o cone de Abrams com betão, em 3 camadas, cada uma com uma altura aproximada de um terço da altura do molde. Cada camada deve ser compactada com 25 pancadas através do varão de compactação. No final da compactação da última camada, rasa-se a superfície do betão e remove-se o excesso. De seguida remove-se o molde e mede-se o abaixamento sofrido pelo provete moldado de betão fresco (Figura 3.10) (NP EN 12350-2, 2009).



Figura 3.10 Ensaio de abaixamento do cone de Abrams

### 3.3.3.2 Grau de compactabilidade

Este ensaio consiste em encher um recipiente com betão até a superfície, tendo o cuidado de não o compactar. Após este estar cheio rasa-se a superfície e compacta-se o betão por vibração (Figura 3.11). Por fim, para obter o grau de compatibilidade é medida a distancia entre a superfície de betão compactado e o bordo superior do recipiente, efetuando-se de seguida o cálculo (NP EN 12350-4 , 2009).



Figura 3.11 Ensaio de compactabilidade

### 3.3.4 Condições de cura

Após 24 horas da betonagem, os provetes dos betões são desmoldados, identificados e colocados nas respetivas condições de cura.

Os provetes de betão destinados à caracterização das resistências são colocados num tanque de água à temperatura de 20°C, equipado com resistência controlada por termóstato (Figura 3.12), enquanto os provetes concebidos para a caracterização do módulo de elasticidade são curados numa câmara termo-higrométrica, regulada para a temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 50% (Figura 3.13). O ambiente interior da câmara é controlado por uma sonda devidamente calibrada e certificada.



Figura 3.12 Tanque de água para cura dos provetes



Figura 3.13 Câmara termo-higrométrica

### 3.3.5 Ensaios dos provetes de betão no estado endurecido

Para a caracterização mecânica de cada tipo de betão, realizaram-se, no estado endurecido, os ensaios de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral, de resistência à flexão e módulo de elasticidade secante à compressão.

### 3.3.5.1 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão dos provetes de betão foi realizada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta (Figura 3.14). Para cada tipo de betão ensaiaram-se 3 provetes, nas diferentes idades (7, 28 e 56 dias). O ensaio realizou-se com as forças aplicadas gradualmente sob o provete, de uma forma contínua e sem choques, a uma velocidade de 13,5 KN/s até à rotura. A resistência média à compressão,  $f_{cm}$ , a cada idade, obtém-se através da média aritmética dos três valores da resistência à compressão,  $f_c$ , que por sua vez se obtém pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.13)$$

onde,  $F$  é a carga máxima à rotura medida no ensaio, e  $A_c$  é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada (NP EN 12390-3, 2009).



Figura 3.14 Ensaio de resistência à compressão do betão

### 3.3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração foi determinada aos 28 dias com o recurso ao ensaio de compressão diametral para provetes prismáticos com dimensões 100x100x200 mm<sup>3</sup> (Figura 3.15). O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniformemente distribuída ao longo de duas geratrizes opostas do provete, a uma velocidade constante, até se atingir a rotura. A resistência à tração por compressão,  $f_{ct}$  para cada provete é dada pela expressão (3.14):

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (3.14)$$

onde,  $F$  é a carga máxima do provete,  $L$  é o comprimento da linha de contacto do provete, e  $d$  é a dimensão vertical da secção transversal do provete (NP EN 12390-6, 2011). Para cada tipo de betão realizaram-se 3 ensaios, sendo o valor médio da resistência à tração por compressão,  $f_{ctm}$ , a média aritmética dos três valores.

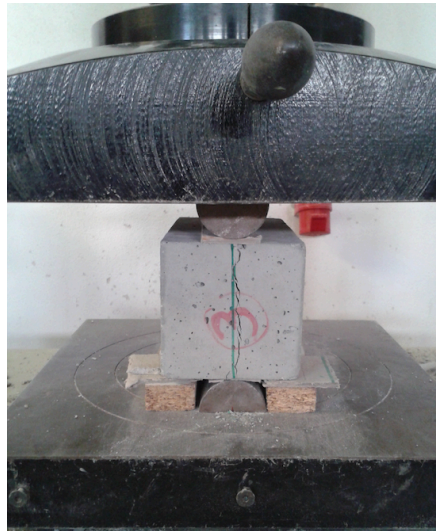


Figura 3.15 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

### 3.3.5.3 Resistência à flexão

O comportamento em flexão dos betões produzidos foi avaliado por intermédio do ensaio de flexão definido na norma NP EN 12390-5 (2009). Os provetes prismáticos, com dimensões de  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ , são submetidos a um momento fletor por meio da aplicação de uma carga através de roletes colocados superior e inferiormente (Figura 3.16).



Figura 3.16 Ensaio de resistência à flexão

Após o registo da carga máxima,  $F$ , aplicada calcula-se a resistência à flexão,  $f_{cf}$ , através da expressão (3.15):

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (3.15)$$

onde,  $l$  é a distancia entre os roletes inferiores de apoio, e  $d_1$  e  $d_2$  são as dimensões laterais do provete (NP EN 12390-5, 2009). O valor médio da resistência à flexão,  $f_{cfm}$ , é a média aritmética dos valores  $f_{cf}$  para cada conjunto de provetes ensaiado do mesmo tipo de betão.

### 3.3.5.4 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade estático consiste na aplicação de uma carga cíclica, entre um valor mínimo e um valor máximo, medindo as deformações que ocorrem em cada ciclo, até que a diferença entre as deformações de ciclos consecutivos não exceda a margem de erro mínima especificada  $1 \times 10^{-5}$  (Figura 3.17).

Inicia-se o ensaio com uma tensão mínima,  $\sigma_{min}$ , de 0,5 MPa e aumenta-se a tensão de uma forma contínua, a uma velocidade de aproximadamente 0,5 MPa por segundo, até que a tensão máxima,  $\sigma_{máx}$ , correspondente a 1/3 da tensão de rotura dos provetes com as mesmas dimensões, seja alcançada. Mantem-se aplicada a tensão constante durante 60 segundos e efetua-se a leitura das extensões no espaço de 30 segundos, de modo que as leituras estejam concluídas em 90 segundos. O ensaio realiza-se por ciclos, até que a diferença de variação da extensão, entre ciclos consecutivos, seja inferior ao erro especificado, verificando-se assim a condição de convergência. O módulo de elasticidade em compressão,  $E_c$ , corresponde ao último ciclo e determina-se pela expressão (3.16):

$$E_c = \frac{\Delta f}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{\varepsilon_{máx} - \varepsilon_{mín}} \quad (3.16)$$

onde,  $\varepsilon_{máx}$  e  $\varepsilon_{mín}$  correspondem às extensões máxima e mínima, respetivamente (E397, 1993; NP EN 12390-13, 2014).



Figura 3.17 Ensaio do módulo de elasticidade

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo começa por apresentar e caracterizar as amassaduras realizadas. Seguindo-se a caracterização das propriedades do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Posteriormente, faz-se uma avaliação da influência da granulometria nos resultados dos betões com reduzida dosagem de pasta ligante. Fez-se ainda uma comparação dos resultados experimentais com os resultados previstos no EC2.

### 4.1 Composições estudadas

Neste trabalho realizaram-se diversas misturas, onde se fizeram variações da dosagem da pasta ligante, da dosagem de cimento, e também da curva de referência utilizada na formulação e da relação água ligante. A Tabela 4.1. apresenta as misturas realizadas.

Tabela 4.1 Caracterização das misturas realizadas

Designação	LC75	LC75F	C75	LC125	LC125F	C125	LC175	LC175F	LC250A	LC250	C250
C (Kg/m <sup>3</sup> )	75	75	75	125	125	125	175	175	250	250	250
F (Kg/m <sup>3</sup> )	75	75	75	125	125	125	75	75	---	---	100
CV (Kg/m <sup>3</sup> )	100	100	200	---	---	100	---	---	---	---	---
Adj (Kg/m <sup>3</sup> )	2,3	2,3	0,7	2,5	2,5	0,8	2,6	2,6	0,8	3	1
A (Kg/m <sup>3</sup> )	117,9	117,9	169,4	117,6	117,6	169,3	117,5	117,5	179,3	117,2	169,1
AF0/3 (Kg/m <sup>3</sup> )	43,5	586,7	285,9	44,0	670,8	371,1	44,1	747,1	40,9	44,3	492,0
AM0/4 (Kg/m <sup>3</sup> )	1067,6	308,3	585,0	1080,1	244,4	519,8	1083,6	210,4	1005,0	1088,8	427,4
Areão (Kg/m <sup>3</sup> )	283,9	77,8	106,0	287,2	81,9	110,3	288,1	97,9	267,2	289,5	116,4
Brita1 (Kg/m <sup>3</sup> )	623,3	1050,2	797,5	630,6	1049,4	796,6	632,6	997,0	586,7	635,6	795,4
Total agr.	2018	2023	1774	2042	2047	1798	2048	2052	1900	2058	1831
A/C	1,57	1,57	2,26	0,94	0,94	1,35	0,67	0,67	0,72	0,47	0,68
A/(C+C.V.)	1,03	1,03	1,09	0,94	0,94	1,03	0,67	0,67	0,72	0,47	0,68
A/L	0,47	0,47	0,48	0,47	0,47	0,48	0,47	0,47	0,72	0,47	0,48

As misturas foram referenciadas quanto à quantidade de cimento presente na pasta (75, 125, 175, 250 Kg/m<sup>3</sup>), e quanto à quantidade de pasta ligante, tendo os betões iniciados pela sigla LC, 250 Kg/m<sup>3</sup> de pasta ligante, e os betões iniciados pela sigla C, 350 Kg/m<sup>3</sup> de pasta ligante.

Dentro da categoria dos betões com baixa dosagem de ligante (LC), há uma vertente para os betões que são formulados pela curva de referência de Alfred (LC75, LC125 e LC175), todos

os restantes betões são formulados pela curva de referência de Faury. Por fim, considerou-se ainda uma outra vertente da mistura LC, mas com uma relação A/L muito superior à das restantes misturas que é a mistura LC250A, cujo objetivo foi obter uma mistura com uma resistência mais baixa que a prevista para a mistura LC250, avaliando a influência dessa variação da relação A/L nas características mecânicas.

À exceção do betão LC250A, pode considerar-se que os betões têm todos a mesma relação A/L, variando a compactidade dos betões C, de 0,81, para os betões LC, de 0,86.

Os betões formulados pela curva granulométrica de referência de Faury foram concebidos com o intuito de avaliar a influência da curva granulométrica nas características mecânicas do betão, em comparação aos resultados obtidos pela formulação de Alfred.

O betão C250, composto por uma pasta ligante com  $350 \text{ Kg/m}^3$ , dos quais 250 Kg são referentes à dosagem de cimento 52,5R e 100 Kg de fíler, pode-se considerar um betão corrente, e próximo de um betão com cerca de 350 kg de cimento do tipo II-B/L, sendo estabelecido aqui como um betão de referência, e de consistência corrente.

Em todas as misturas realizadas verificou-se que tanto a massa volúmica como a compactidade foram muito próximas das previstas, não se verificando desvios relevantes. Desta forma, não houve necessidade de fazer alterações ou correções nas misturas.

É importante referir que os betões com reduzidas dosagens de cimento são betões que começaram a ser estudados recentemente e como tal não seguem os requisitos relativos às dosagens de ligante e de adições da norma NP EN 206 (2000).

## **4.2 Caracterização do betão no estado fresco**

Um dos principais parâmetros a avaliar no betão no estado fresco é a trabalhabilidade. Deste modo, após concluída as amassaduras das misturas, recorreu-se ao ensaio de abaixamento, para avaliar a sua consistência. Quando este ensaio se mostrou inválido por falta de coesão, avaliou-se a trabalhabilidade através do grau de compactabilidade.

### **4.2.1 Ensaio de abaixamento**

A consistência do betão, determinada experimentalmente através do ensaio de abaixamento apresenta-se na Tabela 4.2 e na Figura 4.1. Para determinar a classe de abaixamento recorreu-se à Tabela 3.5.

Tabela 4.2 Classe de abaixamento obtida através do ensaio

Designação	LC75	LC75F	C75	LC125	LC125F	C125	LC250A	C250
Abaixamento (mm)	---	50	90	---	45	120	---	80
Classe de abaixamento	---	S2	S2	---	S1/S2	S3	---	S2

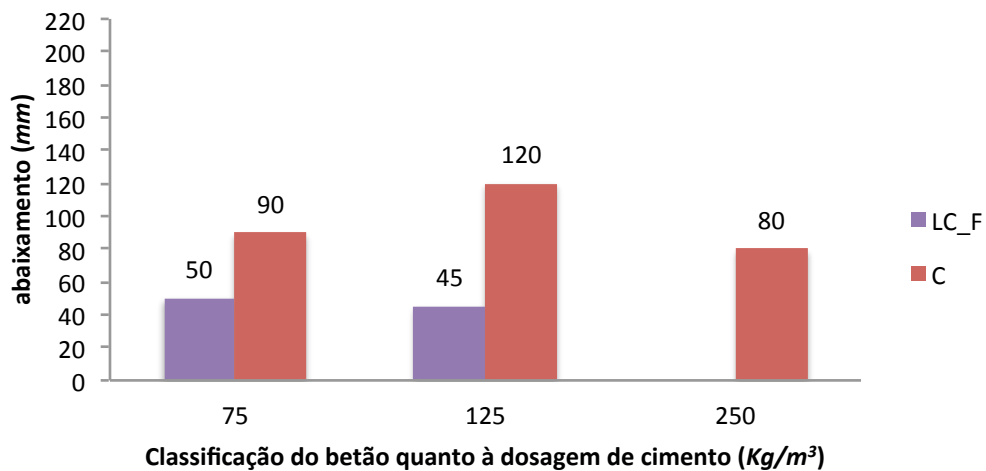


Figura 4.1 Abaixamento obtido no ensaio de abaixamento

Através da análise da Figura 4.1 podem-se retirar as seguintes conclusões:

- As amassaduras C75 e C125 apresentam maior fluidez que as respetivas misturas da classe LC\_F. Isto pode ser justificado pela quantidade superior de cinzas volantes que têm um efeito benéfico provocado pela sua forma aproximadamente esférica e superfície pouco rugosa, o que melhora quer a trabalhabilidade quer a coesão.
- Quanto às misturas LC75F e LC125F, verifica-se que ambas apresentam um valor semelhante de consistência e, apesar de terem baixa coesão, estas misturas obtidas pela curva de Faury apresentam melhor trabalhabilidade em comparação às correspondentes da curva de Alfred, LC75 e LC125, nas quais não foi possível efetuar o ensaio de forma válida por reduzida coesão da matriz.
- Relativamente aos betões C75 e C125, verifica-se que o C125 tem um maior abaixamento e conseqüentemente uma maior fluidez. Tendo os dois a mesma quantidade de água, pode concluir-se que quantidades superiores de fíler calcário,

relativamente às cinzas volantes, podem contribuir para uma consistência mais fluida.

- Em relação aos betões LC75, LC125 e LC250A, não se conseguiu medir a consistência através deste ensaio, por apresentarem uma coesão muito reduzida, por isso recorreu-se ao grau de compactabilidade.

#### 4.2.2 Grau de compactabilidade

Como as misturas LC apresentam pouca coesão, recorreu-se ao grau de compactabilidade (Tabela 4.3 e Figura 4.2) para avaliar a trabalhabilidade.

Tabela 4.3 Resultados do grau de compactabilidade

Designação	$s$ (mm)	$h$ (mm)	$c=h/(h-s)$	Classe de compactabilidade
LC75	70	400	1,21	C2
LC125	70	400	1,21	C2
LC250A	60	400	1,18	C2

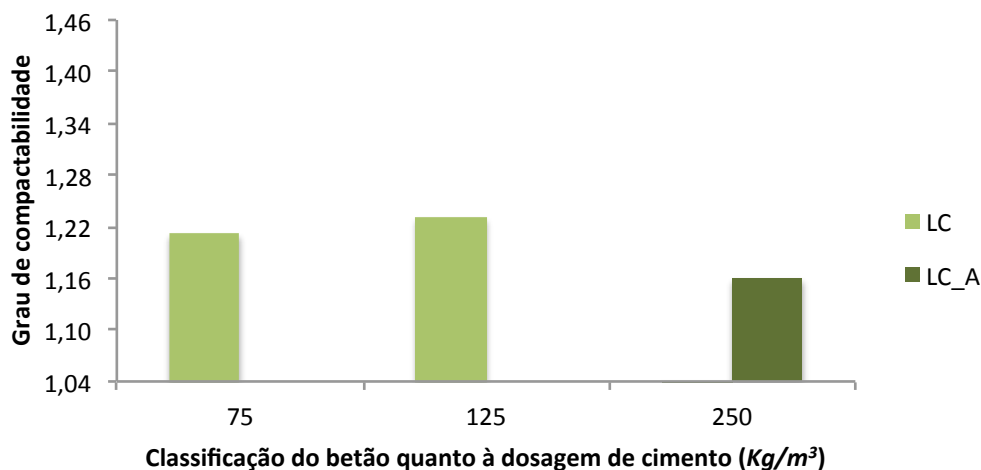


Figura 4.2 Grau de compactabilidade obtido no ensaio de compactabilidade

Da análise dos valores obtidos, verifica-se:

- A mistura LC75 apresenta uma fluidez ligeiramente superior relativamente à mistura LC125. Tal como acontece com as misturas LC75F e LC125F, a maior trabalhabilidade justifica-se pela quantidade superior de adições que a mistura LC75 apresenta, com menor necessidade de água de molhagem das partículas em relação ao cimento.

- O betão LC250A, apresenta-se menos seco que os restantes devido à relação A/L bastante superior.

### 4.3 Caracterização do betão no estado endurecido

Através do processo de endurecimento, o betão no estado endurecido deixa de se comportar como um material com determinada consistência e passa a ser um material sólido, com rigidez e resistências mecânicas elevadas.

Neste subcapítulo encontram-se expostos e analisados os resultados das propriedades dos betões da categoria LC, LC\_A e C, no estado endurecido. Por motivos de simplificação de análise de resultados, optou-se por não expor aqui, os resultados dos betões da tipologia LC\_F, sendo efectuada uma comparação direta com os dos betões LC no subcapítulo seguinte.

#### 4.3.1 Resistência à compressão

O comportamento em compressão das misturas foi avaliado através de ensaios, realizados de acordo com os procedimentos já descrito. Para cada amassadura, avaliou-se a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, pretendendo concretizar o estudo do desenvolvimento das resistências à compressão ao longo da idade.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, para os betões da tipologia LC, LC\_A e C apresentam-se na Tabela 4.4 e nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 Resistência à compressão dos provetes cúbicos de betão

Designação	LC75	C75	LC125	C125	LC175	LC250A	LC250	C250
$f_{cm,7} (Mpa)$	11,60	7,59	25,20	14,31	35,02	25,75	50,30	34,89
$f_{cm,28} (Mpa)$	20,59	15,21	28,88	20,27	44,72	30,52	59,50	39,09
$f_{cm,56} (Mpa)$	26,50	20,54	33,90	26,51	50,20	34,30	64,20	41,54

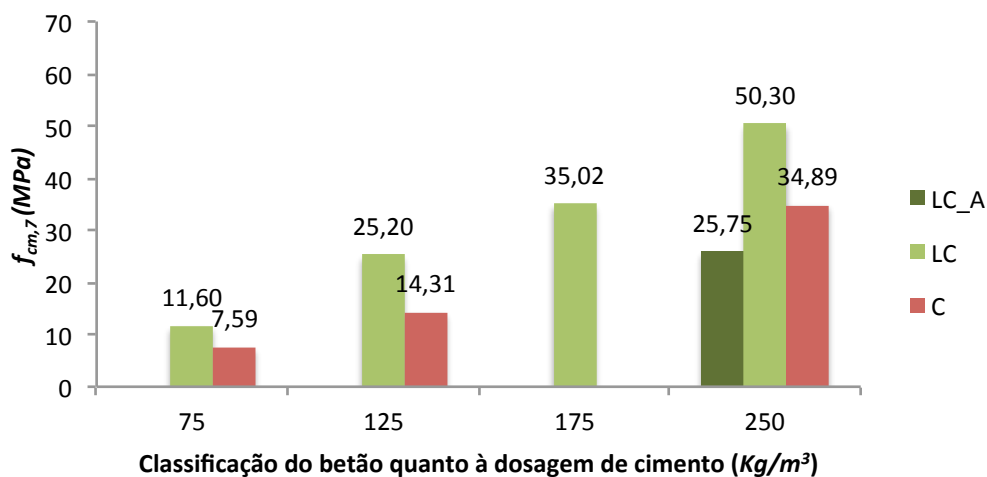


Figura 4.3 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 7 dias

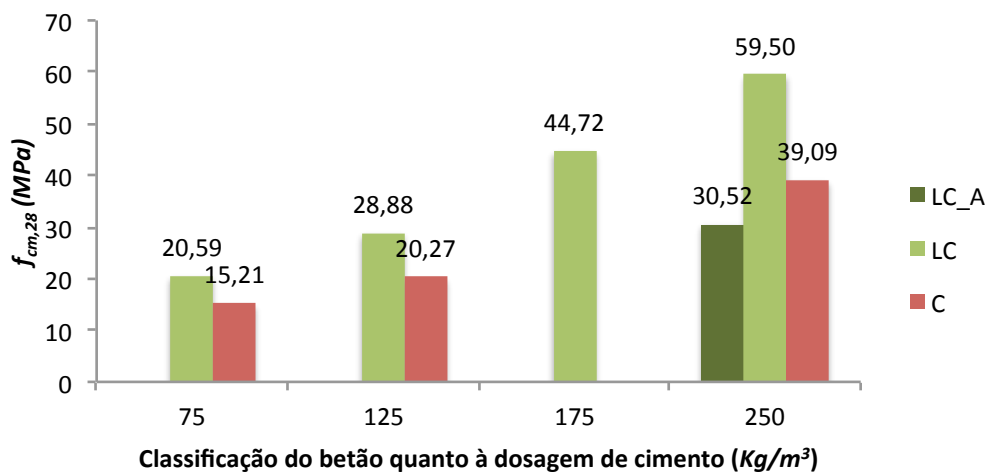


Figura 4.4 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 28 dias

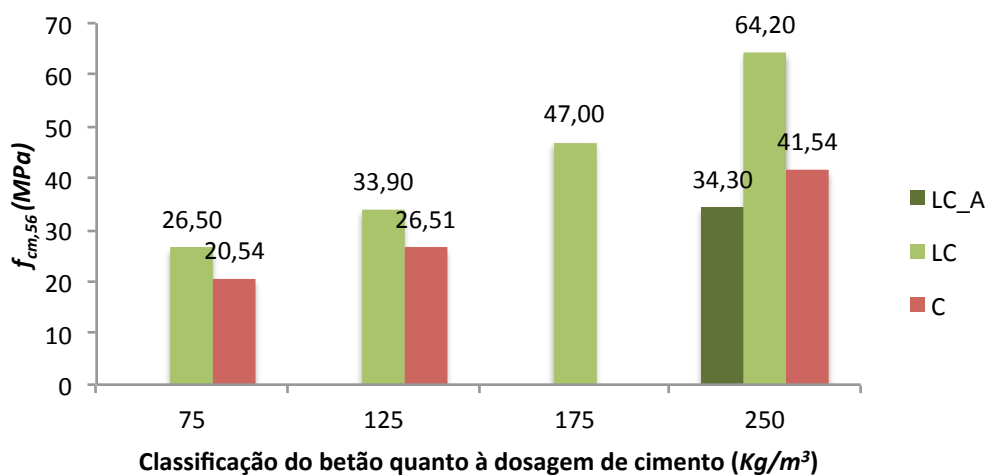


Figura 4.5 Resistência à compressão média dos provetes cúbicos aos 56 dias

Através da análise das Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 e da Tabela 4.4 é possível apontar as seguintes observações:

- Para os betões de cada série, em que se mantém a quantidade de ligante, comprova-se que a resistência aumenta com o aumento da quantidade de cimento, o que é expectável, uma vez que reduz a relação A/C.
- Entre os betões que apresentam a mesma dosagem de cimento, verifica-se que os betões da categoria LC manifestam resistências superiores aos betões da categoria C, devido à compacidade mais elevada e conseqüentemente às menores relações A/C. Além do mais, os betões com reduzida dosagem de pasta ligante (LC), apresentam maior quantidade de agregados, que por sua vez têm resistências bastante superiores às da pasta ligante. Deste modo, pela proximidade dos agregados a distribuição de tensões será previsivelmente diferente da dos betões correntes, o que poderá ter também influência na resistência mecânica, mas principalmente no módulo de elasticidade.
- Na resistência à compressão dos betões LC, por comparação à do betão de referencia C250, manifesta-se a eficiência dos betões com menor quantidade de pasta ligante, ao conseguirem obter uma resistência semelhante, ou mesmo superior (no caso do LC175).
- O betão LC250A, uma vez que foi formulado com diferentes parâmetros da pasta, obteve resistências similares às do LC125, apesar da sua dosagem de cimento ser o dobro. Este resultado confirma o efeito negativo que o excesso de água tem na resistência à compressão do primeiro.

#### *4.3.1.1 Evolução da resistência à compressão com a idade*

O desenvolvimento das curvas de endurecimento, da resistência à compressão ao longo do tempo, resultantes da aplicação da expressão (2.2) e (2.3) do coeficiente de endurecimento do EC2, bem como os valores médios obtidos experimentalmente da resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, podem ser observados nas Figuras 4.6, 4.7, para os betões do tipo C e do tipo LC respetivamente e, nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 para os betões em função da dosagem de cimento (75, 125 e 250, respetivamente). Consoante a evolução experimental observada, ajustou-se a curva de endurecimento S (lento) ou R (rápido)

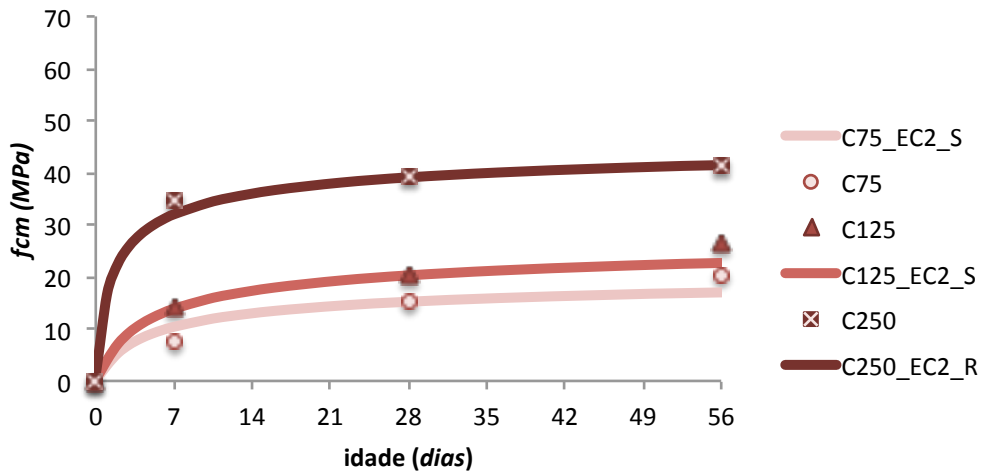


Figura 4.6 Evolução da resistência à compressão dos betões da tipologia C

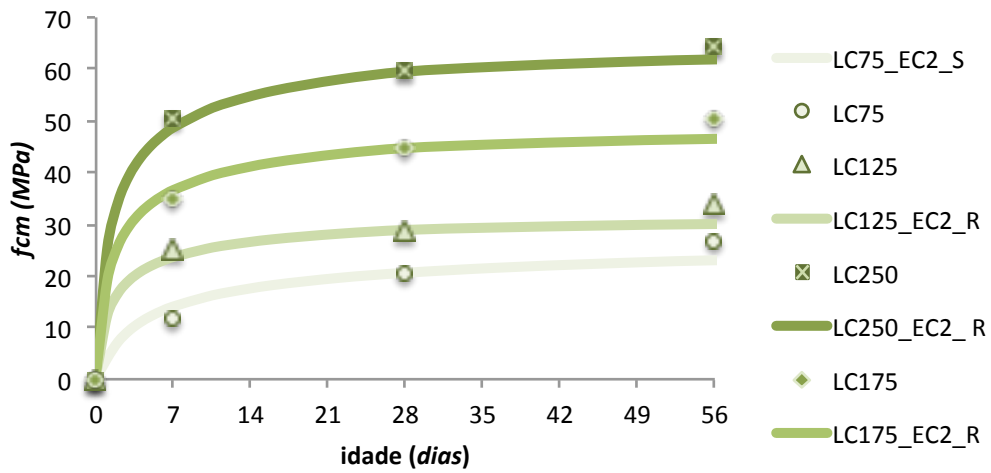


Figura 4.7 Evolução da resistência à compressão dos betões da tipologia LC

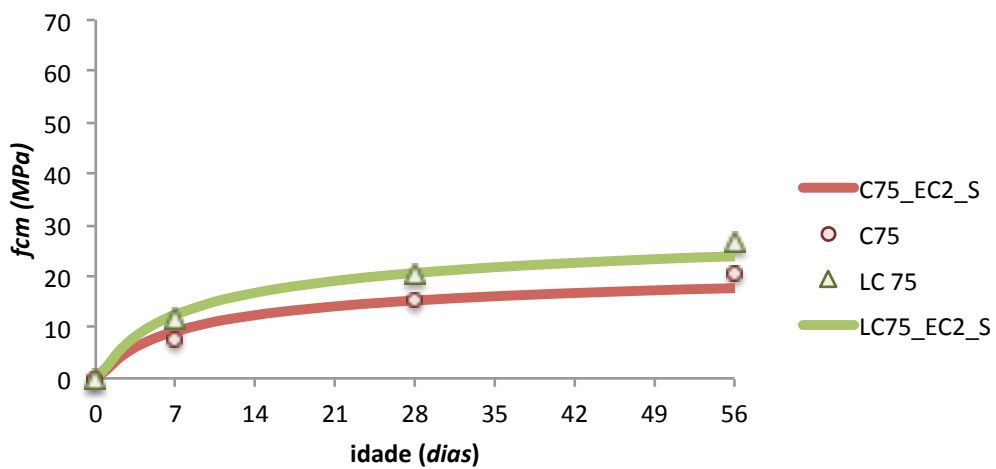


Figura 4.8 Evolução da resistência dos betões com 75Kg/m³ de cimento

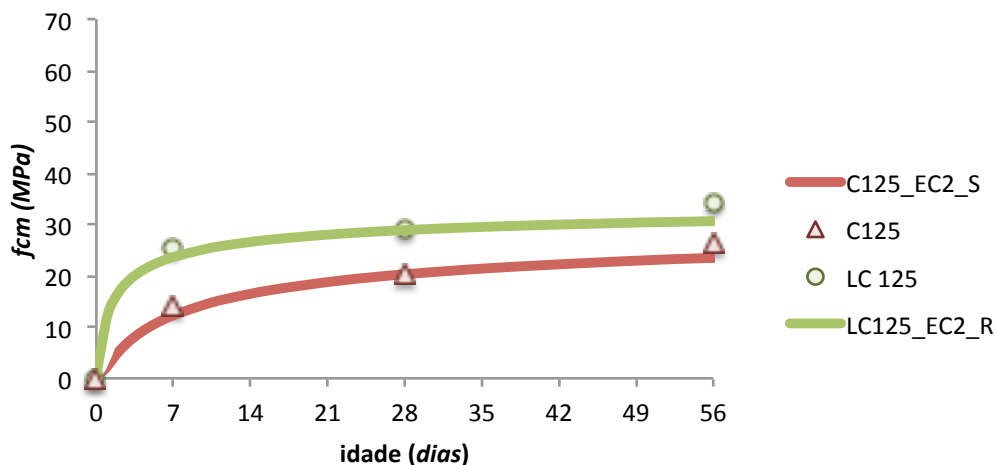


Figura 4.9 Evolução da resistência à compressão dos betões com  $175\text{Kg}/\text{m}^3$  de cimento

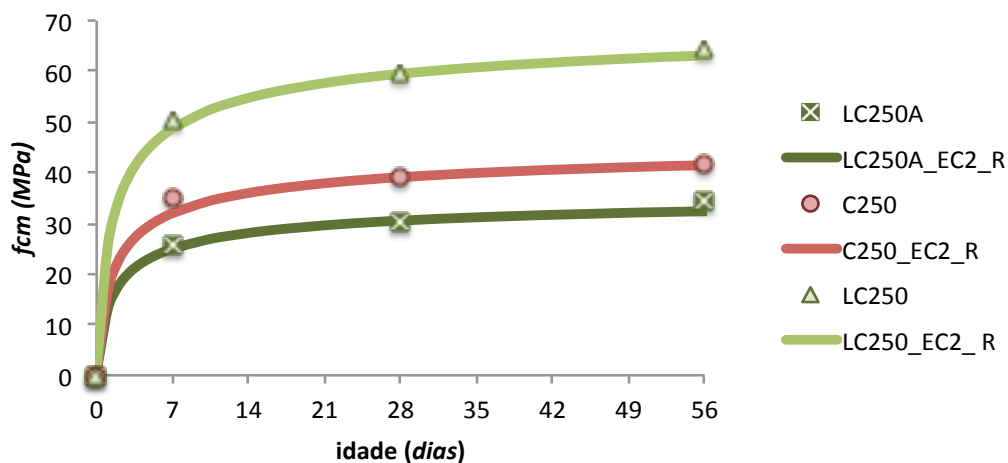


Figura 4.10 Evolução da resistência à compressão de betões com  $250\text{Kg}/\text{m}^3$  de cimento

Através da análise gráfica das Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 pode-se concluir que:

- A resistência do betão aumenta com a idade e tende a estabilizar aos 28 dias, principalmente nos betões sem CV na pasta ligante;
- Os betões com reduzida dosagem de pasta ligante apresentam resistências superiores aos betões da classe C, de forma regular em todas as idades, e esse aumento é mais notório à medida que se aumenta a quantidade de cimento na pasta;
- À exceção dos betões com CV, onde se ajustou a curva do tipo S, os resultados obtidos seguem a tendência da curva de endurecimento R, apesar de os resultados obtidos nas idades mais avançadas serem, de um modo geral, ligeiramente superiores aos esperados.

- A curva que melhor se ajusta aos betões LC75, C75 e C125 não é a R, porque apesar do cimento ser 52,5 R, estas misturas têm uma dosagem baixa de cimento e contêm uma quantidade significativa de CV, que apresentam reações pozolânicas lentas; estes betões apresentam assim resistências menores em idades mais jovens e maiores em idades mais avançadas;
- O ganho de resistência à compressão nas primeiras idades parece tanto mais lento quanto maior for a diferença entre as dosagens das CV e do C, que é consequência da maior morosidade da reação pozolânica das CV;
- Tal como as restantes normas europeias, o EC2 não prevê betões com reduzidas dosagens de cimento e elevadas quantidades de CV; como tal, os vários valores atribuídos ao coeficiente  $s$ , que depende do tipo de cimento, e que é utilizado na expressão do endurecimento (2.3), não se ajustam aos resultados obtidos dos betões com elevado teor de CV. Através da Figura 4.11 e 4.12 verifica-se que ao utilizar-se um valor de  $s$  compreendido entre 0,5 e 0,6 obtêm-se curvas de endurecimento mais próximas dos valores obtidos experimentalmente.

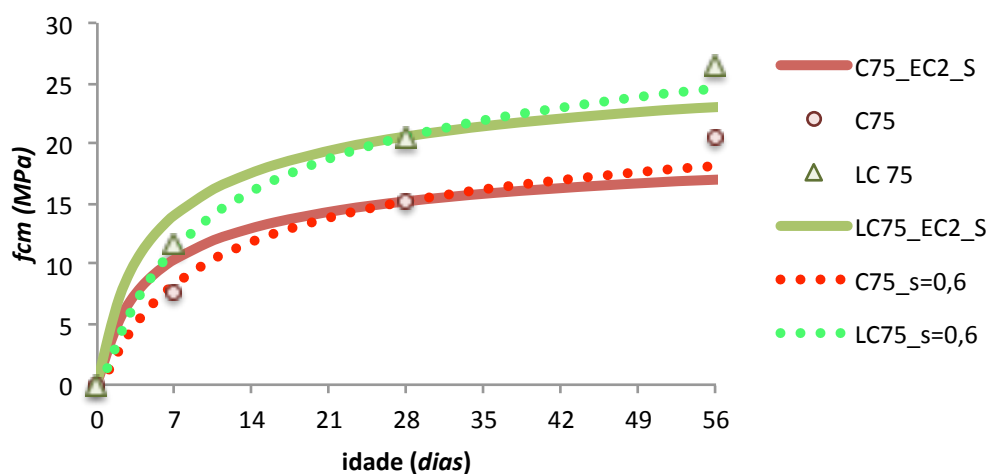


Figura 4.11 Comparação da evolução da resistência à compressão de betões C75, LC75 prevista no EC2 (considerando o  $s=0,38$ ) com a evolução da resistência quando  $s=0,6$

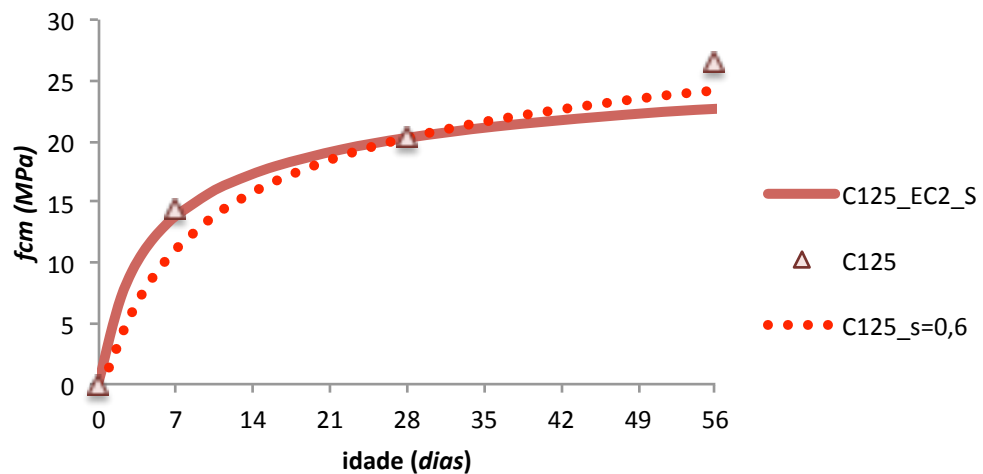


Figura 4.12 Comparação da evolução da resistência à compressão de betões C125 prevista no EC2 (considerando o  $s=0,38$ ) com a evolução da resistência quando  $s=0,6$

#### 4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Conforme descrito em 3.3.5.2, a resistência à tração dos betões produzidos foi avaliada com recurso ao ensaio de compressão diametral efetuado em provetes prismáticos de  $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$  aos 28 dias.

Os resultados médios da resistência à tração por compressão diametral,  $f_{ctm}$ , obtidos são apresentados na Tabela 4.5. e na Figura 4.13.

Tabela 4.5 Resistência à tração por compressão diametral média em provetes prismáticos

Designação	LC75	C75	LC125	C125	LC175	LC250A	C250
$f_{ctm}$ (Mpa)	1,43	0,73	2,15	1,45	3,20	2,08	2,73

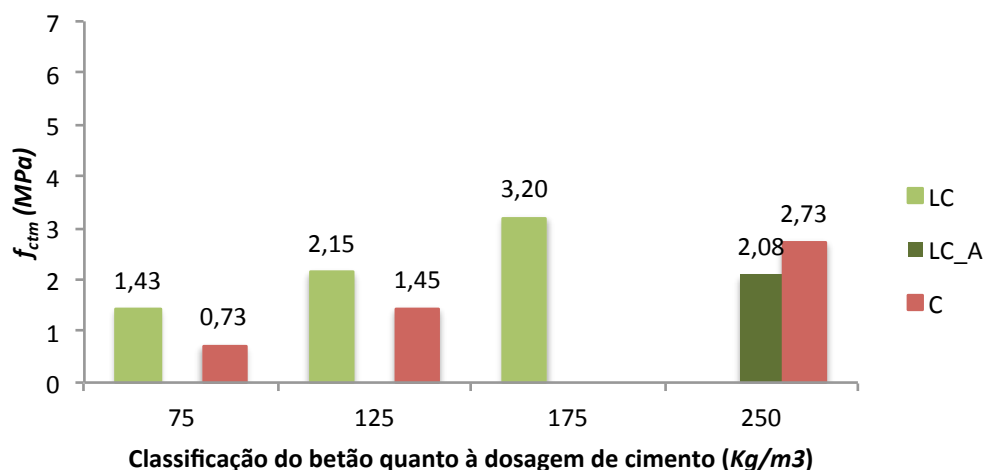


Figura 4.13 Resistência à tração por compressão diametral média em provetes prismáticos

Através da análise dos resultados obtidos experimentalmente conclui-se que:

- À semelhança do que acontece na resistência à compressão, a resistência à tração aumenta com o aumento da dosagem de cimento na pasta ligante;
- Os betões com baixa dosagem de ligante, do tipo LC, atingiram resistências maiores que os betões com a mesma quantidade de cimento mas maior quantidade de ligante, do tipo C, o que comprova, mais uma vez, a vantagem da diminuição do ligante e conseqüente aumento quer da compactidade quer da quantidade de agregados; o betão LC175 demonstrou, por isso, melhor eficiência por comportamento mecânico, comparativamente ao betão de referência C250;
- A resistência à tração é claramente afetada pelo aumento da relação A/L na composição dos betões, como se pode verificar pela comparação da resistência do betão LC250A relativamente ao betão LC125, pois apresentam valores de resistência semelhantes, embora a dosagem de cimento do dobro.

#### 4.3.3 Resistência à flexão

O comportamento em flexão dos betões foi avaliado recorrendo ao ensaio de resistência à flexão enunciado em 3.3.5.4. Os ensaios foram realizados aos 90 dias. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 4.6 e na Figura 4.14.

Tabela 4.6 Resistência à flexão média dos provetes prismáticos aos 90 dias

Designação	LC75	C75	LC125	C125	LC175	LC250A	C250
$f_{ctm}$ (Mpa)	2,15	1,42	2,99	2,42	4,61	3,37	3,62

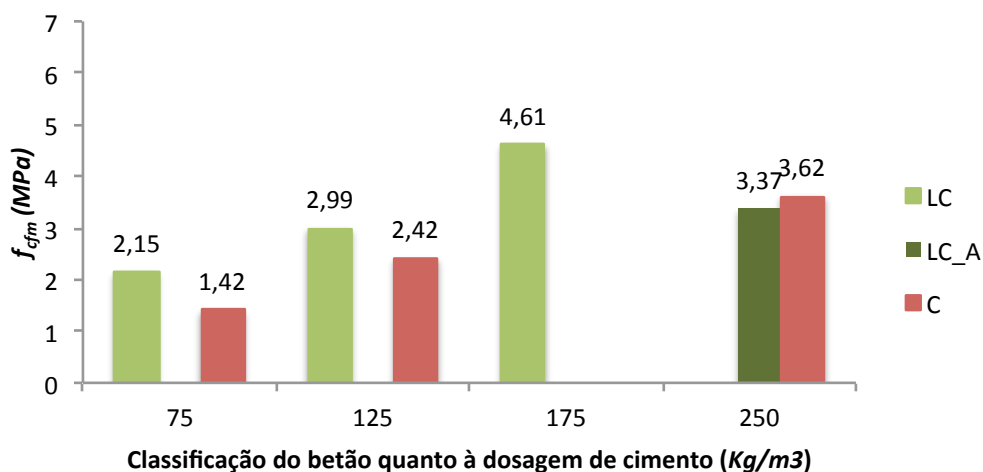


Figura 4.14 Resistência à flexão média dos provetes prismáticos aos 90 dias

Após a análise de resultados pode-se concluir que:

- A resistência à flexão segue a tendência da resistência à tração e à compressão, ao apresentar um aumento da resistência com o aumento da dosagem de cimento e ao apresentar resistências superiores aos betões com baixa dosagem de ligante relativamente aos betões com dosagens de ligante correntes;
- Os resultados são superiores comparativamente aos da tração por compressão diametral;
- Através da comparação dos resultados do betão C250 com o LC250A pode-se afirmar que a relação A/L tem menor influência no resultado da resistência à flexão comparativamente aos resultados obtidos na resistência à compressão e à tração por compressão diametral.

#### 4.3.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi obtido aos 28 dias através de provetes prismáticos conforme explicado em 3.3.5.4.

A Tabela 4.7 e a Figura 4.15 apresentam os resultados do módulo de elasticidade obtido nos provetes ensaiados.

Tabela 4.7 Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias

Designação	LC75	LC125	LC175	LC250A	C250
$E_{cm}$ (GPa)	37,4	40,6	42,4	38,1	36,5

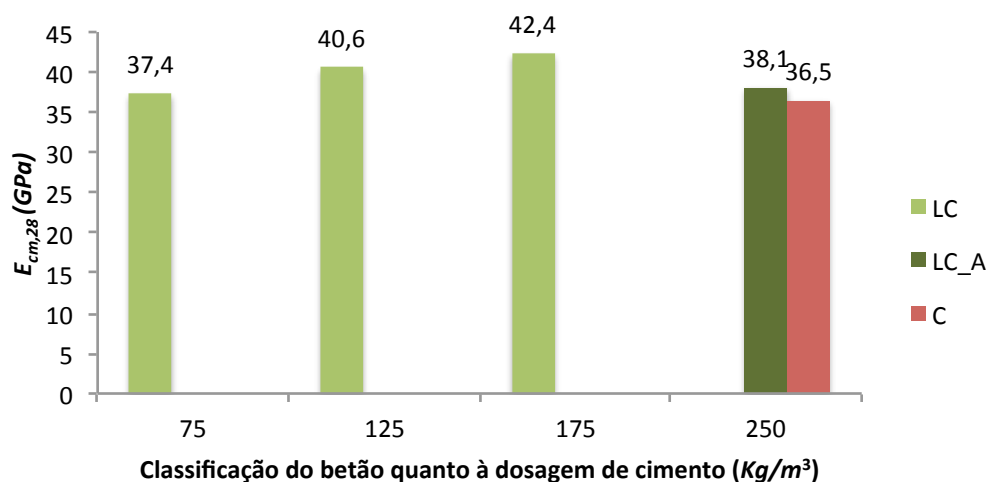


Figura 4.15 Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias

Através da análise da Figura 4.15 podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Para os betões da mesma tipologia, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da dosagem de cimento, e conseqüente aumento das resistências mecânicas;
- Pelo resultado do betão LC250A confirma-se a influência negativa do aumento da relação A/L nas características mecânicas, neste caso no módulo de elasticidade; contudo, esse efeito é mais notório nas resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à flexão;
- Tendo como referência a série de betões da categoria C, neste caso o betão C250 tem um valor de módulo de elasticidade inferior ao LC250A e ao LC175, podendo afirmar-se que os betões com maior quantidade de pasta ligante podem ter menor módulo de elasticidade, comparativamente aos betões com a mesma dosagem de cimento, mas com menor quantidade de pasta. Este comportamento acontece essencialmente devido à elevada compacidade e à quantidade superior de agregados grossos dos betões com baixa quantidade de ligante, resultando num material mais rígido.

#### 4.4 Influência da curva granulométrica

Para perceber a influência da curva granulométrica nas propriedades do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido, fez-se uma análise comparativa dos betões da categorias LC e LC\_F.

Como se pode perceber pela Tabela 4.8, as dosagens dos constituintes da pasta ligante para betões com a mesma dosagem de cimento mantêm-se, o que varia entre a curva de Alfred e a curva de Faury é a proporção dos diferentes agregados.

Tabela 4.8 Distribuição percentual dos diferentes agregados

Designação	C (Kg/m <sup>3</sup> )	F (Kg/m <sup>3</sup> )	C.V. (Kg/m <sup>3</sup> )	A (Kg/m <sup>3</sup> )	Adj (Kg/m <sup>3</sup> )	AF 0/3 (Kg/m <sup>3</sup> )	AM 0/4 (Kg/m <sup>3</sup> )	Areão (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita1 (Kg/m <sup>3</sup> )
LC75	75	75	100	117,8	2,3	<b>43,3</b>	<b>1067,8</b>	<b>283,9</b>	<b>623,3</b>
						2%	53%	14%	31%
LC75F	75	75	100	117,9	2,3	<b>586,7</b>	<b>308,3</b>	<b>77,8</b>	<b>1050,2</b>
						29%	15%	4%	52%
LC125	125	125	---	117,8	2,5	<b>43,9</b>	<b>1080</b>	<b>287,2</b>	<b>630,6</b>
						2%	53%	14%	31%
LC125F	125	125	---	117,6	2,5	<b>670,8</b>	<b>244,4</b>	<b>81,9</b>	<b>1049,4</b>
						33%	12%	4%	51%
LC175	175	75	---	117,5	2,6	<b>44,1</b>	<b>1083,6</b>	<b>288,1</b>	<b>632,6</b>
						2%	53%	14%	31%
LC175F	175	75	---	117,5	2,6	<b>741,1</b>	<b>210,4</b>	<b>97,9</b>	<b>997</b>
						36%	10%	5%	49%

O volume de agregados dos betões formulados pela curva de referência de Alfred encontra-se distribuído em cerca de 2% de areia fina (AF0/3), 53% de areia média (AM 0/4), 14% de areão e 31% de brita 1. Já os betões dimensionados pela curva de Faury são maioritariamente constituídos por brita 1 (cerca de 50%), seguidos de areia fina (AF0/3) (aproximadamente 30%), areia média (14%) e por fim, por pequena quantidade de areão (4%).

Conclui-se que a curva de Alfred resulta predominantemente na constituição de areia média de granulometria extensa, seguida do agregado mais grosso, enquanto que a curva de Faury tem na sua constituição principalmente agregado mais grosso seguido de areia fina.

#### 4.4.1 Trabalhabilidade

Como já referido anteriormente, os betões formulados pela curva de Alfred apresentam uma coesão inferior aos formulados pela curva de Faury. Isto deve-se ao facto de os betões dimensionados pela curva de Alfred serem constituídos maioritariamente por agregados rolados de areia média, enquanto os da curva de Faury são predominantemente grossos e britados, cuja forma angular favorece o imbricamento entre os grãos, reduzindo a coesão e a trabalhabilidade.

#### 4.4.2 Resistência à compressão

A Tabela 4.9 e as Figuras 4.16 a 4.18 apresentam os resultados da resistência à compressão médios, obtidos através do ensaio de compressão realizado de acordo com o expresso em 3.3.5.1, para os betões das tipologias LC e LC\_F.

Tabela 4.9 Resistência à compressão média em provetes cúbicos de betão da categoria LC e LC\_F

Designação	LC75	LC75F	LC125	LC125F	LC175	LC175F
$f_{cm,7} (Mpa)$	11,60	15,69	25,20	26,44	35,02	36,77
$f_{cm,28} (Mpa)$	20,59	22,12	28,88	29,39	44,72	45,87

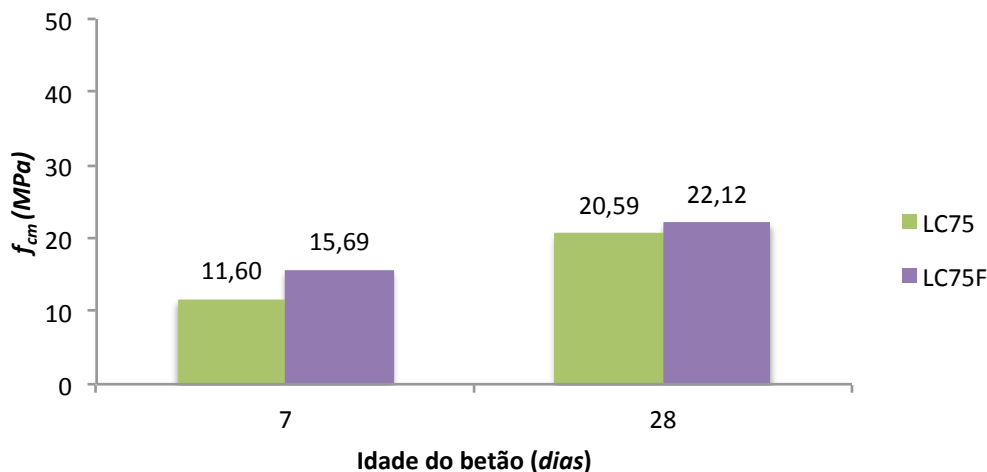


Figura 4.16 Resistência à compressão dos betões LC75 e LC75F aos 7 e aos 28 dias

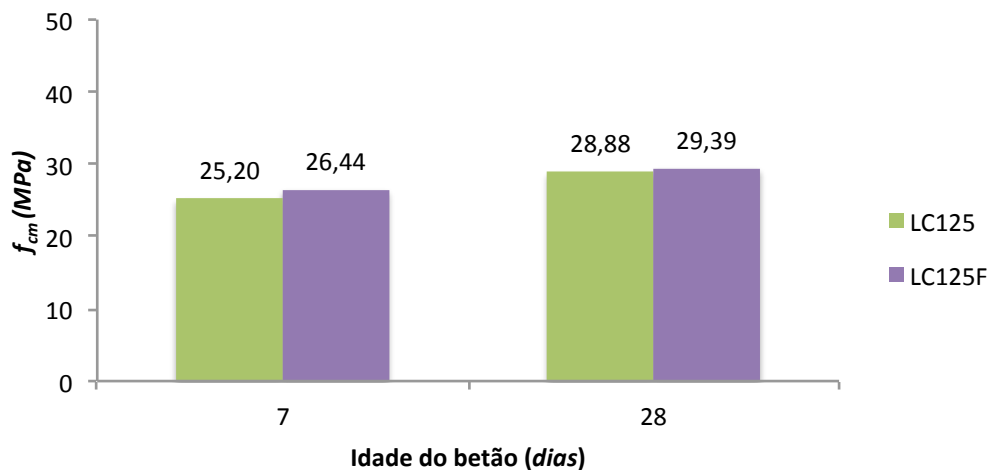


Figura 4.17 Resistência à compressão dos betões LC125 e LC125F aos 7 e aos 28 dias

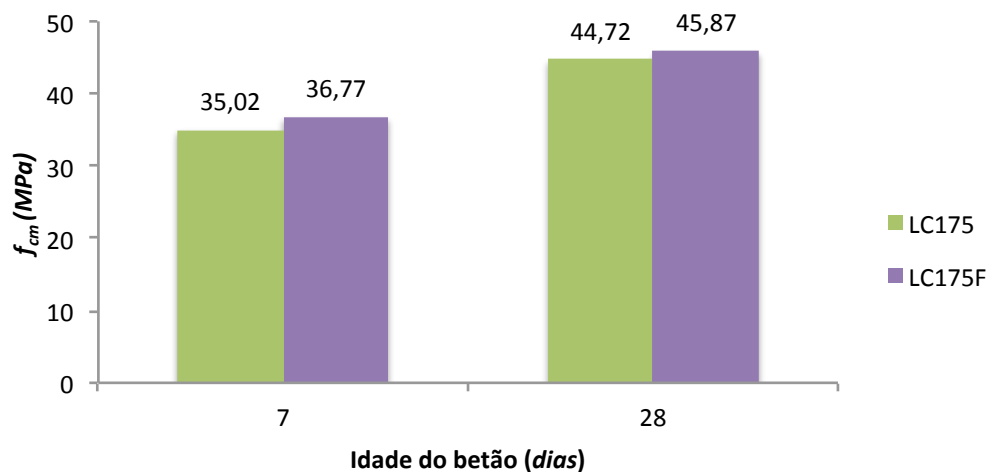


Figura 4.18 Resistência à compressão dos betões LC175 e LC175F aos 7 e aos 28 dias

Analisando as Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 é possível constatar que:

- As misturas formuladas pelo método de Faury apresentam resistências superiores, o que se deve provavelmente à predominância de brita 1 que é o agregado bastante resistente.
- As diferenças de resistência entre os betões LC e LC\_F, com as mesmas dosagens de cimento, são mais significativas em idades mais jovens e atenuam em idades mais avançadas.
- Em geral, a influência da granulometria tende a diminuir com o aumento da dosagem de cimento, uma vez que a pasta adquire maior influência na resistência final do betão.

### 4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Para avaliar a influência da granulometria na resistência à compressão usou-se como amostra o betão LC125F, uma vez que é esperado que a resistência à tração siga a mesma tendência da resistência à compressão.

Os valores da resistência à tração por compressão aos 28 dias encontram-se expostos na Tabela 4.10 e na Figura 4.19.

Tabela 4.10 Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias nos provetes prismáticos LC125 e LC125F

Designação	LC125	LC125F
$f_{ctm}$ (Mpa)	2,15	2,39

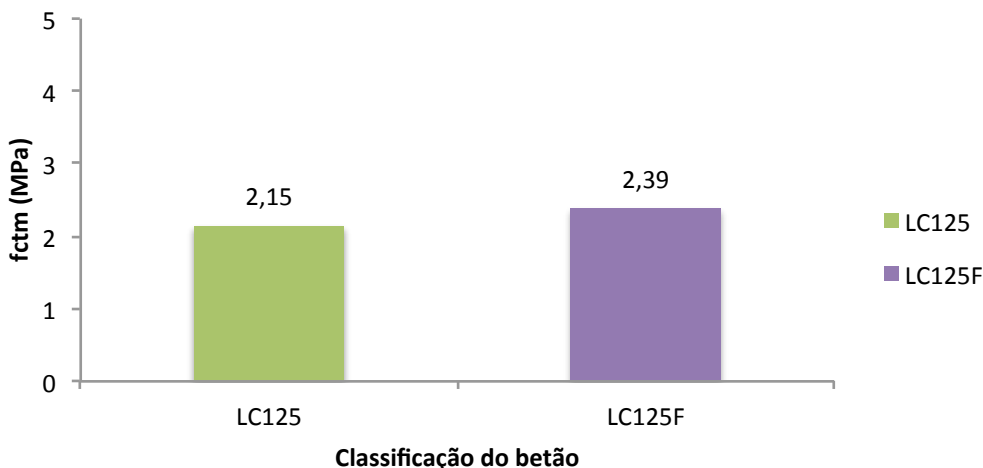


Figura 4.19 Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias nos provetes prismáticos LC125 e LC125F

Verifica-se que a mistura formulada pela curva de referência de Faury atingiu maior resistência, à semelhança do verificado na resistência à compressão. Isto deve-se à percentagem superior de materiais grossos britados que apresentam uma superfície rugosa, resultando numa melhor aderência entre os agregados e a pasta ligante.

### 4.4.4 Módulo de elasticidade

A Tabela 4.11 expõe os resultados do módulo de elasticidade, obtidos conforme o exposto em 3.3.5.4, para os betões da tipologia LC e LC\_F.

Tabela 4.11 Módulo de elasticidade médio aos 28 dias dos provetes prismáticos de betão

Designação	LC75	LC75F	LC125	LC125F	LC175	LC175F	LC250A	C250
$E_{cm}$ (GPa)	37,4	28,7	40,6	34,5	42,4	38,2	38,1	36,5

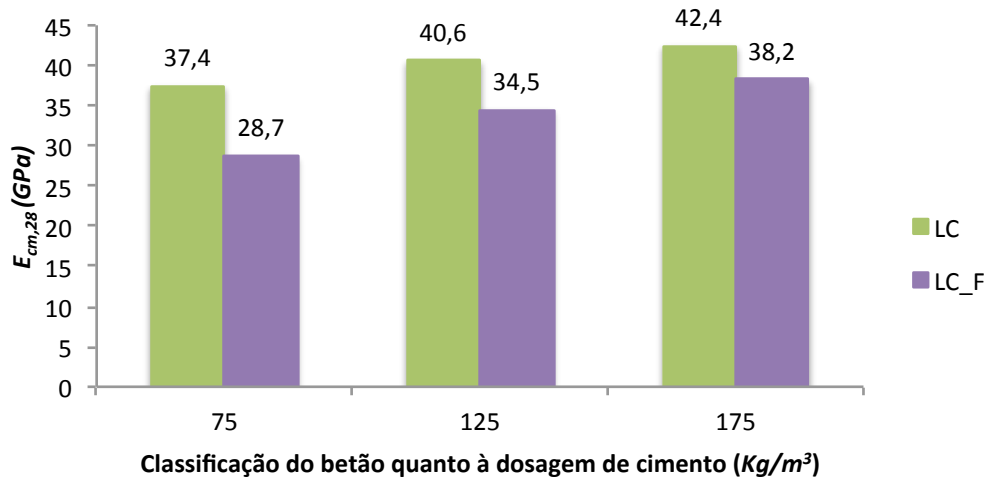


Figura 4.20 Módulo de elasticidade médio aos 28 dias dos provetes prismáticos de betão

Pela análise da Tabela 4.11 e da Figura 4.20 podem tirar-se as seguintes conclusões:

- Conforme previsto, para a mesma quantidade de pasta ligante, o módulo de elasticidade aumenta, em ambas as séries, com o aumento da dosagem de cimento, uma vez que a resistência mecânica também aumenta; porém, esse aumento é mais significativo nos betões formulados pela curva de Faury;
- No entanto, ao contrário do que acontece com as resistências, os betões formulados pela curva de Faury têm um módulo de elasticidade muito inferior aos respetivos betões formulados pela curva de Alfred; a diferença é maior nos betões com menor dosagem de cimento e vai reduzindo com o aumento dessa dosagem. Isto pode ser justificado provavelmente pela elevada dosagem de areia média de granulometria extensa na curva de Alfred que, combinada com uma dosagem menor do agregado mais grosso e com a reduzida dosagem de ligante, resulta numa matriz mais compacta e rígida.

## 4.5 Comparação dos resultados experimentais com as normas

A comparação dos valores experimentais com os valores previstos nas normas dos betões estruturais é fundamental, não só para comprovar a fiabilidade dos resultados, como também para avaliar as características dos betões desenvolvidos e caracterizados.

A norma utilizada para fazer comparar as previsões foi o EC2, por constituir a norma europeia de referencia para o dimensionamento de estruturas de betão. As classes de resistências baseiam-se no valor característico da resistência referido a provetes cilíndricos,  $f_{ck,cil}$ , determinado aos 28 dias. Assim sendo, para que se possam fazer as previsões da resistência à tração e do módulo de elasticidade segundo este código, converteram-se as resistências à compressão de provetes cúbicos,  $f_{cm}$ , em valores de provetes cilíndricos,  $f_{cm,cil}$ , conhecendo a relação habitual entre ambas.

### 4.5.1 Massa volúmica

Os resultados das massas volúmicas do betão no estado endurecido são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Classificação do betão quanto à massa volúmica

Designação	LC75	LC75F	C75	LC125	LC125F	C125	LC175	LC175F	LC250A	C250
Massa (Kg)	7,87	8,11	7,84	7,95	8,16	8,01	8,01	8,1	7,78	7,96
Volume (cm <sup>3</sup> )	3375	3375	3375	3375	3375	3375	3375	3375	3375	3375
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2332	2402	2324	2356	2418	2372	2373	2399	2305	2357

Os betões classificam-se quanto à massa volúmica como betões normais, visto que esta encontra-se compreendida, para todos os betões, entre 2000 e 3000 Kg/m<sup>3</sup>. Apesar de os valores do módulo de elasticidade das misturas com a curva de Alfred terem sido sempre superiores aos dos betões com a curva de Faury, as massas volúmicas têm uma relação contrária, contrariamente ao esperado.

### 4.5.2 Resistência à compressão

A classificação dos betões quanto à sua resistência mecânica é efetuada pelo EC2, em classes, em função do valor característico da resistência à compressão,  $f_{ck}$ , conforme indicado na Tabela 4.13.

O valor característico da resistência à compressão,  $f_{ck}$ , é obtido habitualmente subtraindo 8MPa ao valor da resistência média à compressão obtido pelos ensaios,  $f_{cm}$ .

Para definição da classe deve-se, preferencialmente, ter em conta não só o valor característico da resistência à compressão em cubos, mas também o valor característico da resistência à compressão em cilindro.

Considerando a relação entre as resistências à compressão para provetes cúbicos e cilíndricos obtiveram-se os valores da Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Classe de resistência dos betões estudados

Designação	LC75	LC75F	C75	LC125	LC125F	C125	LC175	LC175F	LC250A	LC250	C250
$f_{cm}$ (MPa)	20,59	22,12	15,21	28,88	29,39	20,27	44,72	45,87	30,52	59,5	39,09
$f_{ck}$ (MPa)	12,59	14,12	7,21	20,88	21,39	12,27	36,72	37,87	22,52	51,5	31,09
$f_{cm,cil}$ (MPa)	18,07	19,3	13,77	24,7	25,11	17,82	37,38	38,3	26,02	49,2	32,87
$f_{ck,cil}$ (MPa)	10,07	11,3	5,77	16,7	17,11	9,82	29,38	30,3	18,02	41,2	24,87
Classe resistência	C8/10	C8/10	C8/10	C16/20	C16/20	C8/10	C30/37	C30/37	C16/20	C40/50	C25/30

#### 4.5.3 Resistência à tração por compressão diametral

A previsão da resistência média à tração,  $f_{ctm,EC2}$ , segundo o Eurocódigo 2, é realizada através da expressão (2.5):

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \leq C50/60 \quad (2.5)$$

Na Tabela 4.14 e na Figura 4.21 confrontam-se as relações de valores determinados experimentalmente nos ensaios de compressão diametral com os correspondentes valores obtidos pelas expressões do EC2.

Tabela 4.14 Valores da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias obtidos experimentalmente e previstos no EC2 e a sua relação

Designação	LC75	C75	LC125	LC125F	C125	LC175	LC250A	C250
$f_{ctm,EC2}$ (Mpa)	1,40	0,97	1,96	1,99	1,38	2,86	2,06	2,56
$f_{ctm}$ (Mpa)	1,43	0,73	2,15	2,39	1,45	3,20	2,08	2,73
$f_{ctm}/f_{ctm,EC2}$	1,0	0,7	1,1	1,2	1,0	1,1	1,0	1,1

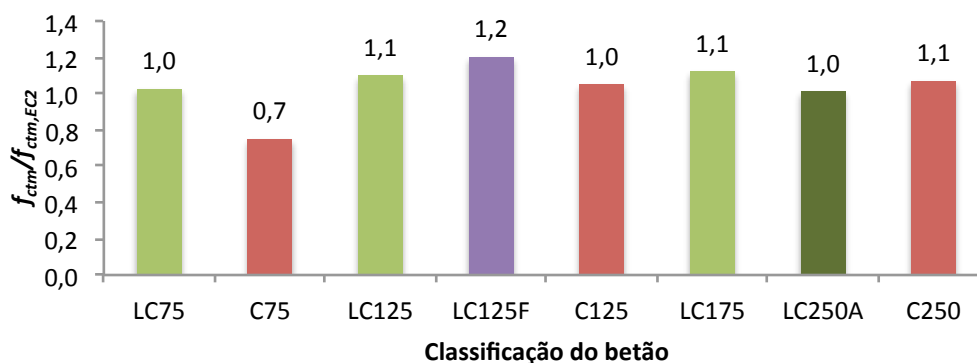


Figura 4.21 Relação entre as resistências à tração por compressão diametral obtidas experimentalmente e as previstas no EC2

Através da análise de resultados constata-se que os resultados da resistência à tração obtidos experimentalmente estão muito próximos dos previstos pelo EC2 e em alguns casos atingiram-se mesmo esses valores. À exceção do C75, os valores obtidos experimentalmente são cerca de 0 a 20% superiores aos previstos pelo código.

#### 4.5.4 Módulo de elasticidade

Para fazer a previsão do módulo de elasticidade segundo o Eurocódigo 2 utilizou-se a seguinte expressão analítica (2.8):

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (2.8)$$

Na Tabela 4.15 e na Figura 4.22 confrontam-se os valores obtidos pelas expressões do EC2 com os correspondentes valores determinados experimentalmente nos ensaios de compressão diametral aos 28 dias.

Tabela 4.15 Valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e previstos no EC2 e a sua relação

Designação	LC75	LC75F	LC125	LC125F	LC175	LC175F	LC250A	C250
$E_{cm,EC2}$ (GPa)	26,27	26,8	28,86	29	32,67	32,91	29,31	31,44
$E_{cm}$ (GPa)	37,4	28,7	40,6	34,5	42,4	38,2	38,1	36,5
$E_{cm}/E_{cm,EC2}$	1,42	1,07	1,41	1,19	1,3	1,16	1,3	1,16

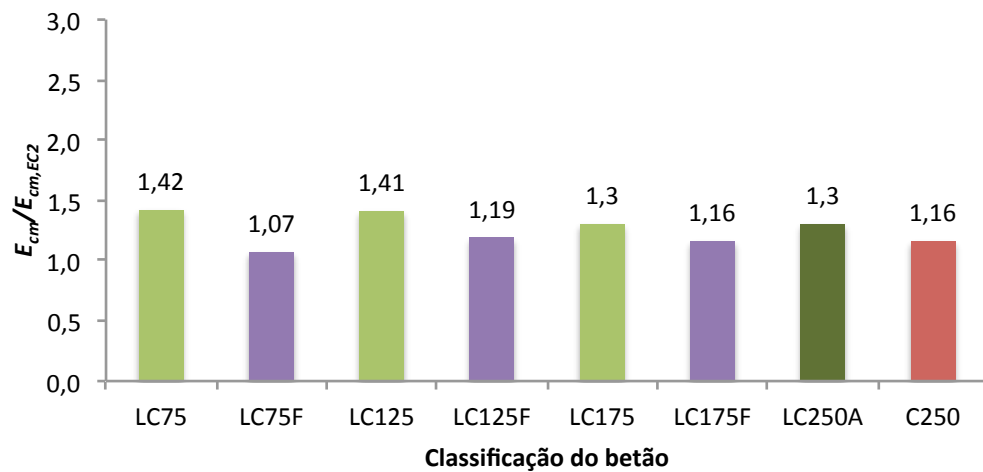


Figura 4.22 Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e previsto no EC2

Verifica-se que os valores experimentais do módulo de elasticidade são superiores aos previstos no EC2, sendo a relação entre ambos superior nos betões formulados com a curva de Alfred, variando de 1.07 a 1.19. Também aqui se evidencia a maior influência da curva de referencia e consequente granulometria dos agregados nos betões com menor dosagem de cimento.



## 5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente capítulo faz-se a síntese das principais conclusões obtidas no programa experimental e indicam-se possíveis estudos futuros.

### 5.1 Conclusões

Após a análise do programa experimental podem obter-se as seguintes conclusões gerais:

#### No estado fresco:

- os betões com reduzida dosagem de ligante,  $250 \text{ kg/m}^3$  (tipologia LC e LC\_F), apresentam baixa coesão e menor trabalhabilidade que os betões com parâmetros de formulação correntes e com dosagem normal de ligante,  $350 \text{ kg/m}^3$  (tipologia C), exigindo os primeiros maior energia de compactação;
- Para os betões com reduzida dosagem de ligante, os que têm adições de fíler e principalmente de cinzas volantes na sua composição são mais trabalháveis; além disso, os que são formulados com a curva de Faury, apesar de terem uma consistência seca, têm maior coesão em comparação aos mesmos betões formulados pela curva de Alfred.

#### Nos estado endurecido:

- A matriz dos betões com reduzida dosagem de ligante (tipologia LC e LC\_F) tem melhor desempenho mecânico que a matriz dos correspondentes betões com dosagem corrente de ligante (tipologia C), apresentando superiores resistências à compressão, à tração e à flexão e módulo de elasticidade;
- Conforme esperado, em cada série com a mesma dosagem de ligante, à medida que se aumenta a dosagem de cimento, as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade também aumentam;
- Os betões com baixa dosagem de ligante são mais eficientes, ao atingirem melhor desempenho de resistência e de módulo de elasticidade que os betões com igual dosagem de cimento e maior dosagem de ligante, uma vez que os primeiros têm maior compacidade.
- Quanto à influência granulométrica, os betões formulados pela curva de Faury exibem resistências mecânicas à compressão, à tração e à flexão superiores

aos betões formulados pela curva de Alfred; a diferença tende a reduzir em idades menos jovens e nos betões com maior dosagem de cimento. Este comportamento mostra a influência que as quantidades de agregado grosso e britado têm nas resistências do betão.

- No que respeita ao módulo de elasticidade, e contrariamente às resistências mecânicas, os betões com reduzida dosagem de ligante formulados pela curva de referência de Alfred atingem valores muito superiores aos dos correspondentes betões formulados pela curva de referência de Faury, sendo maior a diferença nos betões com menor dosagem de cimento. Apesar de os betões dimensionados com a curva de Faury apresentarem maior massa volúmica, supondo-se que teriam maior compacidade e rigidez, tal não se verifica no módulo de elasticidade.
- Apesar de serem fundamentais os parâmetros da matriz ligante no desempenho do betão com baixa dosagem de ligante, é evidente o aumento de influência que a proporção dos agregados assume à medida que se reduz a dosagem de cimento; a distribuição interna de tensões e a resistência da interface pasta-agregado apresenta certamente diferenças significativas nos betões com baixa dosagem de ligante, em comparação aos betões de formulação corrente.
- Os valores de resistência à tração obtidos experimentalmente são ligeiramente superiores aos valores previstos pelo EC2, provavelmente devido à diferença da distribuição das tensões e do comportamento da interface agregado-pasta; a mesma comparação para o módulo de elasticidade que apresenta valores experimentais até 40% superiores aos da previsão, sendo essas diferenças mais elevadas nos betões com menor dosagem de cimento e os formulados com a curva de Alfred.

## 5.2 Estudos futuros

Face aos resultados obtidos, propõe-se aprofundar o estudo dos betões com baixa dosagem de ligante, nas seguintes vertentes:

- Desenvolver um método de previsão do comportamento mecânico, adequado e fiável, com base nos principais parâmetros destes betões;
- Explorar diversas combinações de adições, visando a optimização de desempenho;

- Efetuar um estudo numérico comparativo dos betões com baixa dosagem de ligante com os de betões correntes, no sentido de identificar as diferenças de comportamento interno da matriz, particularmente as resistências de interface pasta-agregados e a distribuição interna de tensões.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borges, P. M. (2013). *Otimização da Quantidade de Cinzas Volantes em Betões*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- Camões, A. (2011). *Betão eco-eficiente com reduzido teor de cimento*. Guimarães.
- Camões, A. (2006). *Betões de elevado desempenho*. Guimarães
- Camões, A. (2006). *Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes*. Guimarães.
- Camões, A. (2002). *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- Camões, A. (2011). *Betões de elevado desempenho, Materiais de construção eco eficientes*. Guimarães.
- Camões, A., & Reis, R. (2012). *Betões eco-eficientes para uma construção sustentável*. Guimarães
- Costa, A., & Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão I - Parte II Materiais*. Instituto Superior Técnico.
- Costa, H. S. (2012). *Betões estruturais de agregados leves. Aplicações em prefabricação e reforço de estruturas*. Tese Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Costa, H. S. (2007). *Composição e Caraterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Coutinho, A. d. (1973). *Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. I e II). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Coutinho, J. d. (1999). *Agregados para Argamassas e Betões*. FEUP Porto.
- Coutinho, J. S. (2006). *Materiais de Construção II. 1ª Parte: Ligantes e Caldas*. FEUP, Porto.
- Coutinho, S. (1973). *Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. I e II). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Cunha, P. J. (2011). *Conformidade da Resistência à Compressão do Betão*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

- E372. (1993). *Água de amassadura para betões*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- E378. (1996). *Betões - guia para a utilização de ligantes hidráulicos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- E397. (1993). *Determinação do módulo de elasticidade em compressão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Fennis, S., Walraven, J., & Uijl, J. (2013). *Defined-performance design of ecological concrete*. Holanda
- Fennis, S. A., & Walraven, J. C. (2012). *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design*. (D. U. Technology)
- Fennis, S. A., & Walraven, J. C. (2012). *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design* (Vol. 57). Holanda.
- Gomes, A., Pinto, A. P., & Pinto, J. B. (2013). *Materiais de Construção: Cimento Portland e Adições*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.
- Lourenço, J. F. (2010). *Formulação e Produção de Argamassas e Betões*. ISEC, Coimbra.
- Lourenço, J., Júlio, E., & Maranhã, P. (2004). *Betões de Agregados Leves e Argila Expandida*. APEB, Lisboa.
- Malhotra, V. M., & Metha, P. K. (2002). *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development*. Ottawa, Canada.
- Mehta, P. K. (1999). *Advancements in concrete technology*. Concrete International (Vol. 21). Detroit.
- Metha, P. K. (2001). *Reducing the environmental impact of concrete*. Concrete international.
- NP EN 1008. (2003). *Água de amassadura para betão*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-2. (2009). *Ensaio no estado fresco - parte 2: ensaio de abaixamento*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa
- NP EN 12350-4 . (2009). *Ensaio no estado fresco - parte 4: grau de compactabilidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa
- NP EN 12390. (2002). *Ensaio do betão endurecido*. Instituto Português da Qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 12390-13. (2014). *Ensaaios do betão endurecido - parte 13: determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 12390-3. (2009). *Ensaaios no estado endurecido - parte 3: resistência à compressão de provetes*. Instituto português da qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 12390-5 . (2009). *Ensaaios nos estado endurecido - parte 5: resistência à flexão de provetes*. Instituto Português da Qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 12390-6. (2011). *Ensaos no estado endurecido - parte 6: resistência à tração por compressão dos provetes*. Instituto Português da Qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 197-1 . (2001). *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 1992-1. (2010). *Projeto de estruturas de betão - parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa

NP EN 206. (2000). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 450-1. (2012). *Cinzas volantes para betão parte 1: definição, especificações e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

Shah, S. P. (2000). *High performance concrete: past, present and future. High Performance Concrete-Workability, Strength and Durability*. (H. K. Technology, Ed.) Hong Kong.

Tilo Proske, S. H.-A. (2014). *Eco-friendly with reduced water and cement content - Mix design principles and application in practice. Construction and building materials*. Germany.