



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Raimundo Pereira

CONTROLO DA QUALIDADE DE BETÕES

Raimundo Pereira CONTROLO DA QUALIDADE DE BETÕES

UMinho | 2014

dezembro de 2014



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Raimundo Pereira

## CONTROLO DA QUALIDADE DE BETÕES

Dissertação de Mestrado  
Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

## **DEDICATÓRIA**

Algum carinho, atenção e delicadeza fazem-nos compreender o quanto algumas pessoas são peculiares e como são bem-vindas as suas ações.

Este meu trabalho dedico a todos os meus filhos especial e a meus familiares que muito em mim aguardam esperança, é Luís Pereira Monteiro, Marta Pereira Monteiro, Lelyana Monteiro, a minha esposa, o meu pai, a minha mãe as minhas irmãs Josefina Monteiro, Roberto Rabby Robby Monteiro, Manuel Monteiro (Falecido), Anita Monteiro, Juanita Monteiro Couili (Falecida), José Monteiro, Clarina Monteiro, Tomas Monteiro, Dulce Monteiro e o seu marido Jejuino Neto, Ermelinda da Costa e o seu marido Manuel, a minha esposa Marciana Pereira e os meus filhos Luís Pereira Monteiro, Marta Pereira Monteiro e Lelyana Pereira Monteiro, os meus sobrinhos é Jaret da Conceição Savio, Jenita da Conceição Monteiro, Jenito da Conceição Savio Monteiro, Madre Juvita da Costa, Arsénio da Costa Monteiro entre outras, e particularmente para Carlos Jesus Manuel Goncalves, Rui Cunha Reis com sua namorada Sónia, Jorge Mendes, Marisa Teixeira, Margarida Vieira, Tiago Martins, Pedro Gaspar, e entre outros colegas do grupo de estudo Joana Azevedo, Pedro Vasconcelos, Filipe Veloso, José da Silva, Elisabete Cardoso e Professor Doutor José Luís Barroso Aguiar (Orientador), Professor Aires Fernando Fernandes Camões, Professora Brígida Pires e professor Doutor António Correia, Professora Graça Vasconcelos Curso de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis (MCRS), Professor Doutor Luís Bragança que apoiaram o meu estudo pelo amor de Deus.

Para os professores/as, do Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis (MCRS), para os funcionários da Secretária da CRS Carina e para as estruturas da Universidade do Minho, Universidade Nacional Timor Lorosa'e (UNTL) lidera pela Reitor Dr. Aurélio Guterres e cooperação pela Ministério da Educação de Timor Leste, os meus sinceros agradecimentos.

Dedico este meu trabalho para todos os estudantes Timorenses que caminham no mesmo rumo mas especialmente Casimiro Alves da Cruz, Celestino Correia e Lito Varela, Aníbal da Costa Sousa, Lucas Sousa.

“O nosso compromisso é a vitória”

Obrigado a todos!



## AGRADECIMENTOS

A realização neste trabalho resulta dum percurso cheio de empenho, e sobretudo de bem-estar dos mais próximos a mim, que me muito sofrem e alcançam. Dedico os novamente profundos e sentidos agradecimentos àqueles que cooperaram com carinho e voluntariedade de colaboração comigo. Os meus agradecimentos até à data atual à organização Universidade do Minho e às pessoas que a formam.

Para o meu orientador Professor Doutor José Luís Barroso Aguiar pela oportunidade oferecida que fez toda diferenciação no meu estudo científico, pela oportunidade transmitir nas minhas competências e pela paciência de me orientar durante o meu estudo no Departamento de Engenharia Civil em nível Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis (MCRS), na especialização de Conservação dos edifícios.

Para Professor Doutor Aires Fernando Fernandes gostaria de expressar e agrado pela sua colaboração e dedicação, pela partilha de todo o conhecimento científico e experiência, pela possibilidade dada de concretizar este trabalho, pela minha evolução científica, e sobretudo pelos seus conselhos e amizade.

Para grupo das Construções da Universidade do Minho, em especial ao Professor Doutor Luís Bragança pela ajuda no decorrer da dissertação e ao Engenheiro Carlos Jesus Manuel Gonçalves pela ajuda dedicada nos trabalhos práticos de Laboratório Materiais de Construção (LMC).

Para os meus colegas de trabalho, sobretudo no Laboratório de Engenharia Civil, apresentado o meu profundo agradecimento pela cooperação para o longo desta caminhada, a todos vocês, Rui Cunha Reis, Jorge Mendes, Margarida Viera, Marisa Teixeira, Tiago Martins, Walid Tahri, Daniel Pinheiro, Marcus, Dr. Afonso, Fernando Pokee, José Gonçalves, Rui Oliveira, Marco Jorge

Para os meus amigos e amigas por tudo, sobretudo pelas forças dadas em alturas difíceis, onde elaborei este trabalho.

A minha família pela ajuda nos momentos difíceis desta longa caminhada, pelo encorajamento, pela motivação e dedicação, sacrifício e acima de tudo pelo vosso amor e compreensão. Sem vocês não seria possível. A minha avó pelo amor notável.

Para a iluminação do sol, pelo seu auxílio infindável e dedicação, pelo seu entendimento, sobretudo pelo seu amor e afeto que me ajudou a superar batalhas. Para o rebento que me inspirou e encheu de alegria.

A todos os que me ajudaram a finalizar este trabalho, os meus profundos agradecimentos.

---

## CONTROLO DA QUALIDADE DE BETÕES

### RESUMO

O presente trabalho de investigação aborda o estudo de composição do betão através de um método baseado em tabelas e a comprovação da sua validade.

O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de ligantes, agregados, água, adjuvantes, e um certo volume de ar.

A sua constituição (composição) é determinada de acordo com o desempenho ou características necessárias às exigências especificadas, em função do tipo de construção onde vai ser aplicado e pela norma que regulamenta este produto, ou seja, a norma NP EN 206-1:2007: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

A marcação CE nos produtos de construção, o fabrico em Portugal de cimentos e agregados de qualidade, e a facilidade de utilização de um método baseado em tabelas são razões para se investigar a validade do método proposto pelo ACI 211 aplicado à realidade da portuguesa.

O estudo de composição partiu das características inicialmente especificadas para o betão, obtenção de classes de resistência à compressão C25/30 e C50/60, e classe de Consistência S2.

Definiu-se um programa experimental compreendendo a formulação de diferentes composições e a respetiva caracterização dos betões produzidos avaliando a sua trabalhabilidade e resistência à compressão.

Através dos ensaios realizados, concluiu-se que é possível produzir betões com consistência e resistência à compressão de acordo com os valores inicialmente especificados, recorrendo à metodologia descrita no ACI 211 e utilizando constituintes correntes na indústria da construção, obtendo composições do lado da segurança dando assim um primeiro passo para a validação do método estudado.

#### **PALAVRAS-CHAVE:**

Marcação CE; Cimento Portland; Normalização, Metodologia ACI





## QUALITY CONTROL OF CONCRETE

### ABSTRACT

The present research work deals with the study of the composition of concrete composition by a method based on tables and proof its validity.

Concrete is a material constituted by mixing, properly proportioned, binders, aggregates, water, admixtures and a certain volume of air.

Its constitution (composition) is determined according to the performance or characteristics necessary to specified requirements, depending on the type of construction, which will be applied and the standard that governs this product , i.e. , the NP EN 206-1:2007 : Specification , performance , production and conformity .

The CE marking of construction products, the manufacture of cement and aggregates in Portugal with quality and the easy to use a table-based method are reasons to investigate the validity of the method proposed by ACI 211 applied to the construction reality in Portugal.

The composition study departed from features originally specified for concrete, obtaining compressive strength classes C25/30 and C50/60 and, consistency class S2.

An experimental program comprising the formulation of different compositions and the determination of the respective characteristics of the produced concrete by evaluating the workability and the compressive strength was defined.

Based on the results of the tests, it was found that it is possible to produce concrete with compressive strength and consistency according to the values specified initially, using the methodology described in ACI 211 and using standard constituents in the construction industry, achieving compositions on the side of safety giving just a first step for validation of the studied method.

#### **KEYWORDS:**

CE Standard; Portland cement; Standardization; ACI Methodology



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento Temático .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Descrição da Dissertação .....	2
<b>2</b>	<b>CONSTITUINTES DO BETÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1	Cimentos .....	5
2.1.1	Tipos de Cimentos .....	6
2.1.2	Processo de Fabrico do Cimento.....	8
2.1.3	Características do cimento .....	9
2.2	Agregados .....	10
2.3	Água.....	16
2.4	Adjuvantes .....	18
2.5	Adições.....	20
<b>3</b>	<b>COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO BETÃO.....</b>	<b>23</b>
3.1	Classificação .....	23
3.2	Requisito para a composição do betão.....	33
3.3	Especificação do betão.....	45
<b>4</b>	<b>CONTROLO DA PRODUÇÃO DO BETÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1	Generalidades.....	51
4.2	Sistema de controlo de produção .....	51
4.3	Entrega do betão fresco.....	59
4.3.1	Informação do utilizador do betão para o produtor.....	59
4.4	Informação do produtor do betão para o utilizador.....	60
4.5	Avaliação da Conformidade.....	63
4.5.1	Controlo da Conformidade do Betão da Comportamento Especifico.....	64
<b>5</b>	<b>EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO.....</b>	<b>73</b>
5.1	Introdução .....	73
5.2	Inspeção .....	74
5.3	Betonagem .....	75
<b>6</b>	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>87</b>
6.1	Propriedades e Conformidades dos Materiais Constituintes das Composições.....	87

6.1.1 Cimentos.....	88
6.1.2 Agregados.....	90
6.1.3 Água .....	92
6.1.4 Adjuvantes.....	92
6.1.5 Adições.....	94
6.2 Metodologia das Composições.....	95
6.2.1 Introdução.....	95
6.2.2 Método ACI.....	96
6.3 Estudo Da Composição Dos Betões Com Agregados Normalizados .....	103
6.3.1 Cálculo Do Módulo De Finura .....	103
6.3.2 Baridade.....	104
6.3.3 Dimensionamento Pelo Método ACI Das Misturas de Betão do Estudo.....	107
6.3.4 Composições estudadas .....	116
6.3.5 Realização da amassadura .....	118
6.3.6 Execução e cura de provetes.....	119
<b>7 Ensaios e análises de resultados .....</b>	<b>121</b>
7.1 Ensaios no estado fresco do betão .....	121
7.1.1 Ensaio de espalhamento .....	121
7.1.2 Ensaio de abaixamento .....	123
7.1.3 Ensaio da determinação da massa volúmica .....	125
7.2 Ensaios no estado endurecido do betão .....	127
7.2.1 Ensaio de resistência à compressão.....	127
7.3 Ensaios e análise resultados de durabilidade.....	136
7.3.1 Absorção de água por capilaridade.....	136
7.3.2 Absorção de água por imersão .....	140
7.3.3 Resistências aos sulfatos.....	143
7.3.4 Penetração de cloretos .....	148
<b>8 BETÕES EM TIMOR – LESTE.....</b>	<b>155</b>
<b>9 CONCLUSÕES .....</b>	<b>161</b>
9.1 Estudo Futuro .....	162
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>165</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Em 1756 início da obra contemporânea do farol na Eddystone Smeaton, J. [3]. ....	5
Figura 2 - Processo de fabricação de cimento .....	9
Figura 3 – Máxima dimensão do material agregado [11].....	12
Figura 4 – Metodologia para avaliação da reatividade dos agregados .....	14
Figura 5 – Classes de exposição de acordo com as zonas em que se aplica determinado tipo de betão [20].....	23
Figura 6 – Classes de exposição para habitações e serviços [20].....	24
Figura 7 – Tipos de classes de exposição para edifícios comerciais e industriais [20].....	24
Figura 8 – Tipos de classes de exposição para obras de arte e infraestruturas [20] .....	25
Figura 9 – Classes de exposição correntes para obras marítimas [20] .....	26
Figura 10 – Cimento Portland CEM I 42,5R – Secil [30] .....	88
Figura 11 – Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m <sup>3</sup> de cimento CEM II/A-L 42,5R [30] .....	90
Figura 12 – a) Areia 0/4 mm; b) Brita 4/8 mm.....	91
Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados, grosso e fino .....	92
Figura 14 – Superplastificante da Basf - Glenium Sky 617 .....	93
Figura 15 – Aspeto da cinza volante .....	94
Figura 16 – Visualização ao microscópio de uma amostra de cinzas volantes [2] .....	95
Figura 17 – Esquema do fabrico de betões no estudo desenvolvido .....	96
Figura 18 – a)Relação entre a altura e o diâmetro do recipiente do ensaio da baridade; b) Varão de compactação.....	104

Figura 19 – Alteração da quantidade de água indispensável para a amassadura com a dimensão máxima do agregado.....	108
Figura 20 – Volume de agregado grosso em função da dimensão máxima do agregado para o módulo de finura do agregado fino.....	110
Figura 21 – Variação da massa unitária do betão com dimensão máxima do agregado.....	112
Figura 22 – Betoneira da amassadura com capacidade de 90 lt.....	118
Figura 23 – Diferentes tipos de moldes metálicos usados na moldagem para o fabrico dos diversos provetes de betão .....	119
Figura 24 – Medição da dimensão máxima do espalhamento do betão segundo duas direções d1 e d2 (mm).....	122
Figura 25 – Realização do ensaio de abaixamento com o cone de Abrams .....	124
Figura 26 – Variação dos valores da massa volúmica de betão para diferentes tipos de misturas .....	127
Figura 27 – a) Execução do ensaio da resistência á compressa; b) fim de ensaio; c) tipo de rotura .....	128
Figura 28 – Variação da tensão de compressão com a idade do betão em conformidade de resistência à compressão .....	130
Figura 29 – Influência da água A/C na resistência á compressão [47].....	132
Figura 30 – Valor característico da resistência (fck) [47].....	133
Figura 31 – Comparação dos valores de razão A/C previstos pelo American Concrete Institute (ACI) e obtidos no estudo em laboratorial.....	133
Figura 32 – Valores calculados dos coeficientes de absorção por capilaridade relativamente às misturas do betão Padrão .....	138
Figura 33 – Valores calculados dos coeficientes de absorção por capilaridade relativamente às misturas do betão de elevado desempenho (BED).....	138

---

Figura 34 – Valores da absorção por capilaridade das diversas composições de betão submetidas a ensaios laboratoriais.....	139
Figura 35 – a) Pesagem dos provetes imersos em água; b) Pesagem dos provetes saturados com superfície seca na balança hidrostática .....	141
Figura 36 – Valores da absorção por imersão das diversas composições de betão do estudo	142
Figura 37 – Processamento do ataque dos sulfatos numa estrutura (Skalny et al, 1996).....	144
Figura 38 – Variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos.....	147
Figura 39 – Variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos ao longo do número de ciclos.....	147
Figura 40 – Tendência da variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos ao longo do número de ciclos .....	148
Figura 41 – Esquema do equipamento de indução de corrente elétrica no qual se visualiza a posição correta do betão no interior da manga isoladora juntamente com os diferentes tipos de soluções .....	150
Figura 42 – Esquema de ensaio penetração de cloretos usado no laboratório materiais de construção da Universidade do Minho .....	150
Figura 43 – a) Ensaio de compressão diametral dos provetes b) Verificação da camada penetrada pelos cloretos.....	151
Figura 44 – a) Perfil da medição da profundidade de penetração (mm) dos cloretos; b) Medição da penetração dos cloretos nas composições estudadas .....	152
Figura 45 – Variação do coeficiente de difusão de cloretos dos betões .....	153
Figura 46 – Carta geológica simplificada de Timor Leste [54].....	155
Figura 47 – a) Antigo Mercado em Bacau feito parcialmente em betão por portugueses; b) Em remodelação atualmente .....	156

Figura 48 – Casa tradicionais construídas com materiais correntes e acessíveis á população .....	157
Figura 49 – Tipo de construção de casa atual em Timor Leste.....	157
Figura 50 – Fundações da Ponte Comoro II com uma classe de betão na ordem do C25/30 [55].....	158
Figura 51 – Exemplo do uso dum classe de betão C 50/60 nos pilares da Ponte Comoro II [55].....	158
Figura 52 – Fundações da Ponte Comoro II com uma classe de betão na ordem do C25/30 [55].....	159
Figura 53 – Ponte Comoro quase finalizada com partes em betão [55] .....	160
Figura 54 – Ponte Comoro esta finalizada com partes em betão [55] .....	160



---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Principais cimentos utilizados na atividade da construção civil .....	6
Quadro 2 – Características adicionais dos agregados para certas utilizações; Características não estabelecidas na NP EN 12620:2002 [11] .....	13
Quadro 3 – Tipo de rochas e minerais potencialmente reativos aos álcalis [3].....	15
Quadro 4 – Tipo de rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis [3] .....	15
Quadro 5 – Classes de exposição .....	27
Quadro 6 - Combinações de classes de exposição .....	29
Quadro 7 - Valores limite das classes de exposição para o ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidos .....	30
Quadro 8 - Classes de abaixamento.....	30
Quadro 9 - Classes Vêbê .....	31
Quadro 10 - Classes de compactação .....	31
Quadro 11 - Classes de espelhamento .....	31
Quadro 12 - Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal e para betão pesado .....	32
Quadro 13 - Classes de resistência à compressão para betão leve .....	32
Quadro 14 - Classes de massa volúmica do betão leve .....	33
Quadro 15 - Categorias de vida útil.....	36
Quadro 16 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob Ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos .....	37
Quadro 17 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos .....	37

Quadro 18 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos.....	38
Quadro 19 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos.....	39
Quadro 20 - Composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos.....	40
Quadro 21 - Propriedades, métodos e provetes de ensaio.....	42
Quadro 22 - Máximo teor de cloretos do betão .....	45
Quadro 23 - Classes de teor de cloretos do betão .....	45
Quadro 24 - Desenvolvimento da resistência do betão a 20°C .....	47
Quadro 25 – Controlo dos materiais constituintes .....	52
Quadro 26 – Controlo do equipamento.....	53
Quadro 27 – Controlo dos procedimentos de produção e das propriedades do betão .....	54
Quadro 28 – Registos e outros documentos, se relevantes .....	56
Quadro 29 – Tolerâncias para o doseamento dos materiais constituintes.....	58
Quadro 30 – Exatidão do equipamento de pesagem.....	58
Quadro 31 – Controlo dos materiais constituintes (betão de alta resistência) .....	59
Quadro 32 – Controlo do equipamento (betão de alta resistência).....	60
Quadro 33 - Controlo dos procedimentos de produção e das propriedades do betão de alta resistência.....	61
Quadro 34 – Desenvolvimento da resistência do betão a 20 <sup>0</sup> C .....	62
Quadro 35 – Frequência mínima de amostragem para avaliação da conformidade .....	66
Quadro 36 – Critérios de conformidade para a resistência à compressão .....	67
Quadro 37 – Critérios de conformidade para os membros da família .....	68

---

Quadro 38 – Critérios de identidade para a resistência à compressão.....	70
Quadro 39 – Guia para a seleção das classes de inspeção.....	75
Quadro 40 – Requisitos da inspeção de materiais e produtos .....	76
Quadro 41 – Âmbito da inspeção .....	76
Quadro 42 – Requisitos do planeamento, exame e documentação.....	77
Quadro 43 – Inspeção das operações anteriores à betonagem e a produção .....	77
Quadro 44 – Inspeção do betão fresco.....	78
Quadro 45 – Inspeção das operações anteriores à betonagem.....	79
Quadro 46 – Inspeção da colocação e da compactação.....	80
Quadro 47 – Inspeção da proteção e cura.....	81
Quadro 48 – Inspeção das operações pós betonagem .....	81
Quadro 49 – Períodos de cura mínimos para as classes de exposição da norma .....	84
Quadro 50 – Características Químicas .....	89
Quadro 51 – Características Físicas .....	89
Quadro 52 – Características Mecânicas.....	89
Quadro 53 – Análise granulométrica dos agregados selecionados.....	91
Quadro 54 – Informação das características técnicas do adjuvante no estudo.....	94
Quadro 55 – Abaixamento recomendado em função do tipo de construção. ....	98
Quadro 56-Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento. ....	99
Quadro 57 - Relação entre razão a/c e a resistência à compressão do betão. ....	100
Quadro 58 - Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão. ....	101

Quadro 59 - Primeira estimativa para massa do betão fresco. ....	102
Quadro 60 – Módulo de finura – Agregado Fino.....	104
Quadro 61 - Capacidade do recipiente usado no ensaio da baridade segundo a norma ASTM C29/C29M:2009 [38].....	105
Quadro 62 – Cálculo da baridade do agregado máximo usado no estudo. ....	106
Quadro 63 - Principais elementos de dimensionamento para as composições do estudo.....	107
Quadro 64 - Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento (Adaptada do ACI 211.1-91 [32]).....	108
Quadro 65 - Relação entre razão a/c e a resistência à compressão do betão (Adaptada do ACI 211.1-91 [32]) .....	109
Quadro 66 - Quantidade de cimento no qual a aplicar em cada amassadura.....	109
Quadro 67 - Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão (Adaptado ACI)	111
Quadro 68 - Quantidade de agregado grosso utilizado na amassadura.....	111
Quadro 69 - Primeira estimativa para massa do betão fresco (Adaptado do ACI).....	113
Quadro 70 - indica as quantidades de cada constituinte utilizada para a realização de cada amassadura. ....	114
Quadro 71 - Ajuste da quantidade de água de amassadura.....	114
Quadro 72 - Ajustes da quantidade do cimento e cinza volante .....	115
Quadro 73 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m <sup>3</sup> de betão .....	116
Quadro 74 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m <sup>3</sup> de betão .....	116
Quadro 75 - Quantidade de material necessário para a realização de 0.035 m <sup>3</sup> de betão.....	117
Quadro 76 – Valores do ensaio de espalhamento para as diferentes misturas de betão .....	123
Quadro 77 – Abaixamento recomendado em função do tipo de construção .....	123

---

Quadro 78 – Valores obtidos do ensaio de abaixamento para as diferentes misturas de betão .....	125
Quadro 79 – Valores da massa volúmica de betão para as diferentes misturas .....	127
Quadro 80 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão .....	129
Quadro 81 – Critérios de conformidade para resistência à compressão do betão .....	130
Quadro 82 – Verificação dos critérios de conformidade .....	131
Quadro 83 – Classe de resistência à compressão do betão .....	131
Quadro 84 - Classes de resistência à compressão para betão normal e o betão pesado .....	132
Quadro 85 - Valores de resistência à compressão dos provetes ensaiados .....	134
Quadro 86 - Valores limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos, [20] .....	135
Quadro 87 – Classes de exposição ambiental on as composições estudadas podem ser aplicadas .....	135
Quadro 88 - Composição final para 1m <sup>3</sup> de betão .....	136
Quadro 89 – Coeficientes de capilaridade dos betões .....	139
Quadro 90 – Valores de absorção de imersão para as composições estudadas .....	142
Quadro 91 - Ficha técnica do sulfato de sódio anidro (Quimidois, 2005) .....	145
Quadro 92 – Valores da variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos .....	146
Quadro 93 – Duração do ensaio CTH [52] .....	151
Quadro 94 – Valores dos coeficientes de difusão de cloretos nos betões .....	152
Quadro 95 – Valores do coeficientes de difusão em estado não estacionário ( $D_{ns}$ ) correspondente a uma classe de resistencia à penetração de cloretos [52] .....	153



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- BED – Betão Elevado de Desempenho (Superplastificastes)
- $D_{máx}$  – Dimensão máxima do agregado
- EN – Norma Europeia; Estrada Nacional
- NP – Norma Portuguesa
- ITS – Resistência à tração indireta (*Indirect Tensile Strenght*)
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- ITSR – Índice de resistência à tração indireta (*Indiretas Tensile Strenght Ratio*)
- NP – Norma Portuguesa





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Temático

O material estudado na tese de investigação, designa-se por betão, este material é uma pedra artificial, é uma mistura de cimento com agregados, água, podendo a estes materiais aglomerar como opção o uso á incorporação de adjuvantes e adições. A junção de todos estes componentes desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento, originando a pedra artificial, designada de betão.

Os betões são utilizados como materiais de construção há milhares de anos, há apontamentos de que os materiais eram, quando necessário, transportados a distâncias de centenas de quilómetros, como é o exemplo de um pavimento de betão simples datado de 5600 AC em Lepenskivin, segundo Stanley [1].

Nas antigas civilizações o betão era utilizado essencialmente em pavimentos, paredes e suas fundações, não existindo na altura uma preocupação dos utilizadores na parte do controlo da qualidade desse material.

O primeiro povo a pensar na utilização do betão como uso mais corrente foram os romanos. Estes exploraram as hipóteses deste material em diversas obras, tais como em casas, templos, pontes e aquedutos, muitas destas ainda estão presentes nos dias de hoje e são como exemplos do elevado nível atingido pelos construtores Romanos. Pode se verificar exemplos como o Aqueduto da Pont du Gard em Nimes (realizado em 150 DC no qual se utilizou o betão no canal de água e no interior do forro das cantarias), também as pontes de alvenaria e betão ainda existentes em diversos países, tal como a Ponte de Vila Formosa na N369 e a Ponte de Trajano sobre o Rio Tâmega em Chaves, em Portugal e outras pela Europa .

Nos dias de hoje o consumo de betão aumentou exponencial com o crescimento da população mundial, surgiu assim ao longo do tempo uma sociedade consumidora e mais exigente no controlo da qualidade deste material artificial. A complexidade destes fatores conduziu a um aumento do controlo de qualidade do betão, tanto no seu estado fresco e endurecido.

O controlo da qualidade do betão foi apoiado num sistema de normalização estudado por entidades científicas e implementado por técnicos especializados, estas condicionantes conduziram a um maior rigor no fabrico e na qualidade do betão a empregar na construção

nos dias de hoje.

De acordo com a normalização europeia, a norma NP EN 206-1:2007 [2] estabelece que todo o betão deve ser sujeito ao controlo da produção sob a responsabilidade do produtor. O controlo da produção compreende todas as medidas necessárias para manter as propriedades do betão em conformidade com os requisitos especificados.

Neste estudo em causa pretende-se verificar o controlo da qualidade betão seguindo a norma NP EN 206-1:2007 [2] para os betões estudados, atendendo a todos os requisitos e condições descritos na norma.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo primordial desta tese é efetuar um estudo de betões no estado fresco e endurecido sobre um plano de controlo de qualidade, apoiado na normalização do controlo e qualidade do betão, seguindo especificamente norma NP EN 206-1:2007 [2]. Este estudo é fundamentado na fabricação de dois grupos de betões, um de elevado desempenho e outro convencional.

Dentro destes dois grupos foram utilizadas adições e adjuvantes no fabrico dos betões, tendo como objetivo a verificação do controlo e da qualidade desse betões em estudo.

Todo este controlo dos betões fabricados em laboratório foi executado com base em ensaios para verificação dos requisitos na norma NP EN 206-1:2007 [2].

Este trabalho tem como objetivo fundamental adquirir conhecimento sobre controlo e qualidade dos diferentes betões diversos tipos de classes de resistência. Assim desta forma será enriquecido o conhecimento sobre este tema em Timor Leste permitindo obter betões com um grau de qualidade elevado e com o devido controlo superior aos existentes.

## **1.3 Descrição da Dissertação**

Na fase inicial deste trabalho realizou-se uma pesquisa bibliográfica extensa sobre o tema da tese, frisando como objetivo a investigação sobre o controlo da qualidade de betões.

Numa segunda fase do estudo, foi evidenciado os aspetos dos constituintes do betão, assim como os tipos de cimentos existentes em Portugal relacionando com os existentes em Timor Leste, ainda sobre este tema, analisou-se o processo de fabrico do cimento e sua caracterização.

Nesta fase procurou-se também pesquisar sobre os agregados a utilizar no fabrico dos betões, tais como a sua dimensão, a sua natureza do tipo natural ou artificial, ainda podendo ser de origem reciclados. Além dos aspetos anteriores estudados, foram abordados outros como a água, adjuvantes e o tipo de adições utilizadas no fabrico dos betões.

A terceira fase baseia-se na pesquisa sobre a composição e especificação do betão, no qual foi referenciado aspetos tais como a classificação, os requisitos para a composição do betão e a especificação do betão. Sobre a classificação do betão foi evidenciado o tipo de classes de exposição relacionadas com as ações ambientais, procurou-se relacionar os diferentes tipos de ações para cada tipo de betão, classe de resistência e a que requisitos obedecer, tais como consistência, abaixamento e resistência à compressão.

Ainda neste tema procurou-se investigar os requisitos especificados do betão de forma que a composição de betão e os materiais constituintes obedeam a todos esses requisitos estipulados. Procurou se na especificação do betão entender de que forma é desenvolvida todo o processo em causa entre o especificador e o produtor, referenciando todos aspetos relacionados.

Na quarta fase avaliam-se as condições de controlo de produção do betão referenciando aspetos do sistema de controlo como também a entrega do betão fresco incluindo a informação do utilizador do betão para o produtor. É relevante nesta fase indicar a informação do produto do betão para o utilizador, não deixando de referenciar a importância deste aspecto do controlo.

Neste capítulo foi referenciado a avaliação da conformidade do betão, destacando o controlo da conformidade da resistência á compressão.

No capítulo seis é mencionado a execução de estruturas do betão e os aspetos mais importantes a incluir, tais como a inspeção, a betonagem e os requisitos normativos do betão.

No capítulo sete é descrito o estudo experimental, onde são referidos alguns aspetos das propriedades dos materiais utilizados na metodologia usada. Nesta fase é descrito o método de composição proposto pelo ACI que está no suporte de toda a investigação realizada, assim como o estudo da composição de betões com agregados normalizados, são descritos os materiais constituintes utilizados e definidas as suas quantidades através de um estudo da composição.

Neste capítulo é descrita a campanha experimental realizada e apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para as diferentes composições em estudo.

Numa fase posterior foram analisados todos os resultados obtidos, sendo estes os principais indicadores das conclusões sobre os fatores de controlo da qualidade de betão que mais condicionaram no desempenho das diferentes composições realizadas.

Com os trabalhos de laboratório concluídos foi redigida a dissertação de Mestrado que colige e divulga todo o trabalho desenvolvido neste projeto de investigação sobre o controlo da qualidade dos betões.

## 2 CONSTITUINTES DO BETÃO

### 2.1 Cimentos

O cimento é, sem dúvida, o constituinte mais importante do betão [8]. A palavra cimento tem origem no latim “caementu” que designava na antiga Roma uma espécie natural de rochedos. Este é um material que na presença de água produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos, ganhando resistência mecânica.

A utilização de aglomerantes na construção desde muito cedo se mostrou uma necessidade e já no antigo Egito se utilizava um aglomerante de gesso calcinado, assim como os gregos e romanos utilizavam solos vulcânicos, cujas características permitiam o seu endurecimento depois de misturados com água e cal.

No ano 1756 Jonh Smeaton, conseguiu produzir um producto de alta de resistencia através da calcinação de calcários moles e argilosos, desenvolvendo nos anos seguintes este aglomerado.

Em 1758 o engenheiro inglês John Smeaton, procedeu a uma construção de um farol próximo de Plymouth tal como na Figura 1, no decorrer dessa construção procedeu á utilização de materiais aglomerantes, no qual já tinha concluído anteriormente que a mistura de calcário e argilas era muito superior ao calcário puro, Smeaton, J. [3].

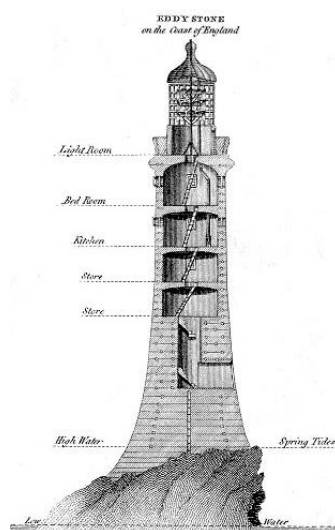


Figura 1 – Em 1756 início da obra contemporânea do farol na Eddystone Smeaton, J. [3].

Em 1824, Aspdin, J. [4] a partir de pedras calcárias e argilas, produziu um pó bastante fino que quando combinado com água e posteriormente seco originava um material, que foi batizado como cimento Portland em homenagem à ilha de Portland, uma vez que possuía rochas muito semelhantes às originadas por este material. Atualmente este é um aglomerante hidráulico largamente utilizado para a produção de determinados produtos e também de argamassas prontas.

Com o passar dos anos, várias foram as pessoas que dedicaram a sua vida a estudar o cimento e como seria de esperar muitas foram as combinações criadas, cujas características se mostraram convenientes às necessidades que se faziam sentir. Portanto, atualmente, são vários os tipos de cimentos comercializados.

### 2.1.1 Tipos de Cimentos

São vários os cimentos produzidos e comercializados em Portugal. Para além do clínquer do cimento Portland, sempre que um cimento possua na sua composição outros tipos de materiais, os quais são principalmente resíduos industriais, surge a necessidade de se denominar esse novo produto. A norma NP EN 197-1:2001/A 1:2005 [5] apresenta a relação de cimentos utilizados na atividade da construção civil Quadro 1.

São vários os cimentos produzidos e comercializados em Portugal. Para além do clínquer do cimento Portland, sempre que um cimento possua na sua composição outros tipos de materiais, os quais são principalmente resíduos industriais, surge a necessidade de se denominar esse novo produto. A norma NP EN 197-1:2012 [6] apresenta a relação de cimentos utilizados na atividade da construção civil Quadro 1.

Quadro 1 - Principais cimentos utilizados na atividade da construção civil

Designação	Tipo
Cimento Portland	CEM I
Cimento Portland composto	CEM II
Cimento Portland de escória	CEM II – S
Cimento Portland de pozolana natural	CEM II – P
Cimento Portland de pozolana natural calcinada	CEM II – Q
Cimento Portland de cinza volante siliciosa	CEM II – V
Cimento Portland de cinza volante calcária	CEM II – W
Cimento Portland composto	CEM II – M
Cimento de alto-forno	CEM III
Cimento pozolânico	CEM IV
Cimento composto	CEM V

### **2.1.1.1 Cimento Portland**

O cimento Portland foi o pioneiro neste assunto, sendo portanto extremamente importante e servindo de base a todo o tipo de comparações que possam ser efetuadas.

Atualmente é o ligante hidráulico mais utilizado na confecção de betões e argamassas. Este é obtido através de uma mistura devidamente proporcionada de calcário e argila e/ou eventualmente de outras substâncias apropriadas ricas em sílica, que quando atingem aproximadamente 1500 °C constituem o clínquer. Este, por sua vez, é o principal componente do cimento Portland e também o responsável pelas suas características de ligante hidráulico e resistência mecânica após a hidratação. O clínquer é constituído por silicato tricálcico (45 – 75%) sendo este o responsável pelas propriedades hidráulicas e rápida reação com a água, silicato dicálcico (7 – 35%) que proporciona o aumento gradual da resistência mecânica da mistura, aluminato tricálcico (0-13%) responsável pela elevada libertação de calor de hidratação, aluminato tetracálcico (0-18%) que proporciona uma presa rápida e ainda em quantidades pouco significativas óxido de cálcio livre, periclásio, etc. O processo de fabrico do cimento Portland é composto por várias etapas: extração da matéria-prima, britagem, moagem da mistura, homogeneização da mistura, calcinação da matéria-prima e adição com gesso. Na Figura 2 é apresentado o processo de fabricação do cimento.

### **2.1.1.2 Cimento de Escórias**

As escórias são um subproduto de alto-forno constituído por impurezas. Mesmo sendo rejeitadas em vários tipos de indústrias conferem as características de ligantes hidráulicos. Permitem elevar a durabilidade do cimento principalmente em ambientes com a presença de sulfatos. Trata-se de um subproduto que possui um custo reduzido.

No que diz respeito ao cimento de escórias, sempre que a percentagem deste subproduto é inferior a 35%, a aplicação do cimento em causa é a mesma que o cimento Portland.

Existem várias classificações de acordo com a percentagem de escórias. O cimento CEM II/A-S possui cerca de 6 a 20% de escórias, CEM II/B-S contém 21 a 35%, os restantes, CEM III/A, CEM III/B e CEM III/C são constituídos com cerca de 36 a 95% de escórias.

Pode ainda referir-se o facto da resistência aos meios agressivos oferecidos por este tipo de cimento ser superior à do cimento Portland.

### **2.1.1.3 Cimento Pozolânico**

Podem definir-se como pozolanas argilas cozidas a pelo menos 750<sup>0</sup>C. Existem pozolanas naturais e artificiais, sendo que as naturais foram cozidas naturalmente pelo calor de um vulcão e as artificiais são sílicas hidratadas moídas e cozidas a cerca de 800<sup>0</sup>C. Tal como qualquer outro subproduto, também as pozolanas apresentam um custo menor quando comparado ao clínquer, no entanto deve-se ter em atenção o facto destas apenas o poderem substituir até um determinado ponto.

O cimento pozolânico (CEM IV/A e CEM IV/B) obtém-se adicionando ao clínquer Portland uma pozolana natural, natural calcinada ou cinzas volantes em quantidades compreendidas entre 11% a 55%. Como características deste produto podem enunciar-se o baixo calor de hidratação e elevada resistência a águas sulfatadas e ambientes industriais comparativamente com o cimento Portland como referenciado por Aguiar [7]

### **2.1.1.4 Cimento de Cinzas Volantes**

As cinzas volantes possuem a aparência de uma areia cinzenta de finura média e uma vez que se encontram nos fumos das centrais que queimam carvão são apreendidas em instalações apropriadas, de modo a evitar a sua fuga para a atmosfera.

Sempre que se adicionam ao clínquer Portland em percentagens inferiores a 35% adquire-se o cimento Portland de cinzas volantes (CEM II-V e CEM II-W). Este apresenta maior resistência a meios agressivos e endurecimento mais lento de acordo com Aguiar [7].

## **2.1.2 Processo de Fabrico do Cimento**

A matéria-prima necessária ao fabrico do cimento é maioritariamente proveniente de pedreiras e portanto a localização de unidades fabris deste produto está inteiramente relacionada com a proximidade destas.

O cimento pode ser fabricado por duas vias, uma em que a matéria-prima é moída e homogeneizada dentro de água, a qual se designa de via húmida, e uma outra em que a moagem e homogeneização se realizam a seco e portanto como seria de esperar se denomina de via seca. A via húmida é um processo muito antigo atualmente a cair em desuso pois necessita de um maior consumo de energia.



Descrevendo o processo da via seca, a primeira etapa é a extração da matéria-prima que será posteriormente enviada para o triturador de forma a reduzir o tamanho dos fragmentos para apenas alguns centímetros, estando assim concluída a primeira fase de moagem. De seguida, efetua-se a pré homogeneização dos vários materiais; no final desta operação a granulometria dos agregados é inferior a 50 mm e a humidade máxima é de 8%. Posteriormente efetua-se a cozedura no forno e novamente se procede a uma redução granulométrica de forma a obter-se um material muito fino, o clínquer, principal constituinte do cimento. Alguns cimentos podem ainda conter aditivos e adjuvantes de acordo com as propriedades que se desejam para o produto. Por último, efetua-se a embalagem e transporte do mesmo para os vários locais de venda. Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma do fabrico de cimento na qual se verifica todas as fases de produção.



Figura 2 - Processo de fabricação de cimento

### 2.1.3 Características do cimento

Como propriedades do cimento Portland podem referir-se a finura, a presa, a expansibilidade, o endurecimento e o calor de hidratação.

A finura está relacionada com a área de contacto dos grãos de cimento com a água e conclui-se que quanto mais fino for o cimento mais resistente e compacto este se torna. A velocidade

de presa aumenta com a finura, bem como o calor de hidratação, o que se pode referir como um inconveniente.

Por sua vez, presa é o termo utilizado para descrever a solidificação da pasta de cimento, em que o início de presa marca o ponto em que a pasta começa a tornar-se não trabalhável e o fim de presa é o instante em que a pasta de cimento se encontra totalmente rígida. Facilmente se pode perceber a importância deste parâmetro, uma vez que este determina o intervalo de tempo em que a pasta de cimento permite que seja trabalhada. O processo em questão pode ser acelerado ou retardado adicionando substâncias, tais como adjuvantes ou até mesmo aumentando a quantidade de água na amassadura. Pode ainda referir-se que elevadas temperaturas aceleram a presa, enquanto baixas temperaturas a retardam.

## **2.2 Agregados**

Os agregados constituem o esqueleto granular do betão e podem ser usados sob a forma de britas, godos e areias [8]. Os agregados para betão devem ser escolhidos de forma criteriosa e depois proporcionados e misturados, em quantidades a calcular, de forma a obter um produto com as características desejadas .

Os agregados podem ser considerados finos, quando apresentam dimensão superior das partículas menor ou igual a 4 mm, ou grossos, quando apresentam dimensão superior das partículas maior ou igual a 4 mm e dimensão inferior das partículas maior ou igual a 2 mm.

Os agregados usados para betão podem ser de origens naturais, artificiais ou reciclados. Os agregados naturais a mãe natureza encarregou-se de os produzir, produzidos por um processamento mecânico natural, mantendo as superfícies não rugosa. Temos como materiais naturais os godos, as areias do mar, do rio, , de dunas, de depósitos sedimentares ou areeiros. Em relação aos agregados artificiais, todos passam por um processo industrial compreendendo modificações mecânicas e térmicas, como exemplo resultantes da fragmentação mecânica de rochas, a brita, areias ou pó de pedreira.

Outro tipo de agregado utilizado no fabrico de betão são os agregados reciclados, estes resultam do um processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção ou em outras aplicações.

Os agregados normais têm massa volúmica compreendida entre 2000 e 3000 kg/m<sup>3</sup>.

Os agregados leves apresentam massa volúmica menor ou igual que  $2000 \text{ kg/m}^3$  ou uma baridade menor ou igual que  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Os agregados pesados têm massa volúmica maior ou igual que  $3000 \text{ kg/m}^3$ .

As areias, principalmente as de origem natural, podem conter impurezas em quantidades que recomendam a sua não utilização como agregado para argamassas e betões.

Os diferentes constituintes do betão têm realmente coeficientes de dilatação desiguais, resultando fraca resistência às elevações de temperaturas quando os agregados têm coeficientes mais elevados do que a pasta de cimento

A Norma geral do betão NP EN 206-1:2007 [2] remete para as normas NP EN 12620:2002 [9], no caso dos agregados normais e pesados, em relação aos agregados leves despacha para a NP EN 13055-1:2010 [10].

Para a obtenção de um betão com as características desejadas, deve se ter em conta determinados aspetos, os agregados devem ser escolhidos de forma sensata e depois proporcioná-los e misturá-los em quantidades a determinar, de modo a obter o betão desejado.

No que se refere ao agregado com dimensões grandes, este pode ter dificuldades em passar nas armaduras e assim sendo, pode ocorrer que o betão não preencha totalmente o molde, ocasionando a formação de ninhos de brita, logo a dimensão do material agregado não é indiferente Figura 3. A dimensão máxima do agregado deve ser controlada em função da aplicação que o betão vai ter, de maneira que o betão possa ser colocado e compactado à volta das armaduras, sem que ocorra qualquer risco de segregação.

No caso dos agregados preferidos para a produção de betão, a granulometria deve ser de preferência contínua, devendo-se evitar descontinuidade de agregados.

Em regra o  $D_{\text{máx}}$  deve ser inferior a 1,2 vezes no recobrimento nominal ou o espaçamento entre armaduras, tomando-se o valor que for inferior.

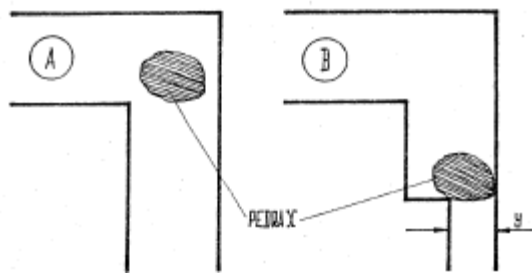


Figura 3 – Máxima dimensão do material agregado [11]

Para além de requisitos relativos à dimensão máxima dos materiais agregados, outras características terão de ser analisadas, tais como a sua forma. Partículas com formas alongadas vão ter tendência a partir sob ação de esforços concentrados. Relativamente à natureza da superfície, o material agregado pode ser rolado ou britado. Se, por um lado, a utilização de materiais rolados, naturais, implica uma aderência menor, face aos materiais britados, por outro, os primeiros exigem uma menor quantidade de água na amassadura. Assim sendo, tendo em consideração estes dois parâmetros (volume de água e aderência), em geral, chega-se à conclusão que é praticamente indiferente utilizar materiais rolados ou artificiais britados porque, não intervindo outros fatores, as resistências do betão não variam muito. No entanto, há que referir que os materiais naturais, como oferecem menor resistência ao atrito, favorecem a trabalhabilidade, mas têm o inconveniente de poderem contribuir para a segregação [11].

É recomendado o uso de rochas sãs e duras, estas não se devem encontrar alteradas pela intempérie, deve ter-se a preocupação de evitar as rochas muito brandas ou porosas, ou com xistosidade elevada, assim como xistos, arenitos pouco duros, rochas com argila ou ricas em mica. Todos estes materiais mencionados a empregar devem ser limpos, com ausência de pó ou de argila pois caso contrario, a resistência à compressão e especialmente à tração e flexão, diminuem de resistência [11].

A presença de pó nos agregados gasta mais água e a ligação da pasta de cimento ao material agregado pode ser obstruída. Na realidade o uso de agregados correntes tem uma pequena percentagem de finos, embora não excessiva, caso contrario se proceda à lavagem do material, poderá ocorrer um decrescimento da compacidade e naturalmente a resistência à compressão também diminuir, isto porque se verifica um aumento do número de vazios no agregado.

As partículas finas são sempre prejudiciais, no que se refere à resistência à tração [3].

Na região do Norte de Portugal, os agregados são normalmente são de origem granítica. Relativamente ao teor de finos, a especificação LNEC E 467:2006 [12] de 2006 estabelece os requisitos de conformidade para agregados grossos, agregados naturais 0/8, agregados de granulometria extensa e agregados finos.

O requisito de conformidade é indicado através da categoria *f*. Por exemplo, para agregados grossos exige-se categoria  $f_4$  (percentagem de passados no peneiro 0,063 mm, em massa, não superior a 4 %). A qualidade dos finos tem que ser verificada. As resistências mecânicas das rochas donde são extraídos os agregados, são necessariamente maiores que a resistência que o betão pode oferecer. Por este motivo, a especificação LNEC E 467:2006 [12] apenas apresenta a resistência à compressão da rocha como requisito para betão de alta resistência (Quadro 2).

Quadro 2 – Características adicionais dos agregados para certas utilizações; Características não estabelecidas na NP EN 12620:2002 [11]

Propriedades	Norma de ensaio	Requisito	Âmbito	Aplicações
Resistência à compressão da rocha (1)	NP EN 1926	$\geq 50$ MPa	Agregados grossos	Betão de alta resistência
Resistência ao esmagamento (1)	NP EN 1039	$\leq 45\%$	Agregados grossos	Betão de alta resistência
Teor de partículas friáveis	NP EN 1380	$\leq 1,0\%$	Agregados finos e naturais 0/8	Betão de alta resistência
		$\leq 0,25\%$	Agregados grossos	
Teor de partículas moles	NP EN E 222	$\leq 5\%$	Agregados grossos	Betão de alta resistência
Teor de álcalis	NP EN 1382	Valor a determinar	Todos os agregados	Betão agregados reativos
Reatividades aos sulfatos	LNEC E 251	Bom Comportamento	Agregados contendo	Betão em contacto com sulfatos

<sup>1</sup> Ambas as determinações avaliar a resistência mecânica dos agregados

Estes materiais britados deverão ser ensaiados ao esmagamento e a fragmentação, estes ensaios indicam a qualidade da pedra qual o seu uso mediante a sua classe.

A norma LNEC E 467:2006 [12] indica que a percentagem da fração fina não deve superar 45% no ensaio de esmagamento, nem 50% no ensaio de fragmentação de Los Angeles (categoria LA50).

A origem dos agregados deve ser tomado em conta para o fabrico do betão, no caso de agregados provenientes do mar temos de verificar a presença do cloreto de sódio junto com o sulfato de magnésio, estes poderão originar o aparecimento de eflorescências o que provoca

as manchas salinas, também estes agentes presentes nos agregados diminuem a velocidade de presa do cimento.

No caso do betão pré-esforçado, os cabos de pré-esforço em contacto com o betão sofrem a corrosão nos varões de aço com a presença do ião cloro, esta corrosão aumenta gradualmente quanto mais elevadas tensões a que os varões estão submetidos.

No caso de obras com um volume elevado de betão pré esforçado, os varões que estão submetidos a elevados esforços de tração, poderão neste caso por em causa a segurança das estruturas, logo as areias, inclusivamente com pequenas quantidades de sais, é de rejeitar.

Outro aspeto a considerar dos materiais com estes tipos de substâncias é a durabilidade dos materiais agregados, estas poderão comprometer por reação química com os constituintes do cimento ou com a água quando em contacto, dando origem a expansões que podem levar á ruína do betão e conseqüentemente da estrutura em causa. A norma do LNEC E 461:2007 [13] apresenta uma metodologia para avaliação da reatividade dos agregados para betão à reação álcalis-sílica Figura 4.

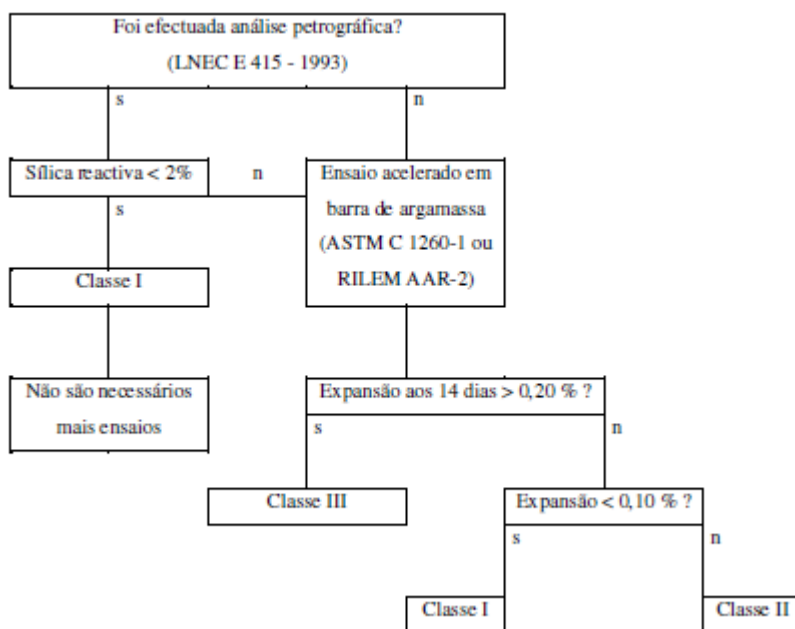


Figura 4 – Metodologia para avaliação da reatividade dos agregados

No caso da produção dos materiais o produtor deve declarar a classe de reatividade dos agregados e escolher a classificação adequada, tal como a seguir se indica:

Classe I – agregado não reativo

Classe II – agregado potencialmente reativo

Classe III – agregado reativo

Alguns tipos de agregados que são utilizados no fabrico de betão já estão identificados como potencialmente reativos aos álcalis, isto é, existe na norma NP EN 12620:2002 [9] a identificação em que engloba os tipos de minerais e de rochas com esse tipo de causa, essa informação está contida no Quadro 3 e Quadro 4 com as rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis.

Quadro 3 – Tipo de rochas e minerais potencialmente reativos aos álcalis [3]

Minerais	Rochas	Principais minerais reativos nas rochas
Opala	Jaspes, Líditos, Ftanitos, Diatomitos, Xistos siliciosos, Filitos	Opala, calcedónia, cherte, quartzo tectonizado
Calcedónia	Grauvacóides	Quartzo tectonizado, chete
Cherte	Corneanas	
Quartzo tectonizado	Quartzitos	
Tridimite	Granitóides	
Cristobalite	Vulcanitos (riolito, dacito, andesito, basalto)	Sílica vítrea
Obsidiana	Calcários	Inclusões siliciosas (cherte)
	Dolomitos	

Quadro 4 – Tipo de rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis [3]

Minerais fornecedores de:		Rochas
potássio	sódio	
		Granitóides
Sanidina		Sieníticas
Ortoclase	Albite	Traquíticas
Microclina	Oligoclase	Corneanas
Leucite	Nefelina	Feldspáticas
Biotite	Sodalite	Leptiníticas
Moscovite		Arcóicas
		Grauvacóides

Outro fator a ter em conta na utilização dos agregados é esforços provocados pela congelação da água. Neste grupo de materiais incluímos todos os agregados de origem das rochas geladiças, como o calcário e o grés.

A normalização sobre este tema prevê dois métodos de ensaio alternativos: a resistência ao gelo-degelo e resistência ao sulfato de magnésio. Os requisitos normalizados são expressos em perdas, em massa, no caso do gelo-degelo não superior a 4% (F<sub>4</sub>) e para o sulfato de magnésio não superior a 35% (MS<sub>35</sub>).

Os sistemas de certificação da conformidade para os agregados e fíleres para betão, argamassa e caldas de injeção, previstos na NP EN 12620:2002 [9], mudam de acordo com os requisitos de segurança. Foi estabelecido o sistema de certificação da conformidade 2+ para utilizações com requisitos de segurança elevados e o sistema 4 para utilizações sem requisitos de segurança elevados.

O sistema de certificação da conformidade 2+ elucida, como critério para a marcação CE, a declaração de conformidade pelo fabricante, com base num certificado de conformidade do controlo interno de produção. O fabricante terá de realizar o controlo interno da produção e o ensaio de amostras, segundo um programa prescrito pela normalização. A certificação do controlo interno de produção terá que ser executada com base numa inspeção inicial e no acompanhamento permanente desse controlo, por parte do Organismo Notificado. O sistema de certificação da conformidade 4 define como base para a marcação CE a declaração de conformidade pelo fabricante, o produtor terá de realizar o controlo interno da produção e ensaios iniciais de tipo.

## **2.3 Água**

As funções da água no betão prendem-se com a reação química com o cimento, hidratando-o, endurecendo, aglomerando os agregados, assegurando a trabalhabilidade do betão, isto é, assegurar que a mistura seja amassada facilmente e colocada em obra sem eminência de segregação.

Nos betões, a água de amassadura é a porção presente durante a amassadura do betão, incluindo humidade natural dos próprios agregados. No fabrico de betões a água de amassadura deve satisfazer as exigências das normas nacionais, caso contrario as regulamentações em vigor no local de aplicação do betão.



Em termos normativos, no que concerne à água de amassadura, a NP EN 206:2007 [2] expede para a NP EN 1008:2003 [14]. A norma NP EN 1008:2003 [14] apresenta a classificação dos tipos de água e a sua aptidão para o fabrico do betão. A água potável, ou a água da rede, é suposto satisfazer os requisitos desta norma, não sendo necessário realizar ensaios. As águas do mar ou as águas salobras normalmente são adequadas para o fabrico de betão simples, mas em geral não são aptas para o fabrico de betão armado ou pré-esforçado.

Esta é apresentada em três condições diferentes no betão:

- Água ligada quimicamente, que realizou a hidratação dos constituintes anidros do cimento;
- Água ligada fisicamente, adsorvida, também designada por água zeolítica ou água de canalização;
- Água no estado livre, que ocupa mais ou menos parcialmente os poros por capilaridade e porosidade [8].

Quando a temperatura alcança pouco além de 100<sup>0</sup>C, ocorre a evaporação da água livre e de uma parte da água ligada fisicamente.

A água não deve conter constituintes prejudiciais, de um modo geral, será a água potável das redes de abastecimento público, esta poderá ser utilizada na amassadura do betão. Outras fontes de fornecimento de água, nomeadamente as águas do mar, águas superficiais, subterrâneas e as águas residuais industriais são consideradas adequadas, no entanto deverá ser efetuado análises antes da sua utilização para a sua validação.

As restantes origens possíveis de fornecimento de água, tais como as de resíduos industriais e domésticos, águas ácidas com pH abaixo de quatro, são de recusar, por possuírem matérias dissolvidas ou em suspensão.

No caso de suscitar dúvidas do estado da água para o fabrico de betões, deverá proceder se uma série de ensaios comparativos, semelhantes aos desenvolvidos nos agregados que têm por base uma análise comparativa com valores padrão pré-estabelecidos.

A água deve ser rejeitada para o fabrico de betões sempre que tenha a presença de óleos e gorduras, resíduos em suspensão, ácidos com pH inferior a 4 e matéria orgânica, detergentes, uma cor mais escura do que o amarelo pálido, cheiro forte diferente do da água potável, que leva a uma cor mais escura do que castanho amarelado.

Na execução dos ensaios químicos, nomeadamente no processo de filtração, devem usar-se filtros de porosidade 0,45  $\mu\text{m}$ . Se o resíduo dissolvido for inferior a 100 mg/l, aceita-se a água. Existem diversos resíduos dissolvidos na água, no qual poderá ser: o NaCl, o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  os açúcares, os fosfatos, os nitratos, o zinco e o chumbo. Se os valores dos sulfatos forem maiores que 2.000 mg/l então rejeita-se a água para o fabrico do betão.

Uma das formas usadas para validar a utilização da água, é efetuar uma serie de ensaios comparativos, produzindo provetes de betão ou argamassa, uns com a água de que suspeitamos e outros com água destilada. A resistência média à compressão dos provetes fabricados, aos 7 dias, confeccionados com a água em estudo de que duvidamos deverá ser pelo menos 90% da resistência média à compressão dos provetes idênticos preparados com água destilada.

Em relação ao tempo de início de presa, adquirido em provetes fabricados com a água em estudo, não deve ser inferior a 1 hora e não deve diferir mais do que 25 % do tempo de início de presa, obtido em provetes fabricados com água destilada, quanto ao tempo de fim de presa este não deve exceder 12 horas e não deve aumentar mais do que 25 % do tempo de fim de presa alcançado em provetes produzidos com água destilada.

No geral a água de amassadura influencia nas propriedades do betão através das substâncias dissolvidas e em suspensão. As substâncias dissolvidas, possivelmente afetam as resistências mecânicas e químicas do betão e das armaduras, em relação às substâncias em suspensão, assim como argila e o silte, podem facilitar o crescimento cristalino dos produtos da hidratação do cimento.

## **2.4 Adjuvantes**

No fabrico de betão é corrente a utilização de adjuvantes, estes tem como finalidade obter uma modificação ou conferir ao betão uma qualidade específica, têm assim como objetivo alterarem o comportamento do betão como também as suas propriedades.

Os adjuvantes são materiais que se adicionam ao fabrico do betão, em pequenas quantidades relativamente com a massa do cimento, estas quantidades a utilizar nunca devem exceder 5% da massa do cimento, estas podem ser adicionadas antes e durante a amassadura do betão com o objetivo de poder alterar as propriedades do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Os adjuvantes são classificados consoante a sua função, existindo uma grande variedade no mercado para tal fim (BASF, Sika ou outros).

O uso dos adjuvantes no fabrico tem como principais objectivos:

- Aperfeiçoar a trabalhabilidade;
- Retardar o tempo de início de presa;
- Acelerar o tempo de início de presa;
- Acelerar o endurecimento nas primeiras idades;
- Aumentar a resistência aos ciclos gelo/degelo;
- Diminuir a permeabilidade;
- Ajudar a bombagem;
- Inibir a corrosão das armaduras;
- Melhorar o acabamento superficial;
- Elevar a compactação.

A utilização de um ou mais de que um adjuvante ao mesmo tempo no fabrico de um betão requer efetuar a verificação da compatibilidade dos adjuvantes, com a realização de ensaios iniciais.

A utilização corrente de adjuvantes no fabrico do betão deverá ter-se o cuidado das dosagens a empregar, quando utilizadas em dosagens erradas poderá provocar efeitos contrários aos pretendidos, podendo diminuir muito a resistência do betão. A mistura de betão no qual será utilizado a pequena quantidade adjuvante, deverá ser homogénea, caso contrário ficamos com uma zona que contém todo o adjuvante e outra sem qualquer adjuvante, originando assim a uma mistura de betão com propriedades heterogéneas

Alguns exemplos adjuvantes:

- Redutor de água/plastificante;
- Redutor de água de alta gama/superplastificantes;
- Retentor de água;
- Introduzidor de ar;
- Acelerador de presa;
- Acelerador de endurecimento;

- Retardador de presa;
- Hidrófugo.

A utilização dos adjuvantes na tecnologia do betão é segundo a NP EN 206-1 [2], a aptidão destes produtos é verificada conforme com a NP EN 934-2 [15].

Os adjuvantes devem conter uma marcação e rotulagem, quando embalados devem ser claramente marcadas com a informação que for relevante, tal como a data do seu fabrico e o prazo de validade do produto recomendado pelo produtor.

Estes produtos tem como requisitos uma mão de obra qualificada, tem de verificar uma compatibilidade química com a mistura, a sua diluição na água deve ser tal como [1/2 água + (1/2 água e adjuvante dissolvido)], quando são adjuvantes líquidos não devem contactar diretamente com o cimento.

## 2.5 Adições

O objetivo das adições no betão é o de melhorar o seu desempenho, aperfeiçoando certas características, por exemplo, aumentando a resistência, dando cor ao betão, diminuindo o calor de hidratação, reduzindo fissuras, entre outros. Assim, podemos chamar adição a tudo o que no betão não seja cimento, agregado, água ou adjuvante.

Material finamente dividido (moído ou não) que pode ser usado no betão com o objetivo de melhorar certas propriedades ou mesmo alcançar propriedades especiais. Estes materiais podem ser classificados como:

Tipo I – Adições quase agregados, p.e. fíller calcário;

Tipo II – Adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, p.e. cinzas volantes, pozolanas, sílica de fumo, escória de alto-forno.

As adições tipo II são produtos inorgânicos que apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença de água, com hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades pozolânicas.

Como exemplos de adições temos a sílica ativa e o metacaulino que aumentam a resistência e diminuem a permeabilidade, entre outros. Estes quando adicionados ao cimento originam uma

diminuição da permeabilidade e da porosidade capilar, aumentando a resistência a sulfatos e reduzindo o calor de hidratação.

As cinzas volantes e as escórias de alto-forno [16] são considerados produtos poluidores, logo a sua utilização na produção do betão como uma adição traz o benefício ambiental, tendo como aplicação um destino para estes resíduos. As adições têm uma vertente económica, uma poupança na matéria-prima que dá origem ao cimento, entre elas o calcário.

A compatibilidade das adições como outros componentes é importante no fabrico do betão, quando se verifique tal situação deverá ser realizado ensaios experimentais, de forma a conferir a sua aplicação.

Neste campo das adições são considerados dois tipos de adições inorgânicas. As adições com características de agregados, tipo I, os fíleres devem estar conformes com a NP EN 12620:2002 [9] e os pigmentos conformes com a NP EN 12878:2005 [17]. Nas adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, tipo II, as cinzas volantes devem estar conformes com a NP EN 450-1:2012 [18] e a sílica de fumo conforme com a NP EN 13263:2009 [19].



### 3 COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO BETÃO

#### 3.1 Classificação

O betão pode ser especificado de duas formas o comportamento especificado ou composição prescrita. Para definir um betão de comportamento especificado é necessário ter como referência a classificação e os requisitos que constam no documento NP EN 206-1:2007 [2].

Quanto à classificação podemos começar pelas classes de exposição relacionadas com ações ambientais como se exemplifica no Quadro 5.

Os exemplos seguintes são unicamente informativos, podendo a seleção das classes de exposição depender das disposições do local de utilização do betão. Na Figura 5 é mostrado as diferentes classes de betão para as diversas zonas interiores e costeiras, exemplificando todos os tipos de betão.



Figura 5 – Classes de exposição de acordo com as zonas em que se aplica determinado tipo de betão [20]

De acordo com normalização das classes de exposição dos betões, esta designa classes para habitação e serviços, como exemplo dessas apresenta-se na Figura 6 os exemplos.

Classes de exposição:  
habitação e serviços

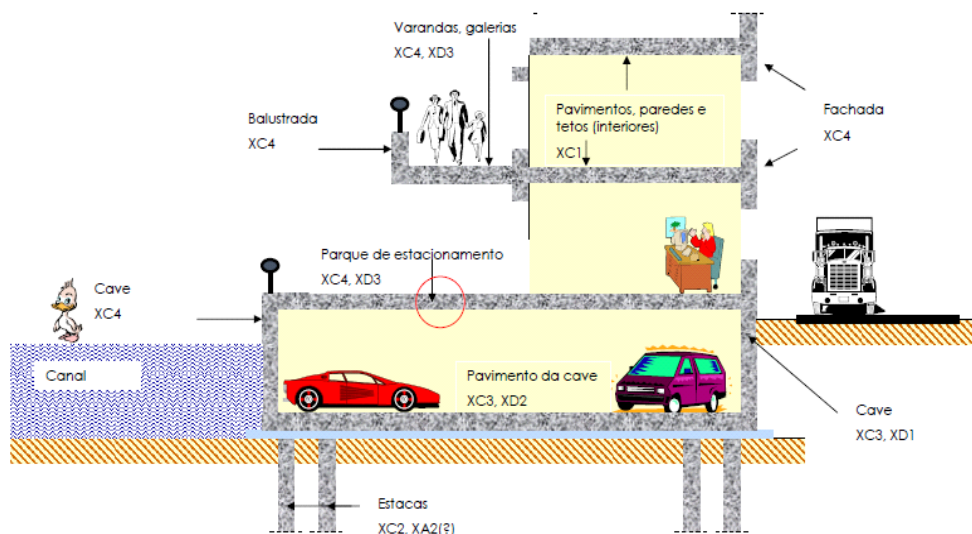


Figura 6 – Classes de exposição para habitações e serviços [20]

Tais como as classes referenciadas anteriormente também classes estipuladas para edifícios comerciais e industriais são semelhantes, embora apresentando algumas variações às anteriores, no qual é exemplificado na Figura 7.

Edifícios comerciais e industriais

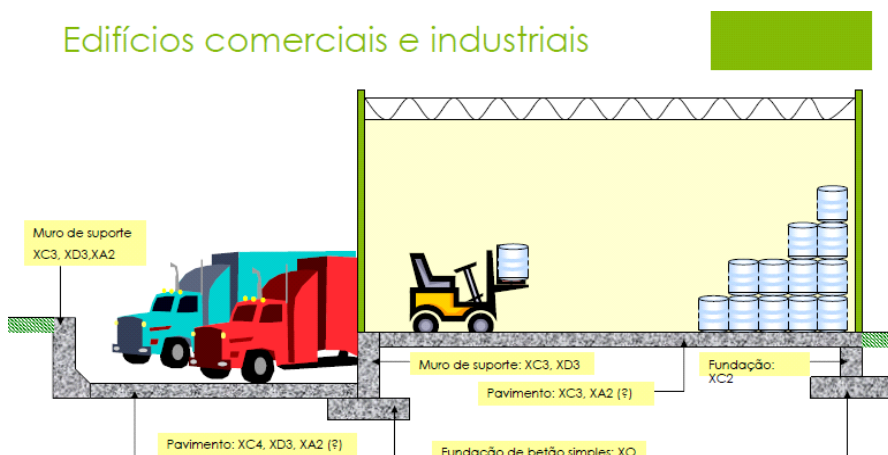


Figura 7 – Tipos de classes de exposição para edifícios comerciais e industriais [20]

As exposição definidas para as obras consideradas especiais, relativamente obras de arte e infraestruturas, são apresentadas na Figura 8.



## Obras de arte e infraestruturas

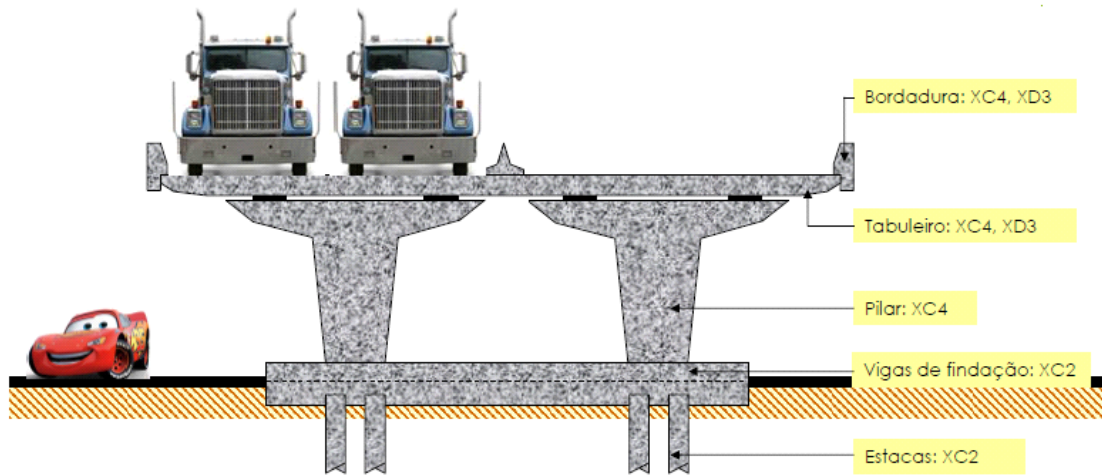


Figura 8 – Tipos de classes de exposição para obras de arte e infraestruturas [20]

Tais como todas as classes apresentadas anteriormente, também foram definidas classes de exposição para obras marítimas. Estas classes são mais específicas, isto devido ao seu grau de exposição perto das costa marítima, isto do que em relação às anteriores.

O betão pode encontrar-se sujeito a mais que uma das ações descritas Quadro 5 ou como se verifica nas figuras anteriores, pelo que as condições ambientais às quais está sujeito podem assim ter que ser expressas como uma combinação de classes de exposição.

Para um dado componente estrutural, diferentes superfícies do betão podem estar sujeitas a ações ambientais diferentes.



Figura 9 – Classes de exposição correntes para obras marítimas [20]

Relativamente a combinação de classes de exposição a LNEC E 462 [21] refere para ter em conta:

- A classe X0 e, em geral, a classe XC1 se aplicam isoladas;
- A carbonatação é um processo comum a todas as estruturas de betão e a ação dos cloretos ou os ataques químico e por gelo/degelo são específicos de certos ambientes;
- Na orla marítima (classes XS) o número de dias com temperaturas negativas (onde se poderiam aplicar as classes XF) é despidiendo--, enquanto no interior, nomeadamente nas zonas com um total de 30 ou mais dias com temperaturas negativas pode haver combinação das classes XF2 com a XD (embora esta classe seja pouco frequente em Portugal);
- O ataque químico ao betão de fundações, obras de suporte de terras ou pavimentos em contacto com solos dá-se em solos agressivos ou em águas agressivas com nível freático atingindo as fundações e o betão de superestruturas de reservatórios ou condutas por ação de águas agressivas.

Quadro 5 – Classes de exposição

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativo onde podem ocorrer as classes de exposição
1 - Sem risco de corrosão ou ataque		
X0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Para betão não armado e sem metais embebidos: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico.</li> <li>Para betão armado ou com metais embebidos: ambiente muito seco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar.</li> </ul>

Quadro 5 – Classes de exposição (Continuação)

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
2 - Corrosão induzida por carbonatário		
<p>Quando o betão, armado ou contendo outros metais embebidos, se encontrar exposto ao ar e à humidade, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:            Nota: as condições de humidade são as do betão de recobrimento das armaduras ou de outros metais embebidos, mas, em muitos casos, as condições deste betão podem considerar-se semelhantes às condições de humidade do ambiente circunvizinho. Nestes casos, pode ser adequada a classificação do ambiente circunvizinho. Tal pode não ser aplicável, caso exista uma barreira entre o betão e o seu ambiente.</p>		
XC1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seco ou permanentemente húmido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar;</li> <li>Betão permanentemente submerso em água.</li> </ul>
XC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Húmido, raramente seco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies de betão sujeitam a longos períodos de contacto com água;</li> <li>Muitas fundações.</li> </ul>
XC3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moderadamente húmido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar;</li> <li>Betão no exterior protegido da chuva.</li> </ul>
XC4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciclicamente húmido e seco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies de betão sujeitadas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2.</li> </ul>

Quadro 5 – Classes de exposição (Continuação)

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
3 - Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
<p>Quando o betão armado ou contendo outros materiais embebidos se encontrar em contacto com a água, que não água do mar, contendo cloretos, incluindo sais descongelantes, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:            NOTA: No que respeita às condições de humidade ver também a secção 2 deste Quadro</p>		
XD1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moderadamente húmido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar</li> </ul>
XD2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Húmido, raramente seca</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Piscinas;</li> <li>Betão exposto a águas industriais contendo cloretos</li> </ul>
XD3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciclicamente húmido e seco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento de automóveis</li> </ul>

Quadro 5 – Classes de exposição (Continuação)

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
4 - Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
Quando o betão, armado ou contendo outros materiais embebidos, se encontrar em contacto com cloretos provenientes da água do mar ou exposto ao ar transportando sais marinhos, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:		
XS1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com a água do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade</li> </ul>
XS2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Submerso permanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Partes de estruturas marítimas</li> </ul>
XS3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Partes de estruturas marítimas</li> </ul>

Quadro 5 – Classes de exposição (Continuação)

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
5 - Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelastes		
Quando o betão, enquanto húmido, se encontrar exposto a um significativo ataque por ciclos de gelo/degelo, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:		
XF1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelastes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo</li> </ul>
XF2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moderadamente saturado de água, com produtos descongelastes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelados transportados pelo ar</li> </ul>
XF3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortemente saturado, sem produtos descongelastes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo</li> </ul>
XF4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortemente saturado, com produtos descongelastes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelastes;</li> </ul>

Quadro 5 – Classes de exposição (Continuação)

Designação das classes	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
6 - Ataque químico		
Quando o betão se encontrar exposto ao ataque químico proveniente dos solos naturais e de águas subterrâneas, conforme indicado no Quadro 20, a exposição ambiental deve ser classificada como estabelecido abaixo. A classificação da água do mar depende da localização geográfica, aplicando-se assim a classificação válida no local de utilização do betão. NOTA: Pode ser necessário um estudo especial para estabelecer as condições de exposição relevantes quando há: -valores fora de limite do Quadro 20; -outros agentes químicos agressivos; -água ou solos poluídos quimicamente; -grande velocidade de água em conjunto com os agentes químicos do Quadro 20.		
XA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligeiramente agressivo, de acordo com a Quadro 20</li> </ul>	-
XA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moderadamente agressivo, de acordo com a Quadro 20</li> </ul>	-
XA3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortemente agressivo, de acordo com a Quadro 20</li> </ul>	-

Quadro 6 - Combinações de classes de exposição

XC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• XD2</li> <li>• XS2 + ataque da água do mar (XA1)</li> <li>• XF1</li> <li>• XA1, XA2 ou XA3</li> </ul>
XC3 ou XC4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• XF1</li> <li>• XD1 + XF2</li> <li>• XS1</li> <li>• XD3</li> <li>• XS3 + ataque da água do mar (XA1)</li> </ul>
XC4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• XA1</li> <li>• XA2</li> <li>• XA3</li> </ul>

Assim, as combinações de classes de exposição mais frequentes são as do Quadro 6. Em cada combinação de classes de exposição ambiental devem ser satisfeitas, para o cimento (ou para a correspondente mistura) a utilizar e como requisitos da combinação, os valores prescritivos mais exigentes da mínima dosagem de cimento, da máxima razão água/cimento (e do teor de ar se for o caso) e da classe de resistência entre os valores de cada uma das classes de exposição ambiental da combinação. No caso de o cimento não ser comum às diferentes classes de exposição prevalece aquele que satisfizer a classe com os requisitos mais exigentes.

Quando a consistência do betão for classificada, aplicam-se os Quadro 8, Quadro 9, Quadro 10 ou Quadro 11. As classes de consistência dos Quadro 8 a Quadro 11 não são diretamente relacionáveis.

**Quadro 7 - Valores limite das classes de exposição para o ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidos**

Os ambientes com agressividade química, abaixo classificados, têm como base o solo e a água contida, com temperaturas do solo ou da água entre os 5°C e os 25°C e com velocidades da água suficientemente lentas que possam ser consideradas próximas das condições estáticas. A classe é determinada pelo valor mais elevado para qualquer característica química. Quando duas ou mais características agressivas conduzirem à mesma classe, o ambiente deve ser classificado na classe imediatamente superior, a menos que um estudo especial para este caso específico prove que não é necessário.

Águas				
Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	EN 196-2	≥ 200 e ≤ 600	> 600 e ≤ 3000	> 3000 e ≤ 6000
pH	ISO 4316	≥ 5,5 e ≤ 6,5	≥ 4,5 e < 5,5	≥ 4,0 e < 4,5
CO <sub>2</sub> agressivo mg/l	EN 13577:1999	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 Até à saturação
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	ISO 7980	≥300 e ≤1000	>1000 e ≤3000	>3000 Até à saturação
Solos				
Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> total <sup>a)</sup> mg/kg	EN 196-2 <sup>b)</sup>	≥2000 e ≤3000 <sup>c)</sup>	>3000 <sup>c)</sup> e ≤12000	>12000 e ≤24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	>200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

- a) Os solos argilosos com uma permeabilidade abaixo de 10<sup>-5</sup> m/s podem ser colocados numa classe mais baixa.
- b) O método de ensaio prescreve a extração do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> através de ácido clorídrico; em alternativa, pode usar-se a extração aquosa, se houver experiência no local de utilização do betão.
- c) O limite de 3000 mg/kg deve ser reduzido para 2000 mg/kg, caso exista de acumulação de iões sulfato no betão devido a ciclos de secagem e molhagem ou à absorção capilar.

**Quadro 8 - Classes de abaixamento**

Classe	Abaixamento em mm
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Quadro 9 - Classes Vêbê

Classe	Tempo ensaio do Vêbê teste (s)
V0	$\geq 31$
V1	30 a 21
V2	20 a 11
V3	10 a 6
V4	5 a 3

Quadro 10 - Classes de compactação

Classe	Grau de compatibilidade
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 a 1,26
C2	1,25 a 1,11
C3	1,10 a 1,04
C4	$< 1,04$

a) Aplica-se somente ao betão leve

Quadro 11 - Classes de espelhamento

Classe	Diâmetro de espalhamento em mm
F1	$\leq 340$
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 550
F5	560 a 620
F6	$\geq 630$

Quando o betão for classificado em relação à máxima dimensão do agregado, deve usar-se para a classificação a máxima dimensão do agregado mais grosso ( $D_{max}$ ) do betão.

Quando o betão for classificado em relação à sua resistência à compressão, aplica-se o Quadro 12 para betão de massa volúmica normal e betão pesado ou o Quadro 13 para o betão leve. Para a classificação utiliza-se a resistência característica aos 28 dias obtida a partir de provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura ( $f_{ck,cyl}$ ) ou a partir de provetes cúbicos de 150 mm de aresta ( $f_{ck,cube}$ ). O valor característico é o valor que é alcançado com 95% de probabilidade.

Quadro 12 - Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal e para betão pesado

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Quadro 13 - Classes de resistência à compressão para betão leve

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência característica mínima em cubos <sup>a)</sup> $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

<sup>a)</sup> Podem ser usados outros valores, desde que a relação entre estes e a resistência dos cilindros de referência esteja estabelecida com suficiente exatidão e esteja documentada.

Quando o betão leve for classificado em relação à sua massa volúmica, aplica-se o Quadro 14.

A massa volúmica do betão pode também ser especificada através de um valor pretendido



Quadro 14 - Classes de massa volúmica do betão leve

Classe de massa volúmica	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	≥ 800 e ≤ 1000	> 1000 e ≤ 1200	> 1200 e ≤ 1400	> 1400 e ≤ 1600	> 1600 e ≤ 1800	> 1800 e ≤ 2000

NOTA: A massa volúmica do betão leve pode também ser especificada através de um valor pretendido.

### 3.2 Requisito para a composição do betão

A composição do betão e os materiais constituintes para betões de comportamento especificado ou de composição prescrita devem ser escolhidos de forma a satisfazer os requisitos especificados para o betão fresco e endurecido, incluindo a consistência, massa volúmica, resistência, durabilidade, proteção contra a corrosão do aço embebido, tendo em conta o processo de produção e o método previsto para a execução das obras em betão.

O betão deve ser formulado de forma a minimizar a segregação e a exsudação do betão fresco, a menos que seja especificado o contrário. As propriedades requeridas ao betão na estrutura são geralmente alcançadas se no local de utilização forem cumpridos certos procedimentos na aplicação do betão fresco. Assim, para além dos requisitos NP EN 206-1:2007 [2], os requisitos para o transporte, colocação, compactação, cura e qualquer outro tratamento adicional deverão ser levados em conta antes do betão ser especificado a norma NP EN 13670-1:2011 [22]. Muitos destes requisitos são com frequência interdependentes. Se todos estes requisitos forem satisfeitos, qualquer diferença na qualidade do betão, entre o betão da estrutura e o dos provetes de ensaio normalizados, será adequadamente coberta pelo fator de segurança parcial do material.

O cimento deve ser selecionado entre os que têm aptidão estabelecida, tendo em conta:

- A execução da obra;
- A utilização final do betão;
- As condições de cura (p.e., tratamento com calor);
- As dimensões da estrutura (desenvolvimento de calor);
- As condições ambientais às quais a estrutura ficará exposta;
- A reatividade potencial dos agregados com os álcalis dos constituintes.

O tipo de agregado, a granulometria e as categorias, p. e. achatamento, resistência ao gelo/degelo, resistência à abrasão, teor de finos, devem ser selecionados tendo em conta:

- A execução da obra;
- A utilização final do betão;
- As condições ambientais às quais o betão ficará exposto;
- Quaisquer requisitos para agregados à vista ou para agregados em betão com acabamento especial.

A máxima dimensão do agregado mais grosso ( $D_{max}$ ) deve ser escolhida tendo em conta a espessura de recobrimento das armaduras e a largura mínima da secção. Os agregados de granulometria extensa só devem ser usados em betões com classes de resistência à compressão  $\leq C12/15$ .

Os agregados recuperados da água de lavagem ou do betão fresco podem ser usados como agregados para betão. Os agregados recuperados não separados em frações não devem ser utilizados em quantidades superiores a 5 % do total dos agregados. Quando a quantidade dos agregados recuperados for superior a 5 %, eles devem ser do mesmo tipo do agregado principal, ser separados numa fração grossa e numa fração fina e conformes com a NP EN 12620:2002 [9].

A água recuperada da produção do betão deve ser utilizada de acordo com as condições especificadas na NP EN 1008:2003 [14].

As quantidades das adições do tipo I e do tipo II a utilizar no betão devem ser objeto de ensaios iniciais. Os ensaios iniciais devem demonstrar que um betão satisfaz todos os requisitos especificados para o betão fresco e endurecido. Quando o produtor ou o especificador puder demonstrar que uma composição é adequada com base em resultados de ensaios prévios ou experiência de longa duração, tal pode ser considerado como uma alternativa aos ensaios iniciais.

Os ensaios iniciais devem ser da responsabilidade do produtor no caso do betão de comportamento especificado, do especificador no caso do betão de composição prescrita e do organismo de normalização no caso do betão de composição prescrita em norma. Os ensaios

iniciais devem ser executados antes da utilização de um novo betão ou de uma nova família de betões. Os ensaios iniciais devem ser repetidos se houver uma alteração significativa nos materiais constituintes ou nos requisitos especificados nos quais se basearam os ensaios prévios.

Em geral, os ensaios iniciais devem ser executados sobre betão fresco com uma temperatura entre 15 °C e 22 °C. Para os ensaios iniciais de um dado betão, devem ser feitas pelo menos três amassaduras e ensaiados pelo menos três provetes de cada uma delas. Quando forem efetuados ensaios iniciais para uma família de betões, o número de betões a amostrar deve abranger a gama de composições da família. Neste caso, pode efetuar-se apenas uma amassadura por betão.

A resistência de uma amassadura ou carga deve ser a média dos resultados dos ensaios dos respetivos provetes. O resultado do ensaio inicial do betão é a média das resistências das amassaduras ou cargas.

A aptidão de uma dada mistura para ser constituinte do betão ficou estabelecida na especificação LNEC E 462 [21], desde que sejam satisfeitas simultaneamente as seguintes condições:

- O cimento seja do tipo CEM I ou CEM II/A e da classe de resistência 42,5 ou superior;
- As adições sejam do tipo I de origem calcária e satisfazendo a especificação LNEC E 466:2005 [12] ou do tipo II;
- A composição da mistura satisfaça os limites estabelecidos para a composição de um dos cimentos definidos na NP EN 197-1:2001 [5];
- A proporção de sílica de fumo em relação ao clínquer (se ela existir na composição da mistura) seja igual ou inferior a 11 %.

Os cimentos e as misturas constituem ligantes hidráulicos que se designam apenas por ligantes. Se na composição do betão for utilizada uma mistura com aptidão para constituinte do betão, os termos “dosagem de cimento” e “razão água/cimento” devem ser substituídos pelos termos “dosagem de ligante” e “razão água/ligante”.

O conceito do fator-k permite ter em conta as adições do tipo II:

- Na substituição do termo “razão água/cimento” por “razão água/ (cimento + adição) ”;
- No requisito da dosagem mínima de cimento.

A aptidão do conceito do fator-k encontra-se estabelecida na NP EN 206-1:2007 [2] para as cinzas volantes e para a sílica de fumo.

Para o projetista duma obra de betão poder estabelecer as disposições relativas à resistência às ações ambientais exigidas nos requisitos fundamentais da especificação do betão, este deve primeiro fixar a vida útil da obra de acordo com o estabelecido no Quadro 15, se o dono de obra o não tiver já feito.

Quadro 15 - Categorias de vida útil

Vida útil das obras		Exemplos
Categoria	Anos	
1	10	Estruturas temporárias
2	10 a 25	Partes estruturais substituíveis, por exemplo, apoios
3	15 a 30	Estruturas para a agricultura e semelhantes
4	50	Edifícios e outras estruturas comuns (, por exemplo, hospitais, escolas)
5	100	Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil

A especificação estabelece prescrições específicas para que as estruturas de betão tenham uma vida útil de projeto de 50 ou de 100 anos e prescrições gerais, qualquer que seja a vida útil. Em substituição dos valores limites para a composição e resistência do betão indicados no Anexo F da NP EN 206-1:2007 [2] com carácter informativo, estabelecem-se nos quando há risco de corrosão das armaduras e nos Quadro 18 e 19 quando há gelo / degelo ou ataque químico, respetivamente, os valores da máxima razão água/cimento, da mínima dosagem de cimento e da mínima classe de resistência à compressão simples que o betão deve satisfazer para que o tempo de vida útil das estruturas de betão, sob as ações ambientais, seja de 50 anos.

Quadro 16 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob Ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos

Tipo de cimento	CEM I (r referência); CEM II/A <sup>(1)</sup>				CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM III/A <sup>(2)</sup> ; CEM IV <sup>(2)</sup> ; CEM V/A <sup>(2)</sup>			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Mínimo recobrimento nominal (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima razão água/cimento	0,65	0,65	0,6	0,6	0,65	0,65	0,55	0,55
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	240	240	280	280	260	260	300	300
	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Mínima classe de resistência	LC25/28	LC25/28	LC30/33	LC30/33	LC25/28	LC25/28	LC30/33	LC30/33

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L, II/B-LL.

Quadro 17 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A <sup>(1)</sup>		
	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Mínimo recobrimento nominal (mm)	45	50	55	45	50	55
Máxima razão água/cimento	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,4
Mínima dosagem de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	340	360	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50	C40/50	C50/60
	LC30/33	LC30/33	LC35/38	LC40/44	LC40/44	LC50/55

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L, II/B-LL.

Quadro 18 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos

Tipo de cimento	CEM I (referência); CEM II/A <sup>(1)</sup>		CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM III/A <sup>(2)</sup> ; CEM IV <sup>(2)</sup> ; CEM V/A <sup>(2)</sup>	
	XF1	XF2	XF1	XF2
Máxima razão água/cimento	0,6	0,55	0,55	0,5
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	280	280	300	300
Mínima classe de resistência	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
	LC30/33	LC30/33	LC30/33	LC30/33
Teor mínimo de ar (%)	-	4	-	4

(1)-Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.

(2)-Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.

Indicam-se também nos Quadro 16 a Quadro 19 os tipos de cimento que se podem utilizar e, nos casos das classes de exposição XC e XS, Quadro 16 e respetivamente, os valores mínimos do recobrimento nominal (a especificar no projeto e a garantir na obra pelo utilizador do betão) que, conjuntamente com os requisitos do betão, permitem esperar que, em cada classe de exposição XC ou XS, fique garantida a vida útil de projeto de 50 anos. O Anexo B da especificação LNEC E 462:2004 [21] apresenta os requisitos que possibilitam a redução dos recobrimentos fixados. Está prevista a redução no caso de utilização de aços inox, certas classes de resistência do betão, revestimento do aço com resinas epoxídicas e revestimento por pintura do betão.

Para um tempo de vida útil de 100 anos, os requisitos dos Quadro 16 e Quadro 19 devem ter as seguintes alterações:

- Os betões armados ou pré-esforçados sujeitos à ação do dióxido de carbono ou dos cloretos, o valor do recobrimento nominal dos Quadro 16 e
- Quadro 17 é aumentado de 10 mm, mantendo-se os requisitos exigidos ao betão nestes Quadros;

Nos betões sujeitos à Ação do gelo-degelo ou ao ataque químico,

Quadro 18 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos

- e Quadro 19, a máxima razão água/cimento é diminuída de 0,05, a mínima dosagem de cimento é aumentada de 20 kg/m<sup>3</sup> e a classe de resistência à compressão simples é aumentada de 2 classes.

Quadro 19 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM II/A-D					
	CEM I; CEM II/A <sup>(1)</sup>					
Classe de exposição	XA1	XA2 <sup>(2)</sup>	XA3 <sup>(2)</sup>	XA1	XA2 <sup>(2)</sup>	XA3 <sup>(2)</sup>
Máxima razão água/cimento	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	320	340	360	340	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45	C40/50	C40/50
	LC30/33	LC35/38	LC35/38	LC35/38	LC40/44	LC40/44

- Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.
- Quando a agressividade resultar da presença de sulfatos, os cimentos devem satisfazer os requisitos mencionados na secção 5.3 da especificação LNEC 464 de 2005, nomeadamente no Quadro 16 aplicando-se ao betão as exigências estabelecidas neste quadro para o CEM IV.

Para a classe X0 deve aplicar-se o estabelecido no Anexo F da norma NP EN 197-1:2001 [5] mínima classe de resistência C12/15, independentemente da vida útil da estrutura, podendo usar-se qualquer cimento (excepto CEM II/T e CEM II/W) ou mistura.

As dosagens de cimento (ou da correspondente mistura), C, indicadas nos Quadros 16 a 21 respeitam a betões com máxima dimensão do agregado mais grosso, D<sub>max</sub>, igual ou maior que 20 mm. Para betões com menores valores de D<sub>max</sub> as dosagens devem ser as seguintes:

para 20 mm > D<sub>max</sub> ≥ 12,5 mm: C<sub>20/12,5</sub> = 1,10 C

para 12,5 mm > D<sub>max</sub> > 4 mm: C<sub>12,5/4</sub> = 1,23 C

Quando a agressividade química provier da ação dos sulfatos, presentes na água ou nos solos em contacto com o betão, a composição do clínquer dos cimentos ou das correspondentes misturas deve satisfazer os limites indicados no Quadro 21.

Quadro 20 - Composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos

Tipo de cimento		CEM I (1)	CEM II (2)	CEM III, IV, V (3)
Teor de C <sub>3</sub> A	XA2	≤ 5%	≤ 8%	≤ 10%
	XA3	≤ 5%	≤ 6%	≤ 8%
Teor de (C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)		≤ 20%		≤ 25%

(1)Aplicável também aos cimentos CEM II/A-L, II/A-LL e II/A-M.

(2)Só aplicável aos cimentos CEM II/S, II/D, II/P e II/V.

(3)Só exigível aos cimentos CEM III/A, IV/A e V/A.

Poderão utilizar-se cimentos (ou misturas) não respeitando os valores Quadro 20 se os cimentos (ou as misturas) satisfizerem o estabelecido na especificação LNEC E 462:2004 [21] após a realização do ensaio de resistência aos sulfatos nela prevista.

Os cimentos Portland não resistem a meios ácidos cujo pH seja inferior a 4, pelo que têm que ser protegidos do contacto com estes meios através dum revestimento por pintura satisfazendo os requisitos previstos na NP EN 1504-2:2006 [24] para o princípio P6 – Resistência aos produtos químicos. Esta proteção deve também existir sempre que o teor de qualquer dos elementos agressivos referidos no Quadro 7 seja superior ao limite indicado para a classe XA3.

Quando for utilizada uma combinação de uma adição específica com um cimento específico, para os quais a origem de produção e as suas características se encontram claramente definidas e documentadas, o conceito de desempenho equivalente do betão permite alterações aos requisitos da NP EN 206-1:2007 [2] e da especificação LNEC E 464:2005 [25]. Deve ser demonstrado que, especialmente no que respeita à sua reação às ações ambientais e à sua durabilidade, o betão tem um desempenho equivalente ao de um betão de referência que satisfaça os requisitos para a classe de exposição relevante. Quando o betão é produzido de acordo com estes procedimentos, deve ser sujeito a uma avaliação contínua que tenha em conta as variações no cimento e na adição.

Os ensaios deverão evidenciar que o desempenho do betão que contém a adição seja, pelo menos, equivalente ao do betão de referência. Este deverá:

Conter um cimento conforme com a NP EN 197-1:2001/A 1:2005 [5] o mesmo tipo e tendo os constituintes correspondentes à combinação do cimento e da adição; estar conforme com os requisitos para a classe de exposição relevante.



Quando não existir nenhum cimento correspondente disponível, deverá ser utilizado um cimento CEM I.

A aptidão do conceito de desempenho equivalente dum betão em relação à resistência à carbonatação ou à penetração dos cloretos é estabelecida na especificação LNEC E 464:2005 [25]. Sobre uma composição de referência que satisfaça as exigências limite de composição e de resistência mecânica estabelecidas nos Quadro 16 e para a classe de exposição objeto do estudo de equivalência, e com o cimento de referência indicado para esta classe nestes Quadros, são determinadas as propriedades referidas no Quadro 21 para esta classe de exposição.

Procede-se de igual modo com a composição de estudo, ou seja com a formulação cujo desempenho se pretende avaliar. Os resultados obtidos na composição de referência são depois comparados com os correspondentes valores da composição de estudo e extraídas conclusões sobre a equivalência de comportamento das duas composições no que respeita à resistência à penetração do dióxido de carbono ou dos cloretos no betão.

Pode-se também concluir sobre a equivalência da dosagem do ligante específico e da razão água/cimento usadas na composição de estudo, relativamente ao correspondente par de valores usado para o betão de referência. Neste caso, e se os resultados concluírem sobre a equivalência da composição de estudo, o fabricante de betão fica autorizado a usar o novo valor mínimo da dosagem de ligante e o novo valor máximo da razão água/cimento, como limites de composição para satisfazer as exigências da classe de exposição considerada, desde que os constituintes do ligante não se alterem, tanto no que se refere à sua origem como às suas características relevantes.

Quadro 21 - Propriedades, métodos e provetes de ensaio

Classe de exposição	Propriedades a determinar	Método de ensaio	Número e tipo de provetes (mm)
XC1	Carbonatação acelerada	LNEC E 391	1 Proвете 150 x 150 x 600
XC2	Permeabilidade ao oxigénio	LNEC E 392	3 Provetes
XC3			Φ 150; h=50
XC4	Resistência à compressão	NP EN 12390-3	3 Provetes de 150 x 150 x 150
XS1/XD1	Coefficiente de difusão dos cloretos	LNEC E 463	2 Provetes Φ 100; h=50
XS2/XD2	Absorção capilar	LNEC E 393	3 Provetes Φ 150; h=50
XS3/XD3	Resistência à compressão	NP EN 12390-3	3 Provetes de 150 x 150 x 150

Como os provetes de betão são ensaiados em condições higrométricas normalizadas, não coincidentes, em geral, com as condições de humidade relativa implícitas nas classes de exposição, admite-se que a equivalência de comportamento das duas composições se mantém em outras condições higrométricas.

Para cada propriedade determinada, deve ser calculada a média dos valores obtidos nos provetes de cada composição principal ou secundária, bem como a média global das diferentes de referência e das diferentes composições de estudo. Cada propriedade das composições de estudo deve apresentar uma média global igual ou inferior à média global das composições de referência, com exceção da resistência à compressão, em que a média global das composições de estudo deve ser igual ou superior à média global das composições de referência.

Em simultâneo, entre cada composição de estudo, principal ou secundária, e a correspondente composição de referência devem verificar-se, quando aplicáveis, as seguintes relações:

- Profundidade de carbonatação acelerada, PCA:

$$\frac{PCA_{\text{estudo}}}{PCA_{\text{referência}}} \leq 1,3 \quad (3.1)$$

- Absorção capilar, AC:

$$\frac{AC_{\text{estudo}}}{AC_{\text{referência}}} \leq 1,3 \quad (3.2)$$

- Permeabilidade ao oxigénio, K:

$$\frac{K_{\text{estudo}}}{K_{\text{referência}}} \leq 2,0 \quad (3.3)$$

- Coeficiente de difusão dos cloretos, D:

$$\frac{D_{\text{estudo}}}{D_{\text{referência}}} \leq 2,0 \quad (3.4)$$

- Resistência à compressão,  $f_c$ :

$$\frac{f_{c,\text{referência}}}{f_{c,\text{estudo}}} \leq 1,1 \quad (3.5)$$

No relatório final devem apresentar-se as composições ensaiadas, os ensaios realizados e os resultados obtidos. A análise dos resultados deve concluir sobre a equivalência do desempenho da composição de estudo relativamente à composição de referência.

Os requisitos relacionados com as classes de exposição podem ser estabelecidos utilizando métodos de especificação do betão baseados no desempenho que considerem a durabilidade e ser especificados em termos de parâmetros relacionados com o desempenho, p.e., degradação do betão num ensaio ao gelo-degelo.

O método baseado no desempenho considera, de forma quantitativa, cada mecanismo de degradação relevante, o tempo de vida útil do elemento ou da estrutura e os critérios que definem o fim deste tempo de vida útil. Tal método pode basear-se em experiências bem-sucedidas com práticas locais em ambientes locais, em resultados obtidos com um método de ensaio de desempenho que se encontre estabelecido para o mecanismo de degradação relevante ou na utilização de modelos de previsão comprovados.

A metodologia para determinação das propriedades de desempenho do betão que permitam satisfazer a vida útil pretendida de estruturas de betão armado e pré-esforçado sob ações

ambientais que provocam a corrosão das armaduras é apresentada na especificação LNEC E 465:2007 [21].

A quantidade total de adjuvantes, se utilizados, não deve exceder a dosagem máxima recomendada pelo produtor nem ultrapassar 50 g de adjuvantes (como fornecidos) por kg de cimento, a menos que a influência de uma maior dosagem no desempenho e na durabilidade do betão se encontre estabelecida. O uso de adjuvantes em quantidades inferiores a 2 g/kg de cimento só é permitido se estes forem dispersos numa parte da água de amassadura.

Se a quantidade total de adjuvantes líquidos exceder 3 l/m<sup>3</sup> de betão, o seu teor de água deve ser considerado no cálculo da razão água/cimento. Quando for usado mais do que um adjuvante, a sua compatibilidade deve ser verificada quando da realização dos ensaios iniciais. Os betões com consistência  $\geq$  S4, V4, C3 ou F4 deverão ser fabricados com recurso a adjuvantes superplastificantes.

O teor de cloretos de um betão expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento, não deve exceder o valor dado no Quadro 22 para a classe seleccionada. O cloreto de cálcio e os adjuvantes à base de cloretos não devem ser adicionados ao betão com armaduras de aço, aço de pré-esforço ou com qualquer tipo de metal embebido.

As classes de teor de cloretos do betão aplicáveis em Portugal são definidas no Quadro 23 em função da classe de exposição ambiental.

Para a determinação do teor de cloretos de um betão deve calcular-se a soma das contribuições dos materiais constituintes, usando um, ou uma combinação, dos seguintes métodos:

- Cálculo baseado, para cada um dos materiais constituintes, no teor máximo de cloretos permitido na respetiva norma ou no teor declarado pelo produtor;
- Cálculo baseado, para cada um dos materiais constituintes, no teor de cloretos calculado mensalmente a partir das últimas 25 determinações mais 1,64 vezes o respetivo desvio-padrão.

Quadro 22 - Máximo teor de cloretos do betão

Utilização do betão	Classe de teor de cloretos <sup>a)</sup>	Máximo teor de CL <sup>-</sup> por massa de cimento <sup>b)</sup>
Sem armaduras de aço ou outros materiais embebidos, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	C1 1,0	1,00%
Com armaduras de aço ou outros metais embebidos	C1 0,20	0,20%
	C1 0,40	0,40%
Com aço de pré-esforço	C1 0,10	0,10%
	C1 0,20	0,20%

Quadro 23 - Classes de teor de cloretos do betão

Utilização do betão	Classes de exposição ambiental	
	XC, XF, XA	XS, XD
Betão sem armaduras de aço ou outros materiais embebidos, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	C1 1,0	C1 1,0
Betão com armaduras de aço ou outros materiais embebidos	C1 0,4 <sup>(1)</sup>	C1 0,2 <sup>(1)</sup>
Betão com armaduras pré-esforçadas	C1 0,2 <sup>(1)</sup>	C1 0,1 <sup>(1)</sup>

(1) Estas classes podem deixar de se aplicar se forem tomadas medidas especiais de proteção contra a corrosão, como proteção do betão ou recobrimentos, devidamente justificados, ou utilização de aço inox.

Este último método é particularmente aplicável a agregados dragados do mar e para aqueles casos onde não existe um valor máximo declarado ou normalizado.

A temperatura do betão fresco não deve ser inferior a 5 °C na altura da entrega. Qualquer requisito relativo ao arrefecimento ou ao aquecimento artificial do betão antes da entrega deve ser acordado entre o produtor e o utilizador.

### 3.3 Especificação do betão

O especificador do betão deve assegurar que todos os requisitos relevantes, referentes às propriedades do betão, se encontram na especificação fornecida ao produtor. O especificador deve também especificar todo e qualquer requisito para as propriedades do betão que sejam necessárias para o transporte após entrega, para a colocação, compactação, cura ou outro tratamento adicional. Quando necessário, a especificação deve incluir qualquer requisito especial (p. e., para a obtenção de um acabamento arquitetónico).

O especificador deve ter em consideração o seguinte:

- A utilização do betão fresco e endurecido;
- As condições de cura;

- As dimensões da estrutura (desenvolvimento de calor);
- As ações ambientais às quais a estrutura ficará exposta;
- Qualquer requisito para agregados expostos ou acabamento superficial;
- Qualquer requisito relacionado com o recobrimento das armaduras ou com a largura mínima da secção, p. e. máxima dimensão do agregado mais grosso;
- Quaisquer restrições à utilização de materiais constituintes com aptidão estabelecida, p. e., resultante das classes de exposição.

A especificação do betão de comportamento especificado deve ser feita por intermédio dos requisitos fundamentais, a indicar em todos os casos e dos requisitos adicionais, a indicar quando requeridos.

Como requisitos fundamentais a especificação deve incluir:

- Um requisito de conformidade com a NP EN 206-1:2007 [2];
- Classe de resistência à compressão;
- Classes de exposição;
- Máxima dimensão do agregado mais grosso;
- Classe de teor de cloretos de acordo com Quadro 22;

Adicionalmente, para betão leve:

- Classe de massa volúmica ou massa volúmica pretendida.

Adicionalmente, para betão pesado:

- Massa volúmica pretendida.
- Adicionalmente, para betão pronto e betão fabricado no local:
- Classe de consistência ou, em casos especiais, valor pretendido para a consistência.

Quadro 24 - Desenvolvimento da resistência do betão a 20°C

Desenvolvimento da resistência	Estimativa da razão de resistências $f_{c,m,2} / f_{c,m,28}$
Rápido	$\geq 0,5$
Médio	$\geq 0,3$ a $< 0,5$
Lento	$\geq 0,15$ a $< 0,3$
Muito lento	$< 0,15$

Como requisitos adicionais os seguintes aspetos podem ser especificados através de requisitos de desempenho e de métodos de ensaio, quando apropriados:

- Tipos ou classes especiais de cimento (p.e., cimento com baixo calor de hidratação);
- Tipos ou classes especiais de agregados;
- Características requeridas para a resistência ao ataque pelo gelo/degelo (p.e., teor de ar);
- Requisito para a temperatura do betão fresco;
- Desenvolvimento da resistência (Quadro 24);
- Desenvolvimento de calor durante a hidratação;
- Endurecimento retardado;
- Resistência à penetração de água;
- Resistência à abrasão;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Outros requisitos técnicos (por ex. requisitos relacionados com a obtenção de um acabamento particular ou com um método especial de colocação).

A especificação do betão de composição prescrita deve ser feita por intermédio dos requisitos fundamentais, a indicar em todos os casos e dos requisitos adicionais, a indicar quando requeridos.

Como requisitos fundamentais a especificação deve incluir:

- Requisito de conformidade com a NP EN 206-1:2007 [2];

- Dosagem de cimento;
- Tipo e classe de resistência do cimento;
- Razão água/cimento ou consistência, através de uma classe ou, em casos especiais, de um valor pretendido (este deverá ser inferior em 0,02 a qualquer valor limite requerido);
- Tipo, categorias e teor máximo de cloretos dos agregados; no caso de betão leve ou pesado, a massa volúmica máxima ou mínima dos agregados, conforme o caso;
- Máxima dimensão do agregado mais grosso e quaisquer limitações para a granulometria;
- Tipo e quantidade de adjuvantes ou adições, se utilizados;
- As origens dos adjuvantes ou adições, se utilizados, e do cimento, em substituição das características impossíveis de definir por outros meios.
- Como requisitos adicionais os seguintes aspetos podem ser especificados através de requisitos de desempenho e de métodos de ensaio, quando apropriados:
- As origens de alguns, ou de todo os constituintes do betão, em substituição das características impossíveis de definir por outros meios;
- Requisitos adicionais para agregados;
- Requisito para a temperatura do betão fresco;
- Outros requisitos técnicos.

O betão de composição prescrita em norma deve ser especificado citando:

- A norma válida no local de utilização do betão, indicando os requisitos relevantes;
- A designação do betão naquela norma;
- O betão de composição prescrita em norma deve ser utilizado apenas para:
- Betão normal para estruturas em betão simples ou armado;



- Classes de resistência à compressão especificadas no projeto  $\leq C 16/20$ , a menos que as disposições válidas no local de utilização do betão permitam a classe C20/25;
- Classes de exposição X0 e XC1, a menos que as disposições válidas no local de utilização permitam outras classes de exposição.
- Para betão de composição prescrita em norma, a composição é limitada a:
  - Agregados naturais de massa volúmica normal;
  - Adição em pó desde que não sejam levadas em conta para a determinação da dosagem de cimento e da razão água/cimento;
  - Adjuvantes com exceção de adjuvantes introdutores de ar;Composições que cumpram o critério de aceitação para os ensaios iniciais.



## **4 CONTROLO DA PRODUÇÃO DO BETÃO**

### **4.1 Generalidades**

Todo o betão deve ser sujeito ao controlo da produção sob responsabilidade do produtor. O controlo da produção compreende todas as medidas necessárias para manter as propriedades do betão em conformidade com os requisitos especificados.

Inclui:

- Seleção de materiais;
- Formulação do betão;
- Produção do betão;
- Inspeções e ensaios;
- Utilização dos resultados dos ensaios efetuados sobre os materiais constituintes, o betão fresco e endurecido e o equipamento;
- Controlo da conformidade;

Os requisitos para o controlo da produção indicados na NP EN 206-1:2007 [2] têm em conta os princípios da NP EN ISO 9001:2008/AC :2010 [27]. A responsabilidade, a autoridade e a relação entre todo o pessoal que dirige, efetua e verifica o trabalho que influi na qualidade do betão devem ser definidas num sistema de controlo da produção documentado (manual do controlo da produção), particularmente no que diz respeito pessoal que precisa de dependência e autoridade dentro da organização para minimizar o risco de betão não conforme e para identificar e mencionar qualquer problema de qualidade.

### **4.2 Sistema de controlo de produção**

Deve ser revisto pela direção do produtor, pelo menos de dois em dois anos, para assegurar a aptidão e eficácia do sistema. Os registos de tais revisões devem ser conservados, pelo menos, durante 3 anos, a não ser que obrigações legais exigem um período mais longo.

Quadro 25 – Controlo dos materiais constituintes

Numeração	Material Constituinte	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
1	Cimentos <sup>a</sup>	Inspeção da guia de remessa <sup>d</sup> antes da descarga	Assegurar que o fornecimento está conforme o pedido e é da origem correta	Cada Entrega
2	Agregados	Inspeção da guiada e remessa b, d antes da descarga	Assegurar que o fornecimento está conforme o pedido e é da origem correta	Cada Entrega
3		Inspeção do agregado antes da descarga	Comparar com a aparência normal no que respeita à granulometria, forma e impurezas	Cada Entrega; Se a entrega é por correia transportadora, periodicamente em função das condições locais ou de entrega
4		Análise granulométrica de acordo com a EN 933-1*	Avaliar a conformidade com a norma ou outra granulometria acordada	Primeira entrega de nova origem quando o fornecedor não disponibiliza esta informação; Em caso de dúvida, após a inspeção visual; Periodicamente, em função das condições locais ou de entrega <sup>e</sup>
5		Determinação de impurezas	Avaliar a presença e a quantidade de impurezas	Primeira entrega de nova origem quando o fornecedor não disponibiliza esta informação; Em caso de dúvida, após a inspeção visual; Periodicamente, em função das condições locais ou de entrega <sup>e</sup>
6		Determinação da absorção de água, segundo a EN 1097-6 *	Avaliar a dosagem efetiva de água do betão, ver 5.4.2	Primeira entrega de nova origem quando o fornecedor não disponibiliza esta informação; Em caso de dúvida
7		Controlo adicional dos agregados leves ou pesados	Ensaio segundo a EN 1097-3 *	Medir a Baridade
8	Adjuvantes <sup>c</sup>	Inspeção da guia de remessa <sup>e</sup> da etiqueta do contentor <sup>d</sup> antes da <sup>d</sup> antes da descarga	Assegurar que o fornecimento está conforme o pedido e está adequadamente marcado	Cada entrega
9		Identificação segundo a EN 934-2*, p.e., massa volúmica, infravermelhos	Comparar com os dados do fabricante	Em caso de dúvida
10	Adições em Pó <sup>c</sup>	Inspeção da guia de remessa <sup>d</sup> antes da descarga	Assegurar que o fornecimento está conforme o pedido e é da origem correta	Cada entrega
11		Determinação da perda ao fogo das cinzas volantes	Identificar alterações no teor de carbono que possam afetar o betão com ar introduzido	Cada entrega para ser utilizada em betão com ar introduzido quando o produtor não disponibiliza esta informação

<sup>a</sup> Recomenda-se que sejam colhidas e armazenadas amostras, uma vez por semana e de cada tipo de cimento, para ensaio em caso de dúvida.

<sup>b</sup> A guia de remessa ou a ficha técnica do produto devem também conter informação sobre o teor máximo de cloretos e devem possuir uma classificação respeitante às reações álcalis-silica de acordo com as disposições válidas no local de utilização do betão\*\*.

<sup>c</sup> Recomenda-se que sejam colhidas e armazenadas amostras de cada entrega.

<sup>d</sup> A guia de remessa deve conter ou ser acompanhada de uma declaração ou certificado de conformidade como requerido na norma ou especificação relevante.

<sup>e</sup> Não é necessário quando o controlo da produção do agregado está certificado

Quadro 26 – Controlo do equipamento

	Equipamento	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
1	Pilhas de armazenamento, contentores, Etc.	Inspeção visual	Assegurar conformidade com os requisitos	Uma vez por semana
2	Equipamento de Pesagem	Inspeção visual do funcionamento	Assegurar que o equipamento de pesagem está limpo e funciona corretamente	Diariamente
3		Verificação da exatidão da pesagem	Assegurar com exatidão está de acordo com 9,6,2,2	Quando da instalação; periodicamente <sup>a</sup> em função das disposições nacionais; Em caso de dúvida
4	Doseadores de adjuvantes (incluindo os montados nos camiões betoneira)	Inspeção visual do funcionamento	Assegurar que o equipamento está limpo e funciona corretamente	Primeira utilização do dia para cada adjuvante
5		Verificação da exatidão dosagem	Evitar dosagens erradas	Quando da instalação; periodicamente <sup>a</sup> após instalação; Em caso de dúvida
6	Contador de Água	Verificação da exatidão da medição	Assegurar com exatidão está de acordo com 9,6,2,2	Quando da instalação; periodicamente <sup>a</sup> após instalação; Em caso de dúvida
7	Equipamento para medição contínua do teor de humidade dos agregados finos	Comparação da quantidade real com a leitura do aparelho	Assegurar exatidão	Quando da instalação; Periodicamente <sup>a</sup> após a instalação; Em caso de dúvida
8	Sistema de dosagem	Inspeção Visual	Assegurar o funcionamento correto do equipamento de dosagem	Diariamente
9	Sistema de dosagem	Comparação (por método adequado em função do sistema de dosagem) da massa real dos constituintes com a massa pretendida, no caso da dosagem automática, com a massa registada	Assegurar a exatidão do sistema de dosagem de acordo com o Quadro 21	Quando da instalação; periodicamente <sup>a</sup> após instalação; Em caso de dúvida
10	Equipamento de ensaio	Calibração segundo as normas nacionais ou EN relevantes	Verificar a conformidade	Periodicamente <sup>a)</sup>
11	Betoneiras (incluindo autobetoneiras)	Inspeção visual do funcionamento	Verificar o desgaste do equipamento de amassadura	Periodicamente <sup>a</sup>

<sup>a)</sup> A frequência depende do tipo de equipamento, da sua sensibilidade durante o uso e das condições de produção da central

O sistema de controlo da produção deve incluir procedimentos e instruções que devem ser estabelecidos respeitando os requisitos de controlo estabelecidos nos Quadro 25, Quadro 26 e Quadro 27.

Quadro 27 – Controlo dos procedimentos de produção e das propriedades do betão

Nú	Tipo de ensaio	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
1	Propriedades do betão de comportamento especificado	Ensaios iniciais (ver anexo A)	Provar que as propriedades especificadas são satisfeitas com uma margem adequada pela composição proposta	Antes do uso de uma nova composição de betão
2	Teor de humidade dos agregados finos	Sistema de medição contínua, ensaio de secagem ou equivalente	Determinar a massa seca do agregado e a água a adicionar	Se não for contínua, diariamente, podendo ser necessária uma frequência maior ou menor dependendo das condições locais e atmosféricas
3	Teor de humidade dos agregados grossos	Ensaio de secagem ou equivalente	Determinar a massa seca do agregado e a água a adicionar	Dependendo das condições locais e atmosféricas
4	Dosagem de água do betão fresco	Verificar a quantidade de água adicionada <sup>a</sup>	Fornecer o valor para a razão água/cimento	Cada amassadura
5	Teor de cloretos do betão	Determinação inicial por cálculo	Assegurar que o máximo teor de cloretos não é excedido	Quando se realizam ensaios iniciais; No caso dum aumento no teor de cloretos dos constituintes
6		Inspeção visual	Comparar com aparência normal	Cada amassadura
7	Consistência	Determinação da consistência segundo a EN 12350-2*, -3*, -4* ou -5*	Avaliar o cumprimento dos valores especificados da consistência e verificar possíveis variações da dosagem de água	Quando a consistência for especificada, frequência igual à do Quadro 13 para a Resistência à compressão; Quando se determina o teor de ar; Em caso de dúvida após inspeção visual
8	Massa volúmica do betão fresco	Determinação da massa volúmica segundo a EN 12350-6*	Supervisionar a amassadura do betão leve e do betão pesado e controlar a massa volúmica	Diariamente
9	Dosagem de cimento do betão fresco	Verificar a massa de cimento da amassadura <sup>a)</sup>	Verificar a massa de cimento da amassadura <sup>a)</sup>	Cada amassadura
10	Dosagem de adições do betão fresco	Verificar a massa de cimento da amassadura <sup>a)</sup>	Verificar a dosagem de adições e fornecer o valor para a razão água/cimento (ver 5.4.2)	Cada amassadura
11	Dosagem de adjuvantes do betão fresco	Verificar a massa ou volume e adjuvantes da amassadura <sup>a)</sup>	Verificar a dosagem de adjuvantes	Cada amassadura
12	Razão água/cimento do betão fresco	Por cálculo ou por ensaio, ver 5.4.2	Avaliar o cumprimento da razão água / cimento especificada	Diariamente, quando especificado
13	Teor de ar do betão fresco, quando especificado	Ensaio segundo a EN 12350-7* para o betão normal e para o betão pesado; ASTM C 173 para o betão leve	Avaliar o cumprimento do teor de ar especificado	Para betões com ar introduzido: primeiras amassaduras ou cargas de cada dia de produção até que os valores estabilizem

Quadro 27 (Continuação) – Controlo dos procedimentos de produção e das propriedades do betão

14	Temperatura do betão fresco	Medir Temperatura	Avaliar cumprimento da temperatura mínima de 5 °C ou do limite especificado	Em caso de dúvida; Quando a temperatura for especificada: - periodicamente, dependendo da situação; - cada amassadura ou carga quando a temperatura está perto do limite
15	Massa volúmica do betão leve ou do betão pesado Endurecido	Ensaio segundo a EN 12390- 7 * b)	Avaliar o cumprimento da massa Volúmica especificada	Quando a massa volúmica for especificada, frequência igual à da resistência à compressão
16	Ensaio de resistência à compressão em provetes de betão moldados	Ensaio segundo a EN 12390- 3 * b)	Avaliar o cumprimento da resistência especificada	Quando a resistência for especificada, frequência igual à do controlo da conformidade, ver 8.1 e 8.2.1

a) Quando não é usado equipamento de registo e as tolerâncias da dosagem são excedidas para a amassadura ou carga, registar a quantidade doseada no registo da produção.

b) Pode também ser ensaiado em condições saturadas, desde que esteja estabelecida uma relação segura com a massa volúmica seca.

As frequências pretendidas para os ensaios e inspeções efetuadas pelo produtor devem ser encontrar-se escritos. Os resultados dos ensaios e das inspeções devem ser registados. Todos os dados significativos do controlo da produção devem ser registados (Quadro 28). Estes registos devem ser conservados, mais ou menos durante 3 anos, a não ser que obrigações legais exigem um período mais longo.

Quadro 28 – Registos e outros documentos, se relevantes

Assunto	Registos e outros documentos
Requisitos especificados	Especificação contratual ou resumo dos requisitos
Cimentos, Agregados, adjuvantes adições	Nome dos fornecedores e da origem
Ensaio da água de amassadura (não requeridos para a água potável)	Data e local da amostragem resultados dos ensaios
Ensaio dos materiais constituintes	Data e resultados dos ensaios
Composição do betão	Descrição do betão Registos das pesagens dos constituintes por amassadura ou carga ( p.e., dosagem de cimento ) Razão água/cimento Teor de cloretos Código do membro da família
Ensaio do betão fresco	Data e local da amostragem Localização na estrutura, se conhecida Consistência (método usado e resultados ) Massa volúmica, se requerida Temperatura do betão, se requerida Teor de ar, se requerido volume da amassadura ou da carga ensaiada Números e códigos dos provetes a ensaiar Razão água / Cimentos, se requerida
Ensaio do Betão Endurecido	Data dos Ensaio Códigos e idades dos provetes Resultados dos ensaios da massa volúmica e da resistência Notas especiais ( Por exemplo - Padrão de rotura anormal do provete)
Avaliação da conformidade	Conformidade / Não. Conformidade com as especificações
Adicionalmente para o betão pronto	Nome do Cliente Local da Obra, P.E. Local da Construção Números e datas das guias de remessas relativas aos ensaios Guias de Remessa
Adicionalmente para o betão pré-fabricado	Podem ser requeridos dados adicionais ou diferentes pela norma de produto relevante

No caso duma nova composição de betão, devem ser executados ensaios iniciais para verificar se o betão tem as propriedades especificadas ou o desempenho pretendido com uma margem adequada (Anexo A da NP EN 206-1:2007 [2]). Quando houver experiência de longa duração com um betão ou uma família de betões semelhantes, os ensaios iniciais não são requeridos.

Todas as composições de betão devem ser revistas periodicamente para garantir que ainda estão conformes com os requisitos, tendo em conta as alterações nas propriedades dos materiais constituintes e os resultados dos ensaios de conformidade das composições de betão.

Os conhecimentos, a formação e a experiência do pessoal envolvido na produção e no controlo da produção devem ser adequados ao tipo de betão, p.e., betão de elevada resistência,



betão leve. Devem ser mantidos registos apropriados da formação e da experiência do pessoal envolvido na produção e no controlo da produção. Em alguns países, há requisitos especiais relativos ao nível de conhecimentos, de formação e de experiência para diferentes tarefas.

Os materiais constituintes devem ser armazenados e manuseados de forma que as suas propriedades não se alterem significativamente, p.e. por ação do clima, por mistura ou contaminação, e que a conformidade com a norma respetiva se mantenha. Os compartimentos de armazenamento devem ser claramente identificados de modo a evitar erros na utilização dos materiais constituintes. Devem ser tidas em conta as instruções especiais dos fornecedores dos materiais constituintes. Devem existir equipamentos para a recolha de amostras representativas, p.e. em pilhas, silos e contentores.

No doseamento do betão deve estar documentada e disponível uma instrução de doseamento, pormenorizando o tipo e quantidade dos materiais constituintes. A tolerância de doseamento dos materiais constituintes não deve exceder os limites estabelecidos no Quadro 29 para quantidades de betão iguais ou superiores a 1 m<sup>3</sup>. Quando certo número de amassaduras são misturadas ou voltadas a misturar num camião betoneira, as tolerâncias do Quadro 29 aplicam-se à carga. Os cimentos, os agregados e as adições em pó devem ser doseados em massa; são permitidos outros métodos se a tolerância de doseamento requerida puder ser obtida e se tal facto estiver documentado. A água de amassadura, os agregados leves, os adjuvantes e as adições líquidas podem ser doseados em massa ou em volume. A exatidão do equipamento de pesagem deve ser no mínimo a apresentada no Quadro 30.

A amassadura do betão deve ser feita numa betoneira capaz de assegurar uma distribuição uniforme dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão dentro do tempo de amassadura e para a capacidade de mistura. A mistura dos materiais constituintes deve continuar até o betão ter uma aparência uniforme.

Quadro 29 – Tolerâncias para o doseamento dos materiais constituintes

Material constituinte	Tolerância
Cimento	
Água	
Total dos Agregados	+/- 3% da quantidade requerida
Adições, quando > 5 % da massa do cimento	
Adjuvantes e adições quando < ou = 5% da massa do cimento	+/- 5% da quantidade requerida

As betoneiras não devem ser carregadas para além da sua capacidade nominal de amassadura. Os adjuvantes, quando utilizados, devem ser adicionados durante o processo de amassadura, com exceção dos superplastificantes ou dos redutores de água, que podem ser adicionados após esse processo. Neste último caso, o betão deve voltar a ser amassado até que o adjuvante fique completamente disperso na amassadura ou na carga e se tenha tornado totalmente eficaz. Numa autobetoneira, a duração da re-amassadura após o processo principal de amassadura e após a adição do adjuvante não deverá ser inferior a 1 min/m<sup>3</sup>, com o mínimo de 5 min.

Para betão leve com agregados não saturados, o período desde a amassadura inicial até ao fim da última amassadura (p.e. re-amassadura numa autobetoneira) deve ser prolongado até que a absorção de água dos agregados e subsequente expulsão do ar dos agregados leves, não tenha qualquer impacto negativo significativo nas propriedades do betão endurecido. A composição do betão fresco não deve ser alterada depois de sair da betoneira.

Quadro 30 – Exatidão do equipamento de pesagem

Posição no campo de medida da escala ou do indicador digital	Exatidão	
	na instalação	em operação
De 0 a 1/4 do valor máximo da escala ou do indicador digital	0,5%	1,0%
De 1/4 do valor máximo da escala ou do indicador digital	0,5%	1,0%
	Da leitura feita	

Os tipos e a frequência das inspeções e dos ensaios dos materiais constituintes devem ser os estabelecidos no Quadro 25. O controlo do equipamento deve assegurar que as instalações de armazenamento, o equipamento de pesagem e de medição volumétrica, a betoneira e os dispositivos de controlo (p.e., a medição do teor de água dos agregados) estão em boas condições de funcionamento e satisfazem os requisitos da NP EN 206-1:2007 [2]. A frequência das inspeções e dos ensaios do equipamento (enquanto em utilização) é dada no Quadro 26.

Quadro 31 – Controlo dos materiais constituintes (betão de alta resistência)

Numeração	Material Constituinte	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
4	Agregados	Análise granulométrica de acordo com a EN 933-1* ou informação do fornecedor dos agregados	Verificar o cumprimento da granulometria acordada	Cada fornecimento, a não ser que os agregados sejam fornecidos com tolerâncias apertadas e com um certificado do controlo da produção
9a	Adjuvantes <sup>a)</sup>	Determinação do teor de resíduo seco	Comparar com o valor declarado na ficha técnica	Cada fornecimento, a não ser que os resultados dos ensaios do fornecimento sejam facultados pelo fornecedor; Em caso de dúvida.
9b		Determinação da massa volúmica	Comparar com o valor da massa volúmica declarada	Cada fornecimento
11	Adições em pó	Determinação perda ao fogo	Identificar alterações no teor de carbono que podem afetar as propriedades do betão fresco	Cada fornecimento, a não ser que os resultados dos ensaios do fornecimento sejam facultados pelo fornecedor

a) Recomenda-se a colheita e conservação de amostras de cada fornecimento.

A central, o equipamento e os meios de transporte devem estar sujeitos a um plano de manutenção e devem ser mantidos em condições de funcionamento eficiente para que as propriedades e a quantidade de betão não sejam afetadas. As propriedades do betão de comportamento especificado devem ser controladas em relação aos requisitos especificados no Quadro 27.

Podem ser necessários requisitos adicionais para o controlo da produção de alguns betões. Para a produção de betão de alta resistência, requerem-se conhecimentos e experiência especiais. O Anexo H (informativo) da NP EN 206-1:2007 [2] dá alguma orientação relativa a disposições adicionais para betão de alta resistência (Quadro 31 a Quadro 33).

### 4.3 Entrega do betão fresco

#### 4.3.1 Informação do utilizador do betão para o produtor

O utilizador deve acordar com o produtor:

- A data, a hora e a cadência da entrega;

e, quando apropriado, informar o produtor acerca de:

- Transporte especial no local;

- Métodos especiais de colocação;
- Limitações dos veículos de entrega, p.e., tipo (equipamento agitador/não agitador), tamanho, altura ou peso bruto.

Quadro 32 – Controlo do equipamento (betão de alta resistência)

Numeração	Equipamento	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
1	Pilhas de armazenamento, silos, etc.	Inspeção visual	Verificar a conformidade com os requisitos	Diária
3a	Equipamento de pesagem	Determinação da exatidão da pesagem	Confirmar a exatidão num ponto da escala	Semanal
5	Doseadores de adjuvantes (incluindo os montados em camiões betoneira)	Determinação da exatidão	Obter dosagens	Quando a instalação; Semanalmente; após a instalação; Em caso de dúvida.
6a	Contador de água	Comparação do valor real com a leitura do aparelho	Verificar a exatidão de acordo com a seção 9.7	Quando da instalação; Semanalmente, após a instalação; Em caso de dúvida.
7	Equipamento de medição contínua do teor de humidade dos agregados finos	Comparação do teor real com a leitura do aparelho	Verificar a exatidão	Quando da instalação; Semanalmente, após a instalação; Em caso de dúvida.
9	Sistema de dosagem	Comparação (por um método adequado em função do sistema de dosagem) da massa real dos constituintes com a massa pretendida e no caso de dosagem automática com a massa registada	Verificar a exatidão do doseamento de acordo com o Quadro 21	Quando da primeira instalação; Em caso de dúvida em instalações posteriores; Mensalmente, após a instalação.

A norma NP EN 206-1 de 2007 não requer que a informação seja dada num formato específico, pois este dependerá da relação entre o produtor e o utilizador, p.e., no caso de betão fabricado no local ou de produtos prefabricados de betão, o produtor e o utilizador do betão podem ser a mesma entidade.

#### 4.4 Informação do produtor do betão para o utilizador

O utilizador pode requerer informação sobre a composição do betão, para permitir uma colocação e cura apropriadas do betão fresco, assim como para estimar o desenvolvimento da resistência. Tal informação deve ser dada pelo produtor, se solicitada antes da entrega. Para o betão de comportamento especificado, deve ser dada, quando solicitada, a seguinte informação:

- Tipo de adjuvantes, tipo e dosagem aproximada de adições, se utilizados;
- Razão água/cimento pretendida;
- Resultados dos ensaios anteriores do betão, p.e., resultantes do controle de produção ou de ensaios iniciais;
- Desenvolvimento da resistência;
- Origens dos materiais constituintes.

Quadro 33 - Controle dos procedimentos de produção e das propriedades do betão de alta resistência

Numeração	Tipo de ensaio	Inspeção / Ensaio	Objetivo	Frequência mínima
3	Teor de humidade dos agregados grossos	Ensaio de secagem ou equivalente	Determinar a massa dos agregados e a água a adicionar	Diariamente; Dependendo das condições atmosféricas locais podem ser requeridos ensaios mais ou menos frequentes.
4	Dosagem da água adicionada do betão fresco	Registo <sup>a)</sup> da quantidade de água adicionada	Fornecer informação para a razão água/cimento	Cada amassadura
9	Dosagem de cimento do betão fresco	Registo <sup>a)</sup> da quantidade de cimento adicionado	Verificar dosagem de cimento e fornecer informação para a razão água/cimento	Cada amassadura
10	Dosagem de adições	Registo <sup>a)</sup> da quantidade de adições adicionadas	Verificar a dosagem de adições	Cada amassadura

a)Para a produção de betão de alta resistência, recomenda a utilização de equipamento de pesagem com registo automático.

No caso do betão pronto, a informação, quando solicitada, pode também ser facultada por referência ao catálogo das composições do betão do produtor, no qual são dados pormenores acerca das classes de resistência, classes de consistência, dosagens e outra informação relevante.

Para a determinação da duração da cura, a informação sobre o desenvolvimento da resistência do betão pode ser dada sob a forma indicada no Quadro 34 ou por uma curva de desenvolvimento da resistência a 20 °C entre os 2 e os 28 dias.

Quadro 34 – Desenvolvimento da resistência do betão a 20<sup>0</sup>C

Desenvolvimento da resistência	Estimativa da razão de resistência $f_{cm,2}/f_{cm,28}$
Rápido	$\geq 0,5$
Médio	$\geq 0,30 < 0,5$
Lento	$\geq 0,15 \text{va} < 0,3$
Muito Lento	$< 0,15$

A razão de resistências, indicador do desenvolvimento da resistência, é a razão entre a resistência à compressão média aos 2 dias ( $f_{cm,2}$ ) e a resistência à compressão média aos 28 dias ( $f_{cm,28}$ ), determinada a partir de ensaios iniciais ou baseada no desempenho conhecido de um betão com uma composição comparável.

O produtor deve informar o utilizador relativamente aos riscos de saúde que podem ocorrer durante o manuseamento do betão fresco, de acordo com as disposições válidas no local de utilização do betão fresco.

Quando o cimento é misturado com a água, libertam-se álcalis. Deste modo, as disposições nacionais quanto à segurança no manuseamento do betão fresco, nomeadamente no que respeita aos riscos de saúde, são as seguintes:

- Devem tomar-se precauções para evitar que o betão fresco entre em contacto com os olhos, boca e nariz. Se o betão fresco entrar em contacto com um destes órgãos, eles devem ser lavados imediatamente com água limpa e deve procurar-se imediatamente tratamento médico;
- Deve evitar-se o contacto da pele com o betão fresco, recorrendo a vestuário de proteção adequado; se o betão fresco entrar em contacto com a pele, esta deve ser lavada imediatamente com água limpa.

No momento da entrega, o produtor de betão pronto deve entregar ao utilizador uma guia de remessa por cada carga de betão. A informação que deve constar nesta guia de remessa está indicada na NP EN 206-1:2007 [2]. Esta informação também é importante para o betão fabricado no local, nos casos de grandes estaleiros, quando existirem vários tipos de betão ou quando a entidade responsável pela produção do betão for diferente da entidade responsável pela sua colocação.

Em geral, não é permitida qualquer adição de água ou de adjuvantes na entrega. Em casos especiais, podem ser adicionados água ou adjuvantes sob a responsabilidade do produtor, com o objetivo de atingir a consistência pretendida, desde que os limites permitidos pela especificação não sejam excedidos e que a adição de adjuvantes esteja incluída na formulação do betão. A quantidade suplementar de água ou de adjuvantes adicionados na autobetoneira deve ser, em todos os casos, registada na guia de remessa.

Se no local forem adicionados ao betão numa autobetoneira mais água ou adjuvantes do que é permitido pela especificação, a amassadura ou carga deverá ser registada como “não-conforme” na guia de remessa. A entidade que autorizou a adição é responsável pelas consequências daí decorrentes e deverá ser identificada na guia de remessa.

#### **4.5 Avaliação da Conformidade**

O produtor é responsável pela avaliação da conformidade dos requisitos especificados para o betão. Com esta finalidade, o produtor deve executar as seguintes tarefas:

- Ensaaios iniciais, quando requeridos;
- Controlo da produção, incluindo o controlo da conformidade.

A recomendação para inspecionar o controlo da produção e certificar a sua conformidade, por organismos de inspeção e de certificação reconhecidos, depende do nível dos requisitos de desempenho para o betão, da sua utilização pretendida, do tipo de produção e da margem de segurança da composição do betão. Em geral, é recomendável a inspeção e a certificação do controlo da produção por organismos de inspeção e de certificação reconhecidos. Tal não é considerado necessário para o betão de composição prescrita em norma com uma elevada margem de segurança na composição (ver anexo A.5 da NP EN 206-1:2007 [2]), utilização limitada e classe de resistência baixa (em geral  $\leq C16/20$ ).

Para produtos prefabricados de betão, os requisitos e as disposições para a avaliação de conformidade são dadas nas especificações técnicas relevantes (normas de produto e aprovações técnicas).

O Anexo C (normativo) da NP EN 206-1:2007 [2] contém as disposições para a avaliação, fiscalização e certificação do controlo da produção por um organismo reconhecido, quando tal for requerido para o controlo da produção. Indicam-se as atribuições do organismo de

inspeção e do organismo de certificação, como avaliação inicial do controlo da produção, fiscalização contínua do controlo da produção, certificação do controlo da produção e medidas em caso de não-conformidade.

#### **4.5.1 Controlo da Conformidade do Betão de Comportamento Específico**

O controlo da conformidade inclui o conjunto de ações e verificações a implementar de acordo com as regras de conformidade previamente adotadas para verificar a conformidade do betão com as especificações. O controlo da conformidade é uma parte integrante do controlo da produção.

As propriedades do betão utilizadas para o controlo da conformidade são as que são medidas por meio de ensaios apropriados usando procedimentos normalizados. Os valores reais das propriedades do betão na estrutura podem diferir dos determinados pelos ensaios, dependendo, p. e., das dimensões da estrutura, da colocação, da cura e das condições climáticas.

O local de amostragem para os ensaios de conformidade deve ser escolhido de modo que as propriedades relevantes e a composição do betão não variem significativamente entre o local da amostragem e o local da entrega. No caso do betão leve produzido com agregados não saturados, as amostras devem ser colhidas no local da entrega.

##### **4.5.1.1 Controlo da Conformidade de Resistência à Compressão**

Para o betão normal e o betão pesado das classes de resistência C8/10 a C55/67 ou para o betão leve das classes LC8/9 a LC55/60, a amostragem e os ensaios devem ser efetuados sobre as composições individuais do betão ou sobre famílias de betões adequadamente estabelecidas, como determinado pelo produtor, a menos que tenha sido acordado de outro modo. Considera-se uma família de betões como sendo um grupo de composições de betão, para as quais se encontra estabelecida e documentada uma correlação fiável entre as propriedades relevantes. O conceito de família de betões não deve ser aplicado a betões de classes de resistência superiores. Os betões leves não devem ser incluídos nas famílias de betões normais. Os betões leves com agregados de semelhança comprovada podem ser agrupados na sua própria família.



Quando se procede à escolha da família para o controle da produção e da conformidade, o produtor deverá ter controle sobre todos os elementos da família e a amostragem deve ser efetuada sobre todas as composições dos betões produzidos no seio da família. Quando houver pouca experiência na utilização do conceito de família de betões recomenda-se para a constituição de uma família o seguinte:

- Cimento de um tipo, classe de resistência e origem;
- Agregados de semelhança demonstrável e adições do tipo I;
- Betões com ou sem plastificantes/redutores de água;
- Gama completa de classes de consistência;
- Betões de uma gama limitada de classes de resistência.

Os betões com adições do tipo II, ou seja, adições pozolânicas ou com propriedades hidráulicas latentes, deverão ser colocados numa família à parte. Os betões com adjuvantes que possam ter uma influência importante na resistência à compressão, p. e., superplastificantes, aceleradores, retardadores de presa ou introdutores de ar, deverão ser tratados como betões individuais ou como famílias diferenciadas.

Os agregados deverão ter a mesma origem geológica, sejam do mesmo tipo, p.e., britados, e tenham um desempenho semelhante no betão, para que a sua semelhança seja demonstrável.

Antes da utilização do conceito de família ou da extensão das famílias acima indicadas, as correlações deverão ser validadas com dados anteriores da produção para provar que proporcionam um adequado e efetivo controle da produção e da conformidade.

Quando os ensaios de conformidade forem aplicados a uma família de betões, seleciona-se um betão de referência que pode ser o betão mais produzido ou um betão a meio da família. Estabelecem-se correlações entre cada composição individual e o betão de referência da família, para que seja possível a transposição dos resultados dos ensaios de resistência à compressão de cada betão da família para o betão de referência. As correlações devem ser verificadas em cada período de avaliação e quando existam variações significativas nas condições de produção, com base nos resultados originais (não transpostos) dos ensaios da

resistência à compressão. Adicionalmente, quando da avaliação da conformidade da família, tem que se confirmar que cada elemento pertence à família.

No plano de amostragem e de ensaio e nos critérios de conformidade para composição individuais de betão ou para as famílias de betões, faz-se distinção entre a produção inicial e a produção contínua. A produção inicial cobre o período da produção até que estejam disponíveis os primeiros 35 resultados de ensaios. A produção contínua é atingida quando são obtidos, pelo menos, 35 resultados de ensaios num período que não exceda os 12 meses.

Se tiver sido suspensa a produção de uma composição individual de betão, ou de uma família de betões, durante um período superior a 12 meses, o produtor deve adotar os critérios e o plano de amostragem e de ensaio estabelecidos para a produção inicial. O produtor pode adotar, para a produção contínua, os critérios e o plano de amostragem e de ensaio estabelecidos para a produção inicial.

Se a resistência é especificada para uma idade diferente, a conformidade será avaliada em provetes ensaiados na idade especificada.

As amostras de betão devem ser selecionadas aleatoriamente e colhidas de acordo com a NP EN 12350-1:2009 (ed.2) [28]. A amostragem deve incidir sobre cada família de betões produzida sob condições consideradas uniformes. A frequência mínima de amostragem e de ensaio do betão deve estar de acordo com o Quadro 35, tomando-se o valor que conduza a um maior número de amostras para produção inicial ou contínua, conforme o caso.

Quadro 35 – Frequência mínima de amostragem para avaliação da conformidade

Produção	Primeiros 50 m <sup>3</sup> de produção	Frequência mínima de amostragem	
		Produção subseqüente aos primeiros 50 m <sup>3</sup> de produção	Betão sem controlo da produção certificado
Inicial (até se obterem, pelo menos, 35 resultados)	3 Amostras	1/200 m <sup>3</sup> ou 2/semana de produção	Betão com controlo da produção certificado
Contínua b) (quando estiverem disponíveis, pelo menos, 35 resultados)		1/400 m <sup>3</sup> ou 1/semana de produção	Betão sem controlo da produção certificado

- a) A amostragem deve ser distribuída pela produção e não deve ser mais de 1 amostra por cada 25 m<sup>3</sup>.
- b) Quando o desvio padrão dos últimos 15 resultados for superior a 1,37  $\sigma$ , a frequência de amostragem deve ser incrementada para a requerida para a produção inicial nos próximos 35 resultados de ensaio.

As amostras devem ser colhidas após qualquer adição de água ou de adjuvantes ao betão sob a responsabilidade do produtor, sendo permitida a amostragem antes da adição de plastificantes

ou de superplastificantes para ajuste da consistência desde que tenha sido provado, através de ensaios iniciais, que o plastificante ou superplastificantes a adicionar, na quantidade a utilizar, não tem qualquer efeito negativo na resistência do betão.

O resultado do ensaio deve ser obtido a partir de um provete individual ou da média dos resultados de ensaio de dois ou mais provetes fabricados de uma amostra e ensaiados com a mesma idade. Quando de uma amostra são fabricados dois ou mais provetes e o intervalo de variação dos resultados individuais do ensaio é maior que 15 % da média, estes resultados devem ser desprezados a menos que uma investigação revele que existe uma razão aceitável que justifique a eliminação de um valor de ensaio individual.

A avaliação da conformidade deve basear-se nos resultados dos ensaios obtidos durante um período de avaliação que não deve exceder os últimos doze meses. A conformidade da resistência à compressão do betão é avaliada em provetes ensaiados aos 28 dias (pode ser avaliada a uma idade diferente se especificado), para:

- Grupos de “n” resultados de ensaios consecutivos, com ou sem sobreposição,  $f_{cm}$  (critério 1);
- Cada resultado individual de ensaio  $f_{ci}$  (critério 2).

Os critérios de conformidade foram desenvolvidos com base em resultados sem sobreposição. A aplicação dos critérios aos resultados dos ensaios com sobreposição aumenta o risco de rejeição. A conformidade é confirmada se forem satisfeitos ambos os critérios do Quadro 36 tanto para a produção inicial como para a produção contínua

Quadro 36 – Critérios de conformidade para a resistência à compressão

Produção	Número "n" de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo	Critério 1		Critério 2	
		Média dos "n" resultados ( $f_{cm}$ )		Qualquer resultado individual de ensaio ( $f_{ci}$ )	resultado de ensaio ( $f_{ci}$ )
Inicial	3	$\geq f_{ck} + 4$		$\geq f_{ck} - 4$	
Continua	$\geq 5$	$\geq f_{ck} + 1,48\sigma$		$\geq f_{ck} - 4$	

Quando a conformidade for avaliada tendo como base uma família de betões, o critério 1 aplica-se ao betão de referência, tendo em conta todos os resultados transpostos dos ensaios da família; o critério 2 aplica-se aos resultados originais dos ensaios. Para confirmar que cada membro individual pertence à família, deve verificar-se se a média de todos os resultados não transpostos ( $f_{cm}$ ) de um membro da família satisfaz o critério 3, apresentado no Quadro 37.

Qualquer betão que falhe este critério deve ser retirado da família e a sua conformidade avaliada individualmente.

Quadro 37 – Critérios de conformidade para os membros da família

Número "n" de resultados de ensaio da resistência à compressão de um dado betão da família	Critério 3 Média dos "n" resultados (fcm) de um dado betão da família N/mm <sup>2</sup>
2	≥fck - 1,0
3	≥fck + 1,0
4	≥fck + 2,0
5	≥fck + 2,5
6	≥fck + 3,0

Inicialmente, o desvio padrão deve ser calculado a partir de, pelo menos, 35 resultados consecutivos obtidos num período superior a 3 meses e que anteceda o período de produção em que se pretende verificar a conformidade. Este valor deve ser considerado como a estimativa do desvio padrão ( $\sigma$ ) da população. A validade do valor adotado tem que ser verificada durante a produção subsequente.

São permitidos dois métodos para a verificação da estimativa do valor de  $\sigma$ , devendo ser previamente escolhido o método a utilizar:

- Método 1

O valor inicial do desvio padrão pode ser aplicado no período subsequente durante o qual se pretende verificar a conformidade, desde que o desvio padrão dos últimos 15 resultados ( $s_{15}$ ) não divirja significativamente do desvio padrão adotado. Isto é considerado válido desde que:

$$0,63 \sigma \leq s_{15} \leq 1,37 \sigma \quad (4.1)$$

Quando o valor de  $s_{15}$  estiver fora destes limites, deve determinar-se uma nova estimativa de  $\sigma$  a partir dos últimos 35 resultados de ensaio disponíveis.

- Método 2

O novo valor de  $\sigma$  pode ser estimado a partir de um sistema contínuo, adotando-se este valor. A sensibilidade do sistema deve ser, pelo menos, igual à do método 1. A nova estimativa de  $\sigma$  deve ser aplicada no período de avaliação seguinte.

Quando for necessário verificar se um determinado volume de betão pertence a uma população avaliada como conforme quanto aos requisitos da resistência característica, p.e., se existirem dúvidas acerca da qualidade de uma amassadura ou de uma carga ou em casos especiais requeridos pelas especificações de projeto, esta verificação deve ser efetuada de acordo com o Anexo B da NP EN 206-1:2007 [2].

Os ensaios de identidade indicam, através da avaliação da conformidade, feita pelo produtor se um determinado volume de betão pertence à mesma população que foi verificada como conforme em relação à resistência característica.

Quando se pretender efetuar ensaios de identidade, deve ser definido o volume de betão em causa, p.e.:

- Amassadura ou carga em caso de dúvida quanto à sua qualidade;
- Betão fornecido para cada piso dum edifício ou grupo de vigas / lajes ou pilares / paredes de um piso ou de um edifício ou partes semelhantes de outras estruturas;
- Betão entregue num local durante uma semana, mas não mais de 400 m<sup>3</sup>.

Deve ser definido o número de amostras a retirar do volume de betão em causa. O resultado dos ensaios deve ser a média dos resultados de dois ou mais provetes duma amostra e ensaiados à mesma idade. Se o intervalo de variação dos resultados individuais de ensaio for superior a 15 % da sua média, os resultados não devem ser considerados, a menos que um estudo revele uma razão aceitável que justifique a eliminação de um determinado resultado individual de ensaio.

Para betão com certificação do controlo da produção, a identidade do betão é avaliada com base em cada resultado individual de ensaio da resistência à compressão e na média de “n” resultados discretos sem sobreposição, como se apresenta no Quadro 38.

Presume-se que o betão pertence à população conforme se ambos os critérios do Quadro 38 forem satisfeitos pelos “n” resultados dos ensaios de resistência de amostras colhidas do volume de betão em causa.

Para betão sem certificação do controlo da produção, devem extrair-se pelo menos 3 amostras do volume de betão em causa. Presume-se que o betão pertence a uma população conforme se

os critérios de conformidade estabelecidos anteriormente (Quadro 36) para a produção inicial forem satisfeitos.

Quadro 38 – Critérios de identidade para a resistência à compressão

Número" de resultados de ensaio da resistência à compressão de volume do betão em causa	Critério 1 Média dos "n" resultados ( $f_{cm}$ ) N/mm <sup>2</sup>	Critério 2 Qualquer resultado individual ( $f_{ci}$ ) N/mm <sup>2</sup>
1	Não aplicável	$\geq f_{ck} - 4$
2-4	$\geq f_{ck} + 1$	$\geq f_{ck} - 4$
5-6	$\geq f_{ck} + 2$	$\geq f_{ck} - 4$

A NP EN 206-1:2007 [2] apresenta ainda os planos de amostragem e os critérios de conformidade para outras propriedades que não a resistência à compressão.

Relativamente ao controlo da conformidade do betão de composição prescrita, incluindo de composição prescrita em norma, cada amassadura deve ser avaliada quanto à conformidade da dosagem de cimento, máxima dimensão e proporções dos agregados, se especificadas, e, quando relevante, da razão água/cimento, da dosagem dos adjuvantes ou de adições. Quando for necessário avaliar a conformidade da composição através da análise do betão fresco, os métodos de ensaio e os limites de conformidade devem ser previamente acordados entre o utilizador e o produtor, tendo em conta os limites exigidos na NP EN 206-1:2007 [2] e a exatidão dos métodos de ensaio.

Em caso de não-conformidade, o produtor deve executar as seguintes ações:

- Conferir os resultados dos ensaios e, se inválidos, agir de forma a eliminar os erros;
- Se se confirmar a não-conformidade, p.e., através da repetição dos ensaios, implementar ações corretivas incluindo um revisão, pela direção, dos procedimentos de controlo de produção relevantes;
- Se existir a confirmação de uma não-conformidade com a especificação que não foi óbvia na altura da entrega, notificar o especificador e o utilizador para evitar quaisquer danos subsequentes;
- Registrar as ações relativas aos pontos acima referidos.

Se o produtor tomou conhecimento da não-conformidade do betão ou se os resultados dos ensaios de conformidade não cumprirem os requisitos, podem ser requeridos ensaios

adicionais sobre carotes extraídas da estrutura ou dos elementos estruturais ou uma combinação de ensaios sobre carotes com ensaios não destrutivos na estrutura ou nos elementos estruturais.





## 5 EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

### 5.1 Introdução

Relativamente à execução de estruturas de betão a norma NP EN 13670:2011 [10] estabelece o nível de execução requerido quando se ligam materiais tais como betão fresco, armaduras, elementos prefabricados de betão, etc. numa estrutura que atinge o nível de resistência mecânica e estabilidade pretendido. Esta pré-norma tem três funções:

- Veicular para o construtor o conjunto dos requisitos estabelecidos pelo projetista e assegurar a ligação entre o projeto e a execução;
- Disponibilizar um conjunto de requisitos técnicos normalizados para a execução quando da contratação de uma estrutura de betão;
- Servir de lista de verificação ao projetista para que este se possa assegurar de que fornece ao construtor toda a informação técnica necessária para a execução da estrutura (ver Anexo A).

A norma NP EN 13670:2011 [22] pressupõe:

- A disponibilidade de um projeto completo da estrutura;
- Uma gestão do projeto encarregada da supervisão das obras que assegurará a execução de uma estrutura conforme;
- Uma gestão do estaleiro que se encarregará da organização das obras e assegurará a utilização correta e segura do equipamento e maquinaria, a qualidade dos materiais, a execução de uma estrutura conforme e a sua utilização segura até à entrega das obras.

Quando forem utilizados elementos prefabricados, pressupõe ainda:

- A disponibilidade de um projeto específico dos elementos prefabricados em conformidade com as normas correspondentes;
- A disponibilidade de uma coordenação entre o projeto dos elementos prefabricados fora do local da obra e o dos fabricados no local da obra;
- A existência duma especificação técnica da estrutura prefabricada e das instruções para a sua montagem;
- A existência de um responsável pela montagem e pelo pessoal que a faz.

A pré-norma NP EN 13670:2011 [22] aplica-se tanto a estruturas provisórias como definitivas. Não se enquadram no âmbito desta pré-norma pequenas obras simples em betão e estruturas secundárias de importância menor, definidas como tais em disposições válidas no local da construção.

## 5.2 Inspeção

A supervisão e a inspeção devem assegurar que as obras são executadas em conformidade com a NP EN 13670:2011 [22] e com as disposições das especificações de projeto. A inspeção, neste contexto, refere-se à verificação da conformidade dos produtos e dos materiais a usar, bem como da execução dos trabalhos.

Os requisitos de inspeção devem ser estabelecidos usando uma das seguintes 3 classes:

- Classe de inspeção 1;
- Classe de inspeção 2;
- Classe de inspeção 3.

A classe de inspeção pode dizer respeito à estrutura no seu todo, a componentes ou elementos da estrutura ou a certos materiais/tecnologias usados na construção. As três classes de inspeção permitem especificar a inspeção com base na importância do componente/estrutura e da complexidade da sua execução tendo em vista a sua capacidade para desempenhar a função. A classe de inspeção a utilizar deve ser fixada nas especificações de projeto.

O Quadro 39 fornece orientações para a escolha das classes de inspeção. As classes de inspeção a empregar deverão estar de acordo com disposições válidas no local da construção.

A inspeção dos materiais e produtos a usar na construção são apresentados no Quadro 40. Se for utilizado betão de composição prescrita, as propriedades relevantes devem ser avaliadas por intermédio de ensaios. O Quadro 40 remete em parte para algumas secções da NP EN 13670:2011 [22]. O âmbito da inspeção a efetuar é apresentado no Quadro 41, exceto se estabelecido de outro modo nas especificações de projeto. O Quadro 41 remete em parte para algumas secções da NP EN 13670:2011 [17].

### 5.3 Betonagem

O betão deve ser inspecionado no local da sua colocação. Quando as especificações de projeto requererem um programa de inspeção detalhado, este deverá identificar toda a inspeção, monitorização e ensaios necessários para provar que a qualidade pretendida foi atingida.

Quadro 39 – Guia para a seleção das classes de inspeção

Item	Classes de inspeção 1	Classes de inspeção 2	Classes de inspeção 3
Tipo de construção	Edifícios $\leq 2$ andares	-Pontes correntes -Edifícios > 2 andares	-Pontes especiais -Edifícios de grande altura -Grandes barragens -Edifícios para centrais nucleares -Reservatórios
Tipo de elementos estruturais	-Lajes e vigas em betão armado com vãos < 10 m - Pilares e paredes simples - Estruturas de funções simples	-Lajes e vigas em betão armado com vãos > 10 m  -Pilares e paredes esbeltos  -Maciços de encabeçamento de estacas -Arcos < 10 m	-Arcos e abóbadas em betão armado  -Elementos fortemente comprimidos -Fundações delicadas e complicadas -Arcos > 10 m
Tipo de construção/tecnologias usados	-Estruturas com elementos prefabricados	-Estruturas com elementos prefabricados	-Estruturas com elementos prefabricados -Tolerâncias especiais
Tipo de materiais em obra: Betão conforme o prEN 206:1997*): - Classe de resistência - Classe de exposição - Armaduras	Até C25/30 inclusive X0, XC1, XC2, XA1, XF1 Passivas	Qualquer classe de existência Qualquer classe de exposição Passivas e de pré-esforço	Qualquer classe de existência Qualquer classe de exposição Passivas e de pré-esforço

Para cada ponto a inspecionar o plano deverá estabelecer:

- Os requisitos;
- As referências normativas e as especificações de projeto;
- O método de inspeção, monitorização ou ensaio;
- A definição da secção a inspecionar;
- A frequência da inspeção, monitorização ou ensaio;
- Os critérios de aceitação;
- A documentação;
- O inspetor responsável;
- As intervenções dos representantes do dono da obra, se as houver.

Quadro 40 – Requisitos da inspeção de materiais e produtos

Item	Classes de inspeção 1	Classes de inspeção 2	Classes de inspeção 3
Material para cofragens	Inspeção visual	De acordo com as especificações de projeto 3)	
Aço para armaduras passivas	De acordo com a ENV 10080 e disposições validas no local da construção, ver 11.5.1 (1) 3)		
Aço para armaduras pré-esforço	Não aplicável	De acordo com a ENV 10138boubcom disposições validas no local da construção 3)	
Betão fresco 1), pronto ou fabricado no estaleiro	De acordo com o prEN 206:1997*) e com as especificações de projeto. Deve ser apresentada uma guia de remessa na ocasião da entrega.3)		
Outro itens 2)	De acordo com as especificações de projeto 3)		
Produtos pré-fabricados	De acordo com 11.8.2		
Relatório de inspeção	Não requerido	Requerido	
1) Os componentes moldados em obra são considerados como elementos produzidos com "betão fresco, pronto ou fabricado no estaleiro" exceto se forem produzidos de acordo com uma norma de produto. 2) Por exemplo, elementos metálicos, etc. 3) Produtos portadores da marcação CE ou certificados por entidade independente devem ser controlados confrontando a guia de remessa e por inspeção visual. Em caso de dúvida, deve ser levado a cabo uma inspeção ulterior para verificar a conformidade do produto com a sua especificação**). Outros produtos deve ser submetidos a inspeção e ensaio de receção conforme definido nas especificações de projeto**).			

O plano de inspeção pode ter a forma de um quadro resumo com referências aos procedimentos e instruções de inspeção, fornecendo os detalhes acerca da inspeção, monitorização e ensaios.

A inspeção e os ensaios relativos às operações de betonagem devem ser planeados, executados e documentados de acordo com a classe de inspeção Quadro 39. A inspeção de base consiste numa verificação contínua da conformidade e das regras de boa execução.

Quadro 41 – Âmbito da inspeção

Item	Classes de inspeção 1	Classes de inspeção 2	Classes de inspeção 3
Andaimes, cofragens e cimbrês	Inspeção visual	Inspeção dos andaimes, cofragens principais antes da betonagem, ver 11.4	Inspeção de todos os andaimes, cofragens principais antes da betonagem, ver 11.4
Armaduras passivas	Inspeção visual e medições aleatórias	Inspeção das armaduras principais antes da betonagem, ver 11.5.1 (2) e 11.5.2	Inspeção de todas as armaduras principais antes da betonagem, ver 11.5.1 (2) e 11.5.2
Itens embebidos	Inspeção visual	De acordo com as especificações de projeto	
Aço para armaduras pré-esforço	Não aplicável	Inspeção dos componentes pré-esforçados antes da betonagem, ver 11.6.2 e 11.6.3	
Montagem de produtos prefabricados	De acordo com as especificações de projeto de montagem		
Transporte dentro do estaleiro e betonagem	De acordo com 11.7		
Cura e acabamento do betão	Nenhum	De acordo com 11.7	
Pré-esforço das armaduras ativas e injeção de calda	Não aplicável	De acordo com 11.6.3 e 11.6.4	
Geometria final	Não requerido	De acordo com as especificações de projeto	
Documentação de inspeção	Não requerido	Conforme requerido pela presente Pré-Norma Europeia	

Quadro 42 – Requisitos do planeamento, exame e documentação

Item	Classe de inspeção 1	Classe de inspeção 2	Classe de inspeção 3
Planeamento da inspeção		Plano de inspeção, procedimentos e instruções conformem especificados.  Ações a empreender no caso duma não conformidade	Plano de inspeção, procedimentos e instruções conforme especificados.  Ações a empreender no caso duma não conformidade
Inspeção	Inspeção de base	Inspeção de base e inspeção aleatória pormenorizada.	Inspeção pormenorizada de cada betonagem.
Documentação	Registos de qualquer acontecimento pouco usual.  Relatórios de todas as não conformidade e das ações corretivas.	Todos os documentos de planeamento.  Registos de todas as inspeções.  Relatórios de todas as não conformidades e das ações corretivas	Todos os documentos de planeamento.  Registos de todas as inspeções.  Relatórios de todas as não conformidades e das ações corretivas

Os Quadros 43 a 48, contidos no Anexo G (informativo) da NP EN 13670:2011 [22], fornecem orientações para a inspeção das operações de betonagem.

Quadro 43 – Inspeção das operações anteriores à betonagem e a produção

Item	Método	Requisito	Classe de inspeção 1	Classe de inspeção 2	Classe de inspeção 3
Especificação do betão	Visual	prEN 26-1: 1997*)	Antes do ensaio da produção	Antes do ensaio da produção	Antes do ensaio da produção
Inspeção da produção do betão	Exame dos certificados quando disponíveis  Inspeção visual quando não houver inspeção por entidade independente	Certificado de controlo da produção emitido por um organismo de certificação reconhecido (de acordo com o prEN 206:1997*)  Em alternativa, inspeção da central de produção (de acordo com o prEN 206:1997*)	Novo fornecedor e em caso dúvida  Novo fornecedor e em caso dúvida	Novo fornecedor e em caso dúvida  Novo fornecedor e em caso dúvida	Novo fornecedor e em caso dúvida  Novo fornecedor e em caso dúvida
Planeamento da produção	Inspeção visual	Informação dizendo respeito à produção		Informação escrita	Informação escrita

O betão deve ser especificado e produzido de acordo com a NP EN 206-1:2007 [2]. É necessário verificar que a especificação do betão inclui todos os requisitos para execução. O betão deve ser inspecionado no local da sua colocação. O Quadro 48 fornece indicações acerca do nível mínimo de inspeção.

Quadro 44 – Inspeção do betão fresco

Assunto	Método	Requisito	Classes de inspeção 1	Classes de inspeção 2	Classes de inspeção 3
Guia de remessa quando aplicável	Inspeção Visual	Conformidade com a especificação	A cada entrega	A cada entrega	A cada entrega
Consistência do betão	Inspeção Visual Usando um ensaio de consistência adequado 1)	Consistência conforme exido Conformidade com a classe de consistência	Aleatória Só em caso de dúvida	A cada entrega Quando se colherem amostras para ensaios de betão endurecido e em caso de dúvida	A cada entrega Quando se colherem amostras para ensaios de betão endurecido e em caso de dúvida
Homogeneidade de betão	Inspeção Visual Ensaio por comparação de propriedades de amostras individuais colhidas de partes Diferentes de uma mesma amassadura 3)"	"Especto homogéneo As mostras individuais devem ser as mesmas propriedades 4)"	Em caso de dúvida	"A cada entrega Em caso de dúvida"	"A cada entrega Em caso de dúvida"
Ensaio de identidade para à resistência à compressão	Ensaio de acordo Com o prEN 206: 1997*2)	Conformidade com a Classe de resistência à compressão	Para betão sem Marcação CE ou qualquer outra certificação por entidade independente Em caso de dúvida	Para betão sem Marcação CE ou outra qualquer certificação por entidade independente De acordo com as especificações de projeto Em caso de dúvida	Para betão sem Marcação CE ou qualquer outra certificação por entidade independente De acordo com as especificações de projeto Em caso de dúvida
Teor de ar	Ensaio no estaleiro de acordo com o PrEN: 1997*1)	Conformidade com a especificação	Aleatória De acordo com as Especificação de projeto Em caso de dúvida	Aleatória De acordo com as Especificação de projeto Em caso de dúvida	De acordo com as Especificação de projeto Em caso de dúvida
Outras Carat.	3)	3)			
Doseamento	Registo	Dosagem tipo de agente	A cada entrega	A cada entrega	A cada entrega
Hora de chegada de colocação Temperatura	Registo Registo Registo	5) 5) 5)	Quando requerido Quando requerido Quando requerido	Quando requerido Quando requerido Quando requerido	Quando requerido Quando requerido Quando requerido

NOTA:  
 1-O critério do ensaio de identidade deve ser o estabelecido no prEN 206: 1997\*) para uma amostra individual.  
 2-Ensaio de identidade de resistência, quando requerido, por exemplo betões sem marcação CE ou sem certificação por entidade independente  
 3-De acordo com normas especificadas ou acordadas.  
 4-Dentro da exatidão do ensaio e variabilidade acordada das tolerâncias.  
 5-De acordo com o prEN 206: 1997\*) e as especificações de projeto.

Quadro 45 – Inspeção das operações anteriores à betonagem

Item	classe de inspeção 1	classe de inspeção 2	classe de inspeção 3
Planeamento da inspeção		Resultados de betonagens de ensaio se existirem. Acordo acerca de Controlo da Qualidade Plano de inspeção Lista de equipamento	Resultados de betonagens de ensaio se existirem Acordo acerca de Controlo da Qualidade Plano de inspeção Lista de equipamento Lista de operadores
Inspeção	Inspeção corrente inspeção em caso de dúvida	Inspeção corrente e aleatória  Estabilidade dos cimbres e das cofragens  Exame visual de : -esticadores -estanquidade do molde -limpeza do molde -quantidade de agente descofrante -saturação do molde -junta de construção -sequência de betonagem planeada -acesso -fornecimento planeado -recobrimento Dimensões das medidas	Exame antes de cada betonagem  Estabilidade dos cimbres e das cofragens  Exame visual de : -esticadores -estanquidade do molde -limpeza do molde quantidade de agente descofrante -saturação do molde junta de construção -sequência de betonagem planeada -acesso -fornecimento planeado -recobrimento Dimensões das medidas

Devem ser minimizadas durante a carga, transporte e descarga, do mesmo modo que durante o transporte no estaleiro, quaisquer alterações prejudiciais do betão fresco, tais como segregação, exsudação, perda de pasta ou quaisquer outras alterações. Quando requerido, devem ser colhidas amostras para ensaios de identidade no local de colocação ou, no caso de betão pronto, no local de entrega.

Deve ser estabelecido nas classes de inspeção 2 e 3 um plano de betonagem e inspeção para a execução, incluindo todas as ações importantes para a execução referidas na NP EN 13670:2011 [22]. Quando requerido no projeto, antes do início da execução deve ser feito e documentado um ensaio inicial. Todos os trabalhos preparatórios devem estar concluídos, inspecionados e documentados conforme requerido pela classe de inspeção antes do início da betonagem.

Se o betão for aplicado diretamente contra o terreno ou rocha, o betão deve ser protegido de contaminação e da perda de água. O terreno, a rocha, as cofragens ou os elementos estruturais em contacto com a secção a betonar devem estar a uma temperatura que não origine a congelação do betão antes de ter resistência suficiente para suportar os efeitos da congelação.

Quadro 46 – Inspeção da colocação e da compactação

Item	classe de inspeção 1	classe de inspeção 2	classe de inspeção 3
Planeamento da inspeção		Instruções para os operadores Cadência de colocação Sequência de colocação Espessura da camada	Instruções para os operadores Cadência de colocação Sequência de colocação Espessura da camada  Desenho ou diagrama de processo
Inspeção das superfícies moldadas	Inspeção de base	Inspeção de base e aleatória:  -condições atmosféricas -cadência de colocação -Sequência de colocação -Espessura da camada -segregação -consistência -número de vibradores de agulha -diâmetro dos vibradores de agulha -distância de penetração -profundidade de penetração -revibração -vibradores aplicados a cofragens -vibradores de superfície -movimentos do betão -deformação do molde -fixação de peças embebidas	Inspeção da totalidade da betonagem:  -Condições atmosféricas -cadência de colocação -Sequência de colocação -Espessura da camada -segregação -consistência -número de vibradores de agulha -diâmetro dos vibradores de agulha -distância de penetração -profundidade de penetração -revibração -vibradores aplicados a cofragens -vibradores de superfície -movimentos do betão -deformação do molde -fixação de peças embebidas
Inspeção das superfícies livres	Inspeção de base	Inspeção de base e aleatória: -leitada superficial -uniformidade da superfície -formação de crosta -momento do fim da compactação -momento do acabamento -proteção da superfície  Medição dos desvios da superfície de acordo com as especificações de projeto	Inspeção de base e aleatória: -leitada superficial -uniformidade da superfície -formação de crosta -momento do fim da compactação -momento do acabamento -proteção da superfície  Medição dos desvios da superfície de acordo com as especificações de projeto

As juntas de betonagem deverão estar limpas, isentas de leitada e convenientemente humedecidas. Os moldes deverão estar limpos de detritos, neve, gelo e água acumulada. Os elementos estruturais do solo deverão estar isolados com uma camada de betão de limpeza de pelo menos 50 mm, exceto se o recobrimento das armaduras for com isso diminuído.

Se for previsível a ocorrência de temperatura ambiente inferior a 0 °C no momento da betonagem ou durante o período de cura, devem ser tomadas precauções para proteger o betão contra os danos resultantes da congelação. Se for previsível a ocorrência de temperatura ambiente elevada no momento da betonagem ou durante o período de cura, devem ser tomadas precauções para proteger o betão contra efeitos prejudiciais.

O betão deve ser colocado e compactado de modo a assegurar que todas as armaduras e elementos a integrar no betão ficam adequadamente embebidos de acordo com as tolerâncias do recobrimento e que se obtém a resistência e durabilidade pretendidas. É necessário assegurar



uma compactação adequada nas mudanças de secção, em zonas apertadas, saliências, zonas de elevada densidade de armadura e juntas de construção.

Quadro 47 – Inspeção da proteção e cura

Item	classe de inspeção 1	classe de inspeção 2	classe de inspeção 3
Planeamento da inspeção		Procedimento de base a proteção contra a secagem prematura e a congelação  Procedimento para o controlo da temperatura  Sistema de monitorização da temperatura e registo da maturidade	Procedimento de base a proteção contra a secagem prematura e a congelação  Procedimento para o controlo da temperatura  Sistema de monitorização da temperatura e Registo da maturidade  Cálculo do desenvolvimento e Distribuição da temperatura de acordo com as especificações de projeto
Inspeção	Inspeção de base	Inspeção de base e aleatória: -Proteção contra a secagem prematura, maturidade -Proteção contra a congelação -Tempo de descofrarem, maturidade -Diferentes de temperatura	Inspeção de base e aleatória: -Proteção contra a secagem prematura, maturidade -Proteção contra a congelação -Tempo de descofrarem, maturidade -Diferentes de temperatura

Quadro 48 – Inspeção das operações pós betonagem

Item	classe de inspeção 1	classe de inspeção 2	classe de inspeção 3
Planeamento da inspeção		Instrução para inspeção de acordo com as especificações de projeto	
Inspeção	Verificação geométrica Inspeção de base	Verificação das geometrias  Resistência e maturidade na idade de descofragem  Aspeto da superfície: -Buracos -Ninhos de brita -Perda de leitada -Bolhas -Fissuras -Abertura de fissuras  Ligações: -Varões de espera -Parafusos ou varões roscados -Inserções -Acessórios  Recobrimento: -Verificação com medidor de recobrimento se requerido pelas especificações de projeto	

O ritmo de colocação e compactação deve ser suficientemente elevado para evitar juntas frias e suficientemente baixo para evitar assentamentos excessivos ou sobrecarga nos cimbres e nas cofragens. Pode formar-se uma junta fria durante a aplicação do betão se o betão da frente de betonagem fizer presa antes da aplicação e compactação da camada seguinte. Podem ser

necessários requisitos adicionais quanto ao processo de colocação em zonas em que forem estabelecidos requisitos especiais a respeito do acabamento da superfície.

A segregação deve ser minimizada tanto quanto possível durante a colocação e compactação. O betão deve ser protegido contra a radiação solar, vento forte, congelação, água, chuva e neve durante a colocação e compactação. O betão leve não deve ser bombado a não ser que, comprovadamente, a bombagem não afete significativamente a resistência do betão endurecido.

O anexo E (informativo) da NP EN 13670-1:2011 [22] intitula-se “Guia sobre betonagem”. Contém indicações sobre:

- Entrega, receção e transporte no estaleiro do betão fresco;
- Operações antes da betonagem;
- Colocação e compactação;
- Proteção e cura.

No que diz respeito à colocação e compactação são apresentadas regras complementares às que incluídas no corpo principal da pré-norma. A seguir mencionam-se algumas dessas regras:

- A compactação deverá ser efetuada por vibração interna, a não ser que seja acordado de outro modo;
- O betão deverá ser colocado tanto quanto possível perto da sua posição final;
- A vibração deve ser utilizada para compactar o betão e não como meio de movimentação do betão a distâncias apreciáveis;
- A vibração com agulha ou com vibradores acoplados aos moldes deverá ser aplicada sistematicamente após a colocação e até que a expulsão do ar seja completa e tenha praticamente cessado;
- Deverá ser evitado um excesso de vibração que possa provocar o enfraquecimento das camadas superficiais ou a segregação;
- A espessura da camada de betão colocada deverá ser normalmente inferior ao comprimento da agulha do vibrador;
- A vibração deverá ser sistemática e incluir a revibração da faixa superior da camada anterior;
- Quando se utilizarem cofragens perdidas, deverá ser levada em conta a energia que elas absorvem na escolha do método de compactação e na consistência do betão;

- Em secções de grande altura, recomenda-se voltar a compactar a camada superficial para compensar o assentamento plástico por baixo da armadura superior;
- Não deverá ser adicionada água, cimento, endurecedores de superfície ou outros materiais durante as operações de acabamento, a não ser que tal esteja especificado ou acordado.

O betão nas idades jovens deve ser objeto de cura e proteção:

- Para minimizar a retração plástica;
- Para assegurar uma resistência superficial adequada;
- Para assegurar uma durabilidade adequada na zona superficial;
- Para assegurar resistência à congelação;
- Para o proteger contra vibrações prejudiciais, impacto ou danos.

Se for utilizado betão de alta resistência, deverá ser prestada especial atenção à prevenção da fissuração por retração plástica. Os métodos de cura devem permitir obter baixas taxas de evaporação da superfície do betão ou manter esta permanentemente húmida. A cura natural é suficiente quando as condições atmosféricas durante o período de cura requerido forem tais que a taxa de evaporação da superfície do betão seja baixa, por exemplo, em clima húmido, chuvoso ou enevoadado.

Para betões submetidos a ambientes correspondentes às classes de exposição ambiental X0 e XC1, e só para estes, a duração mínima de cura deve ser de 12 h, desde que o início de presa não exceda 5 h, e a temperatura da superfície do betão seja igual ou superior a 5 °C.

A não ser que esteja especificado de outro modo em disposições válidas no local da construção, devem aplicar-se as seguintes regras:

- O betão utilizado em ambientes correspondentes às classes de exposição diferentes de X0 e XC1 deve ser curado até que a resistência da superfície tenha atingido, no mínimo, 50 % da resistência característica à compressão;
- Este requisito pode ser transformado em períodos de cura nas normas nacionais ou em disposições válidas no local da construção ou pode considerar-se satisfeito se forem cumpridos os períodos estabelecidos no Quadro 49.

Relativamente ao Quadro 49, o Documento Nacional de Aplicação da NP EN 13670-1:2008 [17] refere que o desenvolvimento da resistência do betão é o seguinte:

- Médio:  $0,5 < r \leq 0,3$
- Lento:  $0,3 < r \leq 0,15$ .

Não se aplica portanto a Nota 2 do Quadro 49 que permite interpolação linear entre os valores das linhas. Os períodos de cura indicados no Quadro 49 devem ser duplicados, pelo menos, no caso de superfícies de betão sujeitas à abrasão.

Quadro 49 – Períodos de cura mínimos para as classes de exposição da norma NP EN 206-1:2007 [2] diferentes de X0 e XC1

Temperatura da superfície do betão (t) em °C	Período mínimo de cura em dias <sup>1) 2)</sup>			
	Desenvolvimento da resistência do betão <sup>4)</sup>			
	$(f_{cm}^2 / f_{cm28}) = r$			
	Rápido $r \geq 0,50$	Médio $r = 0,30$	Lento $r = 0,15$	Muito $r < 0,15$
$t \geq 15$	1,0	1,5	2,0	3,0
$25 > t \geq 15$	1,0	2,0	3,0	5,0
$15 > t \geq 10$	2,0	4,0	7,0	10,0
$10 > t \geq 5$ <sup>3)</sup>	3,0	6,0	10,0	15,0

NOTA:

- 1) Mais o período de presa que exceda 5 h.
- 2) É aceitável a interpolação linear entre os valores nas linhas\*\*)
- 3) Para temperaturas inferiores a 5°C, a duração deve ser prolongada por um período igual ao tempo em que a temperatura foi inferior a 5°C.
- 4) O desenvolvimento de resistência do betão, r, é a razão entre a resistência média à composição aos 2 d e a resistência média à compressão aos 28 d determinados por ensaios prévios ou baseados em comportamento conhecido de betões de composição comparável (ver prEN 206: 1997\*).

Para a cura são adequados os seguintes métodos, usados separadamente ou em sequência:

- Manutenção das cofragens no seu lugar;
- Cobertura do betão com capas impermeáveis ao vapor fixadas nos extremos e nas juntas para evitar dissecação por correntes de ar;
- Colocação de coberturas húmidas sobre a superfície e manutenção do seu estado de humidade;
- Manutenção da superfície do betão visivelmente húmida com água adequada;
- Aplicação de uma membrana de cura de aptidão estabelecida.

Podem ser utilizados outros métodos de cura de igual eficácia. Não é permitida a utilização de membranas de cura em juntas de construção, em superfícies a tratar ou superfícies em que seja

pretendida a aderência a outros materiais, exceto se estas forem totalmente removidas antes da operação subsequente ou se provar que não têm efeitos prejudiciais nas operações subsequentes.

Exceto se for permitido nas especificações de projeto, as membranas de cura não devem ser utilizadas em superfícies especiais de acabamento.

Se o desenvolvimento das propriedades do betão for medido pela evolução da temperatura, a relação entre a resistência e a temperatura deverá ser estabelecida pelo organismo nacional de normalização. As estimativas de desenvolvimento das propriedades do betão podem basear-se num dos seguintes métodos:

- Cálculo da maturidade a partir de medições da temperatura efetuadas a uma profundidade máxima de 10 mm abaixo da superfície;
- Cálculo da maturidade baseada na média diária de temperatura do ar;
- Cura de provetes seguindo a temperatura da obra;
- Outros métodos, de aptidão estabelecida.

Exceto se for especificado de outro modo nas disposições válidas no local da construção, a temperatura máxima do betão num elemento não deve exceder 65 °C, a não ser que exista informação que prove que, com a combinação dos materiais que foi usada, temperaturas mais elevadas não terão efeitos adversos significativos no comportamento em serviço do betão. Os possíveis efeitos adversos de altas temperaturas no betão durante a cura incluem:

- Redução significativa de resistência;
- Aumento significativo da porosidade;
- Formação de etringite retardada;
- Aumento da diferença de temperatura entre o elemento betonado e o elemento previamente betonado.

Os requisitos para cura acelerada por aplicação interior ou exterior de calor e para o arrefecimento de secções com tubagens de arrefecimento embebidas não são apresentados na NP EN 13670-1:2011 [22].

Após a descofragem, todas as superfícies devem ser inspecionadas de acordo com a classe de inspeção, para avaliar a sua conformidade com os requisitos. A superfície deve ser protegida contra todos os danos e deteriorações durante a construção. Qualquer requisito respeitante aos

ensaios “in situ” do betão endurecido, à sua frequência e aos critérios de conformidade deve estar de acordo com as especificações de projeto.

A execução com betão especial, tal como betão de agregados leves, betão de resistência elevada, betão de agregados pesados, betão submerso, etc., deve estar conforme com as disposições válidas no local da construção, procedimentos acordados ou métodos conhecidos ou comprovados.

O betão para cofragens deslizantes deve ter uma presa adequada. O deslizamento das cofragens deve ser efetuado com equipamento adequado e de acordo com métodos que garantam a obtenção do recobrimento das armaduras especificado, da qualidade do betão e do acabamento da superfície. A utilização de cofragens deslizantes deverá ser controlada por um especialista. Deverá ser prestada especial atenção para controlar a velocidade de deslize das cofragens tendo em conta o tempo real de endurecimento do betão.

## **6 ESTUDO EXPERIMENTAL**

Com apoio na pesquisa bibliográfica que foi efetuada, desenvolveu-se uma metodologia de trabalhos a realizar e a testar com diferentes composições de betão.

Neste capítulo foi descrito todas as fases da investigação experimental, salientando essencialmente a produção das composições e os seus requisitos segunda a normalização, além disso dentro deste é referido todos os ensaios e condições de cura do betão produzido.

Para a realização dos ensaios na parte experimental foi adotado diferentes tipos de provetes cúbicos, estes foram escolhidos de acordo com a normalização dos referidos ensaios a realizar, os moldes utilizados foram em ferro fundido, devidamente retificados e calibrados.

Na realização dos ensaios de resistência de betão utilizou-se moldes cúbicos com as dimensões 150 x 150 x 150 mm de acordo com a norma NP EN 12390-3:2011 [29].

### **6.1 Propriedades e Conformidades dos Materiais Constituintes das Composições**

Neste subcapítulo são analisados todas as propriedades dos materiais que se utilizaram no fabrico das composições dos betões como também todas as suas conformidades. É descrito os ensaios para os referidos constituintes das composições com base nas respetivas normas.

No estudo de betões em causa, foram utilizado agregados normalizados produzidos em Portugal, tendo em vista betões com classes de resistência à compressão C 25/30 e C50/60, com uma classe de consistência S2.

Os materiais constituintes utilizados no fabrico do betão, nomeadamente os agregados e o cimento, estão de acordo com as normas em vigor e dispõem de marcação CE, tal como é exigido por norma.

### 6.1.1 Cimentos

No fabrico de betão, os cimentos mais utilizados correntemente são o cimento Portland (CEM I) e o cimento Portland composto (CEM II). O cimento Portland CEM I 42,5R apresenta uma excelente trabalhabilidade e um baixo calor de hidratação o que tornam especialmente adaptado a todos os trabalhos de construção e um excelente ligante para o estudo em causa.

No estudo em questão foi selecionado o cimento Portland CEM I 42,5R Figura 10 produzido pela Secil Companhia Geral de Cal e Cimentos, S.A., este é distribuído em sacos estanques de 40 kg de modo a minimizar a deterioração no tempo, com a devida certificação segundo a NP EN 197-1:2001 [5] e o certificado de conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124, tendo como constituintes na generalidade 95% a 100% de clínquer Portland e 0% a 5% outros constituintes.



Figura 10 – Cimento Portland CEM I 42,5R – Secil [30]

A NP EN 197-1:2001 [5] contém para os cimentos, as exigências mecânicas e físicas, químicos e de durabilidade. Para os diferentes tipos de cimentos comercializados existe uma resistência de referência, para resistência à compressão aos 28 dias, determinada de acordo com a NP EN 196-1:2006 [31].

O cimento em causa tem um calor de hidratação baixo e uma melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência, este tem um desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).



O tipo de cimento tem resistências últimas dentro dos valores da classe indicada tal como no Quadro 52 (resistências aos 28 dias), o seu desenvolvimento da resistência é sensível ao processo de cura tal como os outros cimentos.

A caracterização específica do cimento referente às propriedades químicas, físicas e mecânicas, é indicado nos quadros 49 a 51:

Quadro 50 – Características Químicas

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

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

Quadro 51 – Características Físicas

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

Quadro 52 – Características Mecânicas

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

Além, dos valores da resistência de compressão para as idades referidas no Quadro 52, realizou-se também para este tipo de cimento o comportamento das resistências ao longo do tempo, demonstrado na Figura 11.

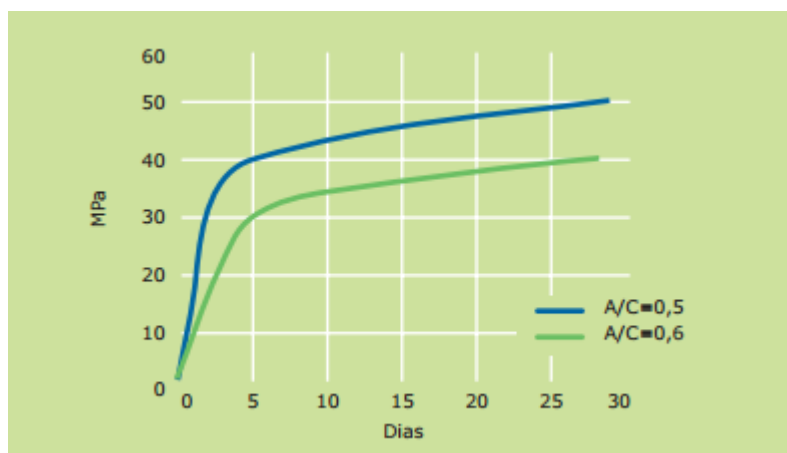


Figura 11 – Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II/A-L 42,5R [30]

### 6.1.2 Agregados

Os agregados utilizados para o estudo no fabrico do betão, foram fornecidos por uma empresa de exploração certificada, designada por Britaminho.

Os agregados são de origem granítica, uma brita e uma areia, todos extraídos na pedreira “Sorte do Mato das Lagedas” localizada em Guimarães, distrito de Braga.

Foi utilizado um agregado grosso com intervalo de dimensões 4 / 8 mm, 8 mm é a dimensão máxima do agregado do intervalo mencionado, como indicado na Figura 12 b).

Como agregado fino foi utilizado um de natureza granítica, tal como agregado grosso, também proveniente da mesma empresa, sendo designado por uma areia 0/4mm como se visualiza na Figura 12 a), referido nas fichas técnicas como Pó, este foi o mesmo para todas as composições estudadas.

Ambos agregados (fino e grosso) de natureza granítica são certificados pela própria empresa (Britaminho), a empresa emite regularmente uma ficha técnica de certificação, em que engloba todos os parâmetros físicos necessários ao dimensionamento das composições e por sua vez utilizados no método ACI 211.1-91 (Reapproved 2002) [32].



a)

b)

Figura 12 – a) Areia 0/4 mm; b) Brita 4/8 mm.

No Quadro 53 apresentam-se os resultados da análise granulométrica dos agregados selecionados segundo a NP EN 933-2:1999 [26].

Quadro 53 – Análise granulométrica dos agregados selecionados

Dimensão dos Peneiros (mm)	Brita 4/8 (% Acumulados passados)	Areia 0/4
25,0	-	-
22,4	-	-
20,0	-	-
16,0	100	-
14,0	100	-
12,5	95	-
11,2	79	-
10,0	46	100
8,0	14	-
6,3	6	100
5,6	-	-
5,0	-	99
4,0	1	84
2,0	1	63
1,0	1	45
0,5	1	29
0,25	1	19
0,125	1	11

O ensaio permitiu a elaboração do gráfico presente na Figura 13 relativo às suas curvas granulométricas.

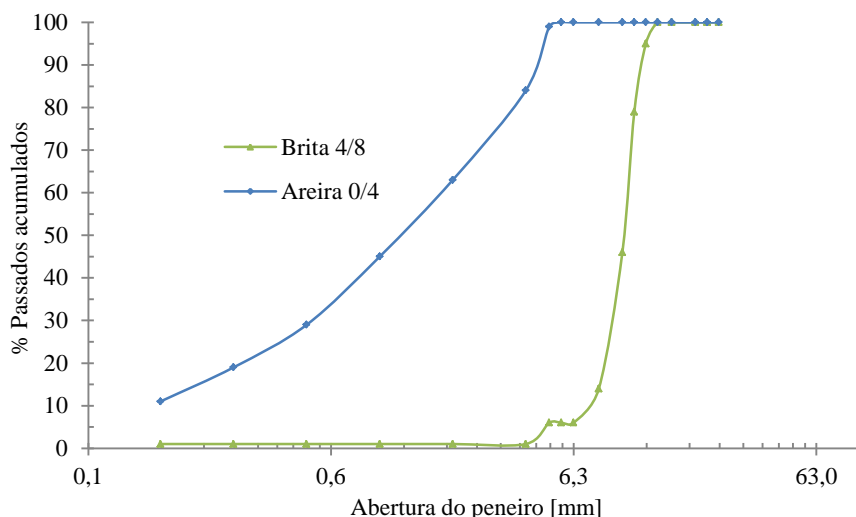


Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados, grosso e fino

### 6.1.3 Água

No fabrico do betão do estudo em causa em laboratório, foi utilizado a água potável da rede de abastecimento público da cidade de Guimarães, esta por sua vez satisfaz as condições normativas especificadas no capítulo 2.3.

No dimensionamento da quantidade de água para o fabrico dos betões do estudo, teve se a preocupação de contabilizar a capacidade de absorção dos agregados para cada amassadura, acrescentando-se assim a água necessária de forma a obter o valor considerado ótimo para se obter a trabalhabilidade pretendida e desejada.

### 6.1.4 Adjuvantes

No estudo em causa foi utilizado um adjuvante superplastificante comercial (BASF – Glenium Sky 617) tal como Figura 14 se indica, tendo como base de éter policarboxílico, indicado para a produção de betão com elevada manutenção de trabalhabilidade e durabilidade tal como indicado na sua ficha técnica.

Este produto utilizado teve como fim neste estudo reduzir o conteúdo de água comparativamente aos superplastificantes tradicionais, permitindo manter um maior tempo de trabalhabilidade; obter maiores resistências mecânicas às primeiras idades, relativamente aos

superplastificantes retardadores tradicionais e reduzir o conteúdo de água comparativamente aos superplastificantes tradicionais.



Figura 14 – Superplastificante da Basf - Glenium Sky 617

As suas vantagens são as diversas, tais como:

- Permitir a produção de betão com elevada classe de trabalhabilidade (sem segregação), de baixíssima relação A/C, e fluido, durante o tempo necessário ao transporte e colocação em obra;
- Melhorar o acabamento superficial,
- A elevada compacidade obtida no betão produzido;
- Comparativamente a um superplastificante tradicional retardador (de anteriores gerações), permite aumentar a durabilidade da obra e melhorar sensivelmente os valores de resistências iniciais e finais, retração, aderência às armaduras e impermeabilidade à água;
- Obtenção de uma redução de água superior, relativamente aos superplastificantes tradicionais.

Este adjuvante utilizado no estudo é um produto certificado pela marcação CE, no qual poderemos verificar no Quadro 54 seguinte as suas características técnicas.

Quadro 54 – Informação das características técnicas do adjuvante no estudo

Caraterísticas técnicas do Glenium Sky 617	
Função principal	Superplastificante / forte redutor de água
Marcação CE	NP EN 934-2:2009 como T11.1, T11.2
Aspeto	Líquido castanho
Densidade relativa (20 °C)	1,05 ± 0,02g/cm <sup>3</sup>
pH	7,3 ± 1,5
Teor em iões cloreto	<0,1 %
Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.	

### 6.1.5 Adições

A cinza volante como se observa na Figura 15 foi utilizada neste estudo como uma adição na produção das misturas, estas cinzas tiveram proveniência na central termoelétrica em Abrantes, Portugal. Este tipo de adição teve como objetivo reduzir a quantidade de cimento presente na mistura, melhorando a mistura em diversos fatores devidos às suas propriedades, uma das particularidades é a sua forma esférica como se verifica na Figura 16. A utilização deste material teve como objetivo a redução do consumo de energia, diminuição de emissões de CO2 e redução da quantidade de cimento na mistura.



Figura 15 – Aspeto da cinza volante

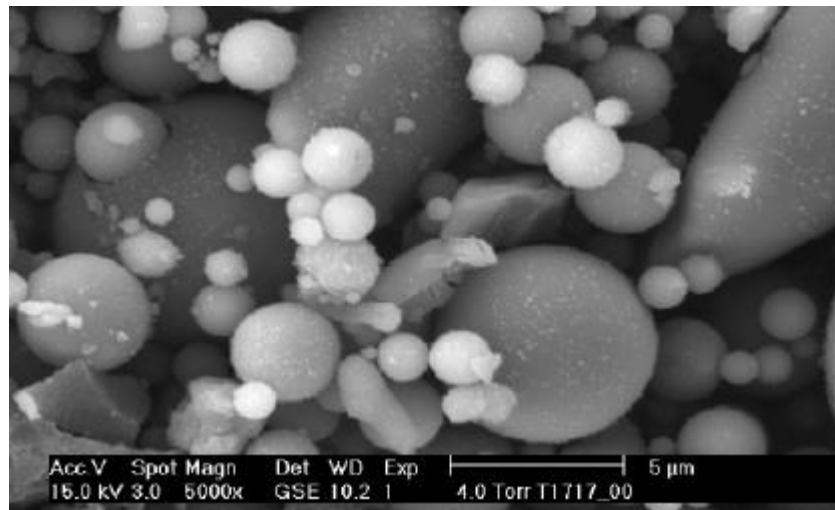


Figura 16 – Visualização ao microscópio de uma amostra de cinzas volantes [2]

## 6.2 Metodologia das Composições

### 6.2.1 Introdução

Neste subcapítulo é abordado o tipo de metodologia utilizada no fabrico dos betões, assim como método optado, também nesta fase é explicado toda a campanha experimental que resulta do estudo bibliográfico efetuado

Optou-se na investigação pelo método de composição de betões ACI 211.1-91 [32], este é provavelmente o método mais notável a nível mundial, tendo como base determinados aspetos positivos e boas características.

Os métodos de dimensionamento de betão fornecem uma aproximação de proporções a ser confirmadas em ensaios experimentais no laboratório ou campo, após esta verificação é necessário proceder aos ajustes das proporções e caso necessário de forma a produzir um betão com as características desejadas.

A seleção de proporções para o fabrico de betão é um compromisso de um equilíbrio entre a economia e a sua colocação em obra, tendo como base as suas características, resistência, durabilidade, densidade e aparência, estas são pretendidas em função da utilização que o betão vai ter e das condições de colocação em obra.

A disposição das diversas tabelas no método ACI, resultará as quantidades dos constituintes dos betões para cada caso em estudo, com objetivo de obter uma determinada resistência. O método é prática corrente em países onde os agregados são normalizados, tal como aqueles que foram utilizados no estudo em causa. Desde 2004 a marcação CE nos agregados é de carácter obrigatório em Portugal, surge assim a importância em aprofundar o estudo deste método de composição e adaptá-lo à realidade de Portugal, como também em Timor Leste.

Nesta fase foi planeado o fabrico de dois tipos de betões no estudo, nomeadamente um betão convencional, com e sem adições, o segundo tipo de betão designado por betão de elevado desempenho (BED) este também com e sem adições e adjuvantes, tal como se indica na Figura 17, ambos os tipos foram formulados segundo o método ACI 211.1-91 [32].

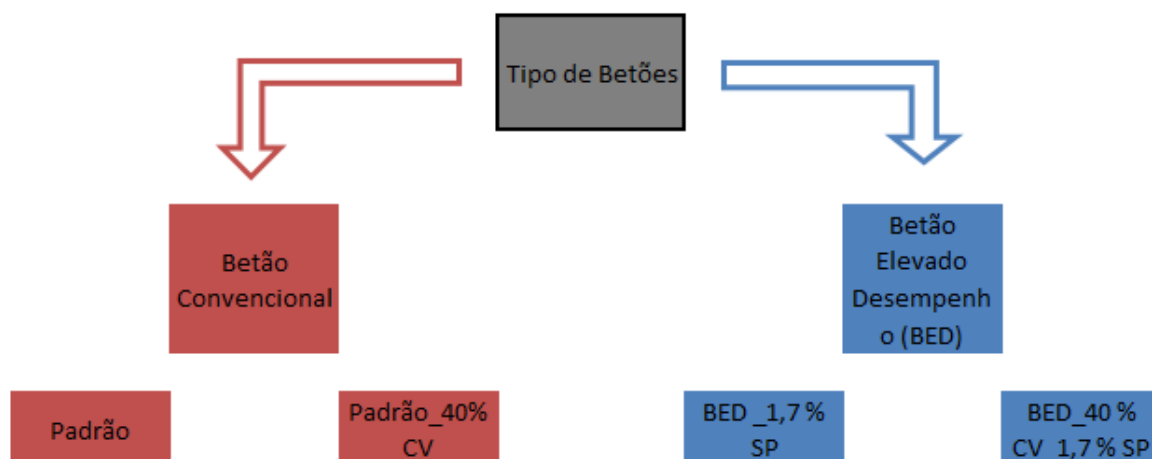


Figura 17 – Esquema do fabrico de betões no estudo desenvolvido

O estudo ilustrado na figura 6.4 Figura 17 foi efetuado no laboratório materiais de construção no qual foram produzidos todos os tipos de betões, tendo como objetivo a sua caracterização no estado fresco e no estado endurecido, através dos ensaios correntes dos betões como também efetuar a sua classificação.

### 6.2.2 Método ACI

O método ACI de composição de betões é o método mais conceituado no fabrico de betões, o mais utilizado mundialmente. Este método é baseado nos investigadores americanos (Abrams e Powers), sendo um documento que fornece uma metodologia para a seleção de proporções para a produção de betão com cimento, com ou sem adições ou adjuvantes ACI 211.1-91 [32], como já se tinha referenciado anteriormente.



Quando possível a seleção das proporções do betão, deve ser baseada em dados de ensaios ou experiências que foram efetuadas anteriormente, que envolvam os materiais que serão efetivamente utilizados. Quando esses dados são limitados ou inexistentes, as estimativas dadas posteriormente no decorrer do método devem ser utilizadas para uma primeira aproximação.

A informação que se segue dos materiais disponíveis pode ser vantajosa para a determinação da primeira aproximação:

- Análise granulométrica dos agregados;
- Densidade do agregado grosso;
- Massa específica e coeficiente de absorção dos agregados
- Requisitos de água de amassadura de composições de betões desenvolvidas;
- Experiência utilizando os agregados disponíveis;
- Relações entre a resistência à compressão e a razão a/c para as combinações
- Disponíveis de cimento e agregados;
- Massa específica do cimento Portland.

### **6.2.2.1 . Procedimento de Cálculo do Método ACI**

Na execução deste procedimento ACI é exigido uma sequência lógica de dimensionamento, nomeadamente para determinar as quantidades para ensaios laboratoriais. Esta sequência envolve vários passos de cálculo relacionados, em que são contempladas as características dos materiais disponíveis numa mistura adequada para o trabalho em causa.

As especificações da obra podem requerer ACI 211.1-91 [32]:

- Máxima razão água/cimento;
- Quantidade mínima de cimento;
- Quantidade de ar presente no betão;
- Abaixamento;
- Dimensão máxima dos agregados;
- Resistência;
- Outros requisitos relacionados com resistência; adjuvantes, tipos de cimento ou agregados especiais.

As quantidades de materiais para os provetes a ser ensaiados são adquiridas através de uma sequência de cálculo referida anteriormente, esta é dividida pelas seguintes fases:

### **Fase 1- Escolha do abaixamento (consistência)**

Nesta etapa o valor em causa (abaixamento) da consistência é especificado na NP EN 206-1:2007 [2] no Quadro 8, caso este valor não for especificado, um valor apropriado para o tipo de construção pode ser selecionado no Quadro 55, que relaciona diferentes trabalhos com o abaixamento máximo e mínimo recomendado para esse efeito.

Quadro 55 – Abaixamento recomendado em função do tipo de construção.

Tipo de Construção	Abaixamento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Fundações e muros de suporte reforçados	75	25
Fundações planas, caixotes, e paredes estruturais	75	25
Vigas e paredes reforçadas	100	25
Pilares de edifícios	75	25
Pavimentos e lajes	75	25
Betão em massa	75	25

### **Fase 2- Seleção da dimensão máxima do agregado**

Os agregados com dimensões máximas nominais bem graduados têm menos vazios do que os tamanhos menores, isso tem influência nos betões compostos por agregados de maior dimensão que requerem menos argamassa por unidade de volume de betão. Geralmente, a dimensão máxima do agregado deve ser a mais económica e a mais consistente em função das dimensões da estrutura.

### **Fase 3- Estimativa da quantidade de água de amassadura e ar contidos na mistura.**

Os diversos fatores tais como a dimensão máxima do agregado, forma das partículas, graduação dos agregados, temperatura do betão, quantidade de ar e a utilização de adjuvantes influencia a quantidade necessária de água por unidade de volume de betão a produzir, já em relação á quantidade de cimento ou materiais cementícios em valores normais o abaixamento não é afetado com tanta importância.

Relativamente ao tipo de textura e forma dos agregados, os requisitos da água de amassadura podem ser superiores ou inferiores aos do

Quadro 56, independentemente dessa razão os valores mencionados acima são o desejável para uma primeira estimativa das proporções.

Caso o abaixamento do ensaio inicial da mistura não for o pretendido, deve-se consoante o resultado aumentar-se ou diminuir a água aquela que foi estimada e adicionar mais ou menos 2 kg/m<sup>3</sup> do betão para cada aumento ou decréscimo de 10 mm de abaixamento.

Quadro 56-Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento.

Abaixamento	Água, kg/m <sup>3</sup> por betão para as dimensões máximas nominais dos agregados							
	9,5	12	19	25	37,5 (8)	50	75	150
Betão sem introdutores de ar								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
100 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Percentagem aproximada de ar preso em betão em sem introdutores de ar (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Betão com ar introduzido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
100 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Valor recomendado de quantidade de ar, Percentagem por nível de exposição (%)								
Exposição Baixa	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Exposição Moderada	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
Exposição Extrema	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

<sup>8</sup> Até à dimensão máxima do agregado de 37,5mm, agregados grossos arredondados geralmente requerem menos 18 kg/m<sup>3</sup> de água de amassadura para betões sem ar incorporado

#### Fase 4- Seleção da razão água/cimento

Quando é determinada a razão água/cimento é necessário considerar como requisito a resistência, esta variável isolada não é decisiva, terá de se contabilizar outros fatores adjacentes tais como os fatores de durabilidade.

Quadro 57 - Relação entre razão a/c e a resistência à compressão do betão.

Resistência à compressão aos 28 dias, MPa <sup>9</sup>	Razão água / cimento, por massa	
	Betão sem ar introduzido	Betão com ar introduzido
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,6
15	0,79	0,7

<sup>9</sup> Estes valores são estimados para a resistência média de betões que não contêm mais de 2% de ar introduzido. A resistência é baseada em cilindros com 150x300 mm curados em câmara húmida por 28 dias a uma temperatura de  $23 \pm 1,7$  °C. Esta relação de resistência assume uma dimensão máxima do agregado de 19 a 25mm e o cimento utilizado é o CEM I 42,5.

Diferentes agregados, cimentos e material cimentício originam diferentes resistências para a mesma razão a/c. Estes fatores obrigam a uma relação estudada entre a resistência e razão água/cimento para materiais usados na mistura.

Na falta de dados na relação entre razão a/c e a resistência à compressão do betão, relativamente ao uso do cimento tipo I nas misturas, poderemos recorrer aos valores do Quadro 57, estes serão valores aproximados e conservativos para os betões.

Os valores tabelados de a/c e a/ (c+ad), o “ad” corresponde às adições, devem obter as resistências previstas aos 28 dias para usos de materiais correntes.

A resistência média à compressão deverá exceder o valor característico (fck), isto é, numa margem suficiente de forma a manter o número de ensaios dentro dos limites expressos no ACI 214R-2:2002 [34] e no ACI, 318:2008 [35].

A resistência do betão é considerada suficiente desde que o valor médio de três ensaios consecutivos de resistência à compressão seja superior ao fck. Nenhum valor individual deve ser inferior ao fck em mais de 3,4 MPa para resistências inferiores a 35 MPa ou inferior em 10% para resistências superiores a 35 MPa.

### Fase 5- Cálculo da quantidade de cimento

A quantidade de cimento por unidade de volume de betão é fixada pela fase 3 e 4. O cimento requerido é igual à água de amassadura estimada na fase 3 e dividida pela razão a/c definida na fase 4.

### Fase 6- Estimativa da quantidade de agregado grosso

Os agregados com a mesma granulometria e dimensão máxima vão produzir betões com uma trabalhabilidade satisfatória, isto é quando um determinado valor do agregado grosso em determinadas condições (completamente seco), é utilizado por unidade de volume de betão.

Quadro 58 - Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão.

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Volume de agregado grosso <sup>10</sup> por unidade de volume de betão para diferentes módulos de finura <sup>11</sup> de agregado fino			
	2,4	2,6	2,8	3
9,5	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,8	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

<sup>10</sup> Os volumes são baseados em agregados em condições descritas no ASTM C 29 [38] Estes volumes são selecionados através de relações empíricas para produzir betões com um grau de trabalhabilidade adequado ao tipo de construção usual.

<sup>11</sup> O cálculo do módulo de finura foi baseado no método ASTM 136 [39]

O volume de agregado é dado no Quadro 58 para um determinado valor desejável. Pode verificar-se que no Quadro 58 para uma igual trabalhabilidade da mistura, o volume de agregado grosso por unidade de volume de betão depende apenas da dimensão máxima do agregado e do módulo de finura do agregado fino.

A massa de agregado grosso seco requerida para um metro cúbico de betão é igual ao valor retirado do quadro 12 multiplicado pela baridade do agregado em  $\text{kg/m}^3$ .

### Fase 7- Estimativa da quantidade de agregado fino

Finalizada a fase 6 todos os constituintes do betão fora estimada à exceção do agregado fino. A sua quantidade é determinada pela diferença. Existem dois procedimentos o “método do peso” ou o “método do volume absoluto”

O seguinte Quadro 59 pode ser utilizado para uma primeira estimativa caso não haja informação anterior.

Quadro 59 - Primeira estimativa para massa do betão fresco.

Dimensão máxima nominal do agregado, mm	Primeira estimativa de massa unitária de betão, Kg/m <sup>3</sup> <sup>12</sup>	
	Betão sem ar introduzido	Betão com ar introduzido
9,5	2280	2200
12,5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37,5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

<sup>12</sup>Estes valores são calculados pela equação (4) para betões de riqueza em cimento média (330kg de cimento por m<sup>3</sup>) e abaixamento médio para agregados com 2,7 kg/dm<sup>3</sup> de massa específica.

É desejado que para diferenças de 20kg na quantidade de cimento tendo como referência 330kg, seja corrigido a massa por m<sup>3</sup> em 3kg na direção correta. O mesmo acontece com massa específica dos agregados, para diferenças de 0,1 que se desviem de 2,7, a massa deve ser corrigida em 60kg na direção correta.

### Fase 8- Ajustes das quantidades de agregados finos e grossos

A quantidade de agregado efetivamente a ser pesada deve considerar o teor de humidade que estes apresentam, normalmente estes contém uma determinada percentagem de humidade natural. O peso deve ser aumentado na percentagem de água em relação á humidade que os agregados contém, tanto absorvida como presente na sua superfície.

A fórmula para calcular a massa do betão fresco por m<sup>3</sup> é:

$$U_M = 100G_a(100 - A)C_Mx \frac{1 - G_a}{G_c} - W_M(G_a - 1) \tag{6.1}$$

Definindo as variáveis como:

${}^m U$  – Massa unitária do betão fresco,  $\text{kg/m}^3$

${}^a G$  – Média ponderada da massa específica do combinado agregado grosso/fino

${}^c G$  – Massa específica do cimento (geralmente 3,15)

A – Quantidade de ar, em percentagem

${}^m W$  – Requisito de água de amassadura,  $\text{kg/m}^3$

${}^m C$  – Requisito de cimento,  $\text{kg/m}^3$

A água de amassadura adicionada para o provete a ensaiar deve ser reduzida numa quantidade igual à humidade livre presente nos agregados.

### **Fase 9- Ensaios e ajustes das quantidades**

As proporções da mistura calculada devem ser verificadas através de ensaios laboratoriais e ensaiados de acordo com o ASTM C192:2007 [36] ou em ensaios de campo.

Caso os resultados obtidos nos ensaios realizados não sejam os atendidos, é necessário verificar e recalculas as quantidades de modo a obter as características desejadas.

## **6.3 Estudo Da Composição Dos Betões Com Agregados Normalizados**

### **6.3.1 Cálculo Do Módulo De Finura**

A determinação do módulo de finura dos agregados é fundamental na formulação do betão a fabricar, este parâmetro é calculado com base na fórmula 6.1 exemplificado no Quadro 60. Este critério é determinado como o total das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro da série normal, compreende-se como a série normal, o conjunto de peneiros com abertura de malha correspondente à progressão geométrica de razão 2 iniciada no peneiro de abertura 0,125mm e alongada até à máxima dimensão do agregado [32].

O módulo de finura foi calculado para o agregado 0/4, obtendo-se um valor de módulo de finura de 3,29 como demonstrado na fórmula 6.2.

$$M.F. = \frac{\Sigma[(100 - 0) + (100 - 1) + (100 - 8) + (100 - 32) + (100 - 53) + (100 - 68) + (100 - 78) + (100 - 89) + (100 - 97)]}{100} = 3,29 \quad (6.2)$$

Quadro 60 – Módulo de finura – Agregado Fino

Agregados	Módulo de Finura	$\mu$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
0/4	3,29	2,67
4/8	5,88	2,66

### 6.3.2 Baridade

A determinação do parâmetro da baridade dos agregados foi efetuado segundo a norma ASTM C29/C29M:2009 [38], esta norma descreve um método para a determinação da baridade dos agregados em condições compactadas ou não compactadas.

O cálculo da baridade em Portugal é determinado pela norma NP EN 1097-3:2002 [38], contudo neste estudo foi optado pelo método americano, uma vez que é o utilizado no método ACI 211.1-91:2002 [32].

A baridade é relação entre a massa de uma quantidade de agregado e a unidade de volume incluindo os vazios, denominada como densidade aparente.

Para a realização do ensaio deve ser conhecido o volume do recipiente a usar no ensaio, tal como este verificar as dimensões mínimas adequadas ao agregado a ensaiar. Este deverá ter uma forma cilíndrica em metal e inoxidável, quanto á relação entre a altura interior ( $h_i$ ) e o diâmetro interior ( $d_i$ ) devem estar compreendidos num intervalo de 0,5 a 0,8, tal como indicado na Figura 18.

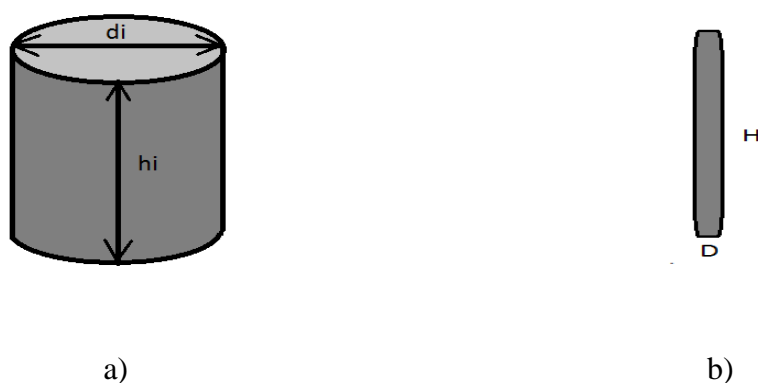


Figura 18 – a)Relação entre a altura e o diâmetro do recipiente do ensaio da baridade; b) Varão de compactação



Para efetuar este ensaio deve-se usar um varão de compactação de secção transversal circular e desempenado, com diâmetro de  $D (16 \pm 1)$  mm e comprimento de  $H (600 \pm 5)$  mm e com as extremidades arredondadas.

O recipiente deve conter uma superfície interna lisa e munida de alguma rigidez, isto para não se deformar com os diversos materiais a ensaiar, mesmo em caso de choques na execução da compactação dos agregados. A parte superior do recipiente deve ter o bordo liso, plano e paralelo ao fundo do mesmo.

Quadro 61 - Capacidade do recipiente usado no ensaio da baridade segundo a norma ASTM C29/C29M:2009 [38]

Dimensão máxima do agregado (mm)	Capacidade do recipiente (lt)	Capacidade do recipiente utilizado no estudo (L)
4	-	3,4
8	-	3,4
12,5	2,80	-
25	9,30	-
37,5	14,00	-
75	28,00	-
100	70,00	-
125	100,00	-

De acordo com a dimensão máxima do agregado deve-se também usar uma balança com capacidade adequada, com erro máximo admissível de 0,1% da massa do provete elementar.

A preparação dos provetes a ensaiar devem ser secos a  $(110 \pm 5)$  °C até massa constante e cada provete elementar deve estar compreendida entre 125 a 200% da massa necessária para preencher o recipiente.

No início do ensaio deverá ser verificado se o recipiente se encontra vazio, seco e limpo, posteriormente á sua verificação pesar a sua massa (T) e determinar o seu volume (V).

O procedimento do ensaio consiste em encher três camadas iguais no recipiente com o agregado a ensaiar, cada uma das camadas deve ser apiloada com 25 pancadas uniformemente repartidas pela camada usando o varão de compactação.

A última camada deve ser alisada de forma a preencher os vazios na superfície, após esta operação deve-se efetuar a pesagem do recipiente cheio e registar a massa com a precisão de 0,1% (G).

Após a execução dos procedimentos anteriores deverá efetuar-se o cálculo da baridade (M), como demonstrado na fórmula 6.3e repetir o ensaio para três provetes elementares.

$$Mi = \frac{G - T}{V} \quad (6.3)$$

Variáveis do calcula da baridade:

Mi – Baridade [kg/m<sup>3</sup>];

G – Massa do recipiente e do provete elementar [kg];

T – Massa do recipiente vazio [kg];

V – Volume do recipiente [m<sup>3</sup>].

No estudo em causa foram ensaiados três provetes por dimensão máxima do agregado, de acordo com os procedimentos na norma e de forma a adquirir maior exatidão no ensaio. Os valores da baridade para a dimensão máxima do agregado foram calculados e apresentados no quadro 17, expondo assim os diferentes valores de ensaio.

Quadro 62 – Cálculo da baridade do agregado máximo usado no estudo.

D <sub>Máx.</sub> Agregado (mm)	Amostra	G (kg)	T (kg)	V (m <sup>3</sup> )	Mi (kg/m <sup>3</sup> )	M (kg/m <sup>3</sup> )
8	A	27,362	8,8233	0,013473	1375,99	1365,92
	B	27,101			1356,62	
	C	27,216			1365,15	

Para o agregado com a D<sub>máx.</sub> 8 mm, foi verificado uma baridade de 1365 kg/m<sup>3</sup>, sendo este um valor corrente comparado com outros da mesma natureza.

### 6.3.3 Dimensionamento Pelo Método ACI Das Misturas de Betão do Estudo

Nos capítulos 6.2.2 e 6.2.2.1 foram apresentadas as expressões e a metodologia do ACI, no qual resultaram as diferentes composições com as dosagens por metro cúbico, com objetivo de obter um betão com um determinado comportamento e propriedades e características desejadas.

A campanha experimental dos betões estudados foi dimensionada de acordo com as normas NP EN 206-1:2007 [2] e LNEC E 464:2007 [25], resumidamente é apresentado no Quadro 63 os principais dados do dimensionamento, que permitiram a realização do método ACI para as quatro composições efetuadas.

Quadro 63 - Principais elementos de dimensionamento para as composições do estudo

Composições	Classe de resistência pretendida (MPa)	Dimensão máxima do agregado (mm)	Abaixamento (14) (mm)	Razão A/C fixada (15)
B1	C25/30	8	75-100	0,54
B1_CV		8		
B2_1,7%SP	C50/60	8		0,29
B2_40%CV_1,7%SP		8		

<sup>14</sup> Valor retirado do

Quadro 56 – Capítulo 6.2.2

<sup>15</sup> Valor retirado do Quadro 58 – Capítulo 6.2.2

O método ACI 211.1-91 [32] utilizado no estudo propõe uma razão A/C ótima para várias classes de resistência à compressão, desta forma fixa-se a variável da razão A/C e altera-se a dimensão máxima dos agregados, isto para o mesmo abaixamento pretende-se verificar validade do método quando são mais usados os constituintes produzidos em Portugal, sobretudo o cimento e os agregados.

**Fase 1** - Seleção do abaixamento pretendido – 75 a 100 mm

**Fase 2** - Dimensão máxima do agregado – 8 mm

**Fase 3** - Cálculo da quantidade de água da mistura e do ar contido na mistura

Com o auxílio da informação do Quadro 56 designado no Capítulo 6.2.2 foi realizado um gráfico da Figura 19, o Quadro 64 engloba as dimensões máximas dos agregados utilizados no estudo da mistura.

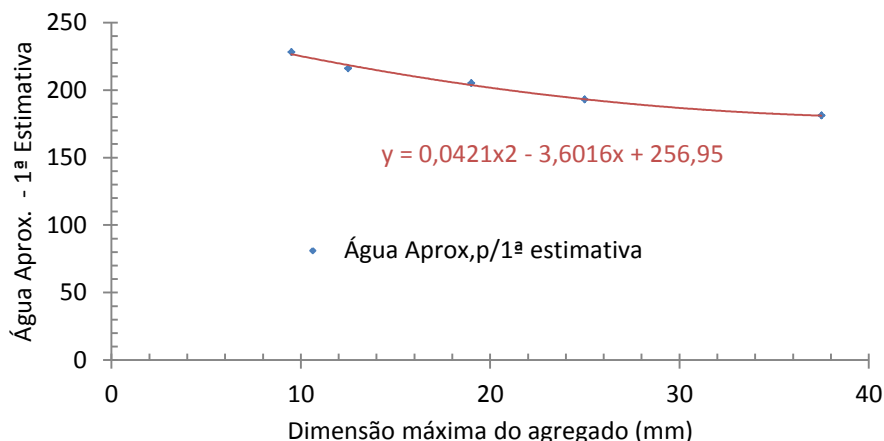


Figura 19 – Alteração da quantidade de água indispensável para a amassadura com a dimensão máxima do agregado

Com recurso á ferramenta do Excel, foi retirada a linha de tendência polinomial da Figura 19, na qual sobre esta se efetuou a estimativa da quantidade de água essencial para as seguintes dimensões máximas do agregado.

$$y = 0,0421x^2 - 3,6016x + 256,95... \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

A estimativa de água calculada com o recurso da linha de tendência polinomial relativamente á dimensão máximas dos agregado foi de 231 kg/m<sup>3</sup> por betão.

Quadro 64 - Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento (Adaptada do ACI 211.1-91 [32])

Abaixamento (mm)	Água, kg/m <sup>3</sup> por betão para as dimensões máximas nominais dos agregados				
	8	9,5	12,5	19	25
Betão sem introdutores de ar					
75 a 100	231	228	216	205	193

**Fase 4 - Escolha da razão água/cimento**

Neste item o método já determina valores fixados para a razão A/C para diferentes resistências média à compressão usando provetes cilíndricos.

Segundo as resistências médias dos provetes cilíndricos de 34MPa e 64MPa para um betão C30/37 e um C60/75 respetivamente, o valor correspondente da razão A/C foi obtido por interpolação Quadro 65.

Quadro 65 - Relação entre razão a/c e a resistência à compressão do betão (Adaptada do ACI 211.1-91 [32])

Resistência média á compressão aos 28 dias (MPa) (16)	Razão A/C por massa	
	Betão sem ar introduzido	Classe do betão
60	0,29	C 50 / 60
40	0,42	-
35	0,47	-
30	0,54	-
25	0,61	C 20 / 25
20	0,69	-
15	0,79	-

<sup>16</sup> Cálculo baseado em provetes cilindros de secção 150x300mm

**Fase 5 – Dimensionamento da quantidade de cimento**

Após fixada a quantidade de água a usar na primeira estimativa (Fase 3) e a razão A/C fixada (Fase 4) realizou-se o dimensionamento da quantidade de cimento como se verifica no Quadro 66 e no qual a aplicar em cada amassadura.

Quadro 66 - Quantidade de cimento no qual a aplicar em cada amassadura

Misturas	Classe Resistência (MPa)	R=A/C	% SP	D <sub>máx.</sub>	Quantidades de Materiais		
					Água (kg/m <sup>3</sup> ) - D	Cimento (kg) - B	Cinza Volante (kg)
B1	C 25 / 30	0,54	-	8	231	428	-
B1_CV			-	8	231	257	171
B2_1,7%SP	C 50 / 60	0,29	1,7	8	185	637	-
B2_40%CV_1,7%SP			1,7	8	185	382	255

**Fase 6 – Dimensionamento da quantidade do agregado grosso**

No Quadro 67 é facultado o valor apropriado para o volume de agregado grosso, no qual este depende do módulo de finura, calculado em 6.3.1 e da dimensão máxima do agregado.

No Quadro 58 proposto na secção 6.2.2 foi construído um gráfico no qual visualizamos na Figura 20 o volume de agregado grosso por unidade de volume de betão para o módulo de finura de 2,61.

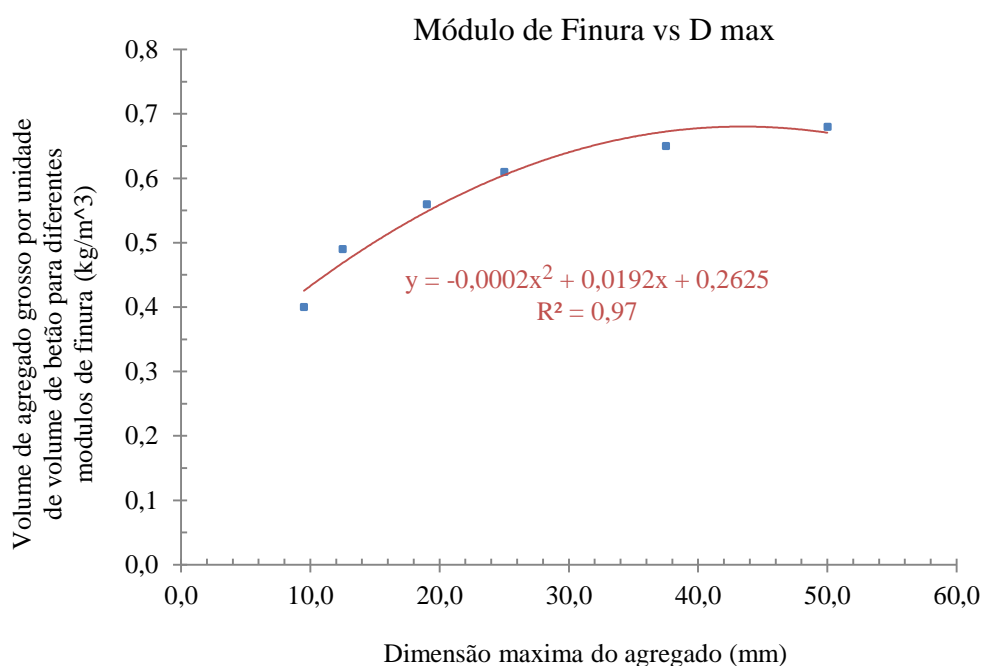


Figura 20 – Volume de agregado grosso em função da dimensão máxima do agregado para o módulo de finura do agregado fino.

Na Figura 20 foi calculado uma linha de tendência polinomial na qual se efetuou o cálculo do valor apropriado de volume de agregado grosso para as dimensões máximas de agregados presentes no estudo.

$$y = 0,0002x^2 - 0,0192x + 0,2625 \tag{6.5}$$

Quadro 67 - Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão (Adaptado ACI)

D <sub>máx.</sub> Nom.do agregado (mm)	Volume de Agregado Grosso por unidade de volume de betão para diferentes módulos (kg/m <sup>3</sup> )		
	3,00	3,30	3,80
4,0		0,260	
8,0		0,377	
9,5	0,440	0,400	0,360
12,5	0,530	0,490	0,450
19,0	0,600	0,560	0,520
25,0	0,650	0,610	0,570
37,5	0,690	0,650	0,610
50,0	0,720	0,680	0,640

A massa de agregado grosso seco requerida para um metro cúbico de betão (Quadro 68) é igual ao valor retirado do Quadro 68 multiplicado pela baridade do agregado em kg/m<sup>3</sup>.

$$\text{Quantidade Ag.} = \text{Vol. Ag.} \times \text{Baridade} \quad (6.6)$$

Quadro 68 - Quantidade de agregado grosso utilizado na amassadura.

Mistura	D <sub>máx.</sub> do Agregado (mm)	Volume de agregado grosso	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de agregado grosso (kg)
Padrão - B1				
B1 + 40% CV	8	0,377	1366	514,31
BED - B2 + 1,7% SP				
BED - B2 + 40% CV + 1,7% SP				

### Fase 7 – Estimativa da quantidade de agregado fino

Até á fase anterior (**Fase 6**) todos os componentes do betão foram estimados à exceção do agregado fino, este é determinado pela diferença entre o valor sugerido no Quadro 69 e o somatório da quantidade dos materiais constituintes, obtendo assim a sua quantidade para o fabrico do betão.

Foi elaborado um gráfico representado na Figura 21 do qual se retirou a linha de tendência polinomial (equação 6.7) através da qual se calculou o valor da massa unitária de betão para a 1º estimativa.

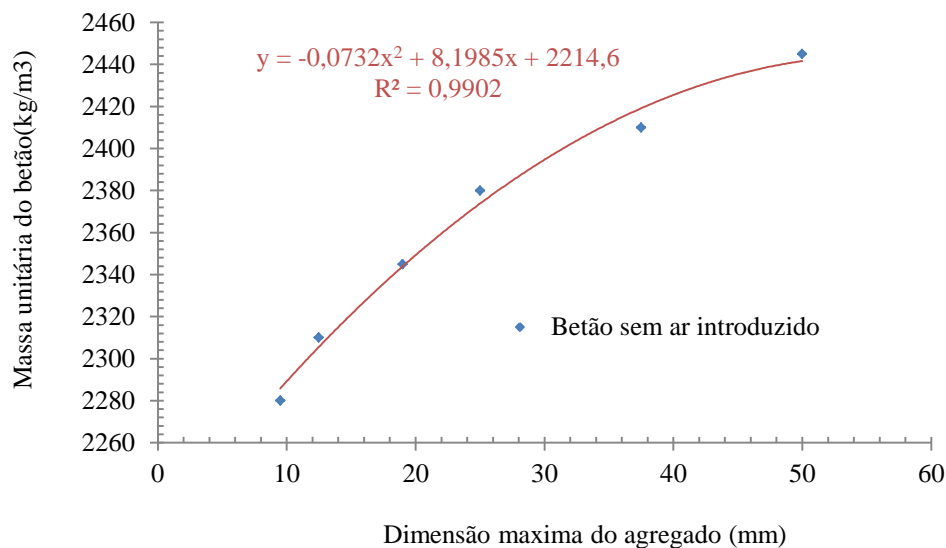


Figura 21 – Variação da massa unitária do betão com dimensão máxima do agregado

$$y = 0,0732x^2 + 8,1985x + 2214,6 \quad (6.7)$$

Os valores indicados no ACI 211.1-91 [32] são calculados para betões com elevada percentagem em cimento, que no geral é de 330kg de cimento por m<sup>3</sup>, abaixamento médio (75 a 100mm) para agregados com 2,7 kg/dm<sup>3</sup> de massa específica.

É pretendido que para as diferenças de 20kg na quantidade de cimento, tendo como referência os 330kg referido anteriormente, seja corrigido a massa por m<sup>3</sup> em 3kg no sentido correto. Na massa específica dos agregados, para as diferenças de 0,1 que o valor se desvie em 2,7, a massa deve ser corrigida em 60 kg no sentido correto, foram considerados e registados ajustes no Quadro 69 de forma a obter um cálculo da percentagem de agregado mais precisa.



Quadro 69 - Primeira estimativa para massa do betão fresco (Adaptado do ACI)

D <sub>máx</sub> agregado (mm)	1ª Estimativa de massa unitária de betão (kg/m <sup>3</sup> )
	Betão sem ar introduzido
8	2280
9,5	2280
12,5	2310
19	2345
25	2380
37,5	2410
50	2445

Como se viu em 6.2.2, o ACI 211.1-91 [32] sugere dois métodos para a estimativa da quantidade de agregado fino, no caso do estudo presente, a estimativa foi calculada pelo método do peso.

A quantidade de agregado fino é calculada pela diferença sugerida na Equação 6.8, isto é, subtraindo à primeira estimativa para a massa do betão fresco o somatório do peso de todos os seus constituintes com a exceção da parcela correspondente ao agregado fino, ou seja, o somatório da quantidade de cimento, quantidade de agregado grosso e quantidade de água calculadas anteriormente.

$$E = A - \sum (B + C + D) \quad (6.8)$$

Onde:

A – Primeira estimativa para a massa do betão fresco [kg/m<sup>3</sup>]

B – Quantidade de cimento [kg/m<sup>3</sup>]

C – Quantidade de agregado grosso [kg/m<sup>3</sup>]

D – Quantidade de água [kg/m<sup>3</sup>]

E – Quantidade de agregado fino [kg/m<sup>3</sup>]

Utilizando assim para primeira estimativa da massa do betão fresco os valores expressos no Quadro 70, foi calculada a percentagem de agregado fino para cada uma das amassaduras experimentais em função da dimensão máxima do agregado de cada uma das misturas.

Quadro 70 - indica as quantidades de cada constituinte utilizada para a realização de cada amassadura.

Compo sição	Razão (a/c)	Dmáx. Agrega do (mm)	1ª Estimativa de massa unitária de betão (kg/m <sup>3</sup> )	Ajustes dos Valores da 1ª Estimativa de massa unitária de betão fresco (kg/m <sup>3</sup> ) (A)	Quantid e de Cimento (kg) - B	Quantid e de Ag. Grosso (kg) - C	Quantid e de Água (kg/m <sup>3</sup> ) - D	Quantidade de Ag. (kg) - E
B1	0,54	8	2280		427	288,46	231	1333,43
B2	0,29		2280		796	288,46	231	964,92

### Fase 8 – Ajuste das quantidades de agregados finos e grossos

Quando se efetua a pesagem do agregado definitivo a ser usado, deve-se considerar o teor de humidade que estes contêm, estes normalmente estão húmidos e daí ser necessário contabilizar o peso da humidade. Este peso deverá ser corrigido na percentagem de água, tanto absorvida como presente na sua superfície.

No caso deste estudo os agregados foram previamente secos em estufa, daí o ajuste efetuar-se na água de amassadura calculada para a realização das amassaduras (Quadro 71). A percentagem de água que será absorvida pelos agregados aquando da amassadura contabilizada com base no coeficiente de absorção fornecido nas fichas técnicas.

Quadro 71 - Ajuste da quantidade de água de amassadura

Composição	Dimensão dos Agregados		Coeficiente de Absorção de água (W)		Quantidade de água (kg/m <sup>3</sup> )	
	Agregado Fino (mm)	Agregado Grosso (mm)	Agregado Fino (mm)	Agregado Grosso (mm)	Calcula no 3º Fase (kg/m <sup>3</sup> )	Ajuste
Padrão - B1	0/4	4/8				
B1 + 40% CV	0/4	4/8				
BED - B2 + 1,7% SP	0/4	4/8	0,2	0,6	231	0
BED - B2 + 40% CV + 1,7% SP	0/4	4/8				

## Fase 9 – Ensaio e ajustes das quantidades

Após os cálculos anteriores de todas as fases, as composições estudadas devem ser testadas de acordo com o documento ACI. Estas composições de betão devem ser confirmadas com ensaios laboratoriais de forma a comprovar se os resultados obtidos são os supostos, no caso contrário será fundamental um ajuste das composições e rever as suas quantidades.

### 6.3.3.1 Betão Convencional

Após o dimensionamento geral dos betões do estudo, foi efetuado algumas alterações a um dos dois betões convencionais, no qual um deles se fez incorporação de cinzas volantes, as restantes características foram todas fixadas.

Quadro 72 - Ajustes da quantidade do cimento e cinza volante

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m <sup>3</sup> )
	Agregados grossos 4/8 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Cinzas Volantes Sines (kg/m <sup>3</sup> )	
B1	288,46	1333,43	427,47		231
B1 + 40% CV			256	171	

No estudo dos betões convencionais foi introduzido as cinzas volantes, no qual foi substituído pelo cimento em 40 % com objetivo de estudar e poder comparar resultados do betão convencional de referência com o betão com cinzas volantes. Esta substituição vai permitir um betão mais sustentável e com as mesmas propriedades de certificação.

A utilização das cinzas volantes minimiza o problema de impacto ambiental utilizando-as como um subproduto industrial e otimizando para a diminuição do consumo de cimento, contribuindo assim na redução de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Utilização deste subproduto (cinzas volantes) nos betões torna o produto final viavelmente económico que os restantes no mercado e com as mesmas características.

### 6.3.3.2 Betão de Elevado Desempenho - BED

Tal como no subcapítulo 6.3.3.1 foi efetuado o mesmo procedimento de substituição do cimento pelo material subproduto, a cinza volante, neste caso num betão de elevado desempenho (BED).

Quadro 73 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m<sup>3</sup> de betão

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m <sup>3</sup> )
	Agregados grossos 4/8 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Cinzas Volantes Sines (kg/m <sup>3</sup> )	
B2+1,7% SP	288,46	1124,12	636,78		231
B2 + 40%CV + 1,7% SP			382	255	

A introdução das cinzas volantes no BED foi pelas mesmas razões referidas no subcapítulo 6.3.3.1.

### 6.3.4 Composições estudadas

No Quadro 74 são apresentadas resumidamente as diferentes misturas de betões e as quantidades de materiais fundamentais para a execução de 1m<sup>3</sup> de betão.

Quadro 74 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m<sup>3</sup> de betão

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m <sup>3</sup> )
	Agregados grossos 4/8 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Cinzas Volantes Sines (kg/m <sup>3</sup> )	
Padrão		1333,43	427,47		
Padrão_40% CV	288,46		256	171	231
BED_1,7% SP		1124,12	636,78		
BED_40%CV_1,7% SP			382	255	

O estudo das misturas de betão consiste na produção de provetes cúbicos com as dimensões de 150mm de aresta, de acordo com a norma NP EN 12390-3:2009 [41], na produção recorreu-se a moldes em ferro fundido, que previamente são retificados e calibrados.

Na realização das amassaduras foi essencial produzir cerca de 0.035 m<sup>3</sup> de betão que foram justificados pela necessidade de enchimento de 9 moldes, 0.030 m<sup>3</sup>, além desta quantidade foi necessário betão para realizar o ensaio de abaixamento, cerca de 0.0045 m<sup>3</sup>, finalizando uma quantidade total igual a 0.0345 m<sup>3</sup> que continuamente foi arredondada de forma a compensar todas as perdas de betão, assim como garantir o enchimento homogêneo dos moldes.

De maneira a garantir que a quantidade de água que foi utilizada nas misturas de betões era exatamente aquela que foi dimensionada anteriormente, foi imperterível aplicar agregados devidamente secos. Foi necessário proceder ao ajustamento da água desses agregados secos de maneira que estes não absorvessem parte da água necessária, e que garantisse uma correta reação com os ligantes, tendo em consideração o coeficiente de absorção de água, indicado na ficha técnica do material.

Desta forma a quantidade de água necessária é contabilizada através da seguinte expressão:

$$\text{Quantidade água} = w + w_{0.4} * Q. \text{Agregados grossos} + w_{0.1} * Q. \text{Agregados finos} \quad (9)$$

Em que:

W – Quantidade de água necessária para a amassadura calculada pelo método ACI

W<sub>0,4</sub> – Coeficiente de absorção de água do agregado grosso, %;

W<sub>0,1</sub> – Coeficiente de absorção de água do agregado fino, %;

No Quadro 75 encontram-se as quantidades de materiais para cada amassadura, tendo em ponderação a adição de água descrita anteriormente.

Quadro 75 - Quantidade de material necessário para a realização de 0.035 m<sup>3</sup> de betão

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m <sup>3</sup> )
	Agregados grossos 4/8 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Cinzas Volantes Sines (kg/m <sup>3</sup> )	
B1		98,47	31,57		
B1 + 40% CV	21,31		18,94	12,63	17,05
B2+1,7% SP		83,03	47,03		
B2 + 40%CV + 1,7% SP			28,22	18,81	

Após a conclusão do dimensionamento global das quantidades de materiais a utilizar nas misturas, procedeu-se á realização do trabalho em laboratório.

### **6.3.5 Realização da amassadura**

Na execução das misturas de betão optou-se por uma betoneira de eixo vertical, constituída por três pás rasantes com diferentes dimensões tal como se verifica na Figura 22, a betoneira em causa tem uma capacidade 90 lt por mistura de betão.



Figura 22 – Betoneira da amassadura com capacidade de 90 lt

O processo de amassadura foi efetuado com o objetivo de assegurar uma distribuição uniforme dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão dentro do tempo de amassadura e para a capacidade de mistura em causa.

O processo de amassadura consistiu em colocar por ordem os seus constituintes, nomeadamente a brita com a areia, em seguida adicionou-se o cimento e após as cinzas volantes, por último, adicionou-se a água. Após todo este procedimento deixou-se a betoneira (Figura 22) em funcionamento cerca de 5 minutos.

As amassaduras foram realizadas com agregados secos, não foi necessário determinar o teor de humidade.

A secagem dos agregados foi realizada num período mínimo de 24h, utilizou-se uma temperatura constante de 105 °C, após este ciclo os agregados foram retirados e mantidos num local com baixa humidade até estabilizarem á temperatura ambiente. Estes foram mantidos nas condições descritas anteriormente com objetivo de se manterem secos e a uma temperatura ambiente.

Este processo da secagem dos agregados foi efetuado com algum cuidado e tratado com extrema importância, uma vez que se as amassaduras ocorressem com os agregados a temperaturas muito elevadas estes absorviam uma maior quantidade de água.

### 6.3.6 Execução e cura de provetes

Após todo este processo descrito no 6.3.5 procedeu-se á moldagem do betão nos respetivos moldes metálicos como se visualiza na Figura 23 e aos ensaios do betão fresco.



a)



b)



c)



d)

Figura 23 – Diferentes tipos de moldes metálicos usados na moldagem para o fabrico dos diversos provetes de betão

As dimensões desses moldes seguem toda uma referência normativa para cada tipo de ensaio que se pretende efetuar.

Na realização do programa experimental, foi necessário para cada uma das amostras moldes metálicos tal como referido anteriormente e visualizado na Figura 23. Para a moldagem do betão foi necessário diferentes moldes: provetes cúbicos com 150 mm e 100 mm de aresta em moldes fabricados em ferro fundido, provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, provetes prismáticos (de base retangular) com 100 mm de largura e 850 mm de comprimento, todos os moldes são estanques e não absorventes.

A execução e cura dos provetes foram realizadas de acordo com a norma NP EN 12390-2:2009 [42]. Para a realização dos provetes foi necessário: os moldes, um recipiente com produto descofrante, um dispositivo de compactação do betão (mesa vibratória), uma colher com aproximadamente 100 mm de largura, uma pá com secção quadrada.

Para evitar a aderência do betão ao molde, cobriu-se as faces interiores do molde com uma fina camada de óleo descofrante.

Encheu-se cada molde em duas camadas e compactou-se através de vibração mecânica, para esse fim foi utilizado uma mesa vibratória com uma determinada frequência. O betão foi compactado logo após a colocação no molde de forma a obter uma total compactação, sem que produzisse segregação ou exsudação. Após a compactação realizou-se cuidadosamente o nivelamento da superfície. Depois marcaram-se os provetes sem os danificar.

A norma NP EN 12390-2:2009 [42] sugere deixar-se o provete dentro do molde entre 16 e 72 horas, protegido contra choques, vibrações excessivas e desidratação à temperatura de  $20 \pm 5$  °C. Todos os provetes ficaram dentro dos moldes até à idade de 24 horas.

Os restantes moldes foram removidos após a sua desmontagem, utilizando-se para o efeito chaves de bocas adequadas. Após a remoção dos moldes, os provetes foram colocados em água, à temperatura de  $20 \pm 2$  °C nas instalações adequadas (tanque de cura) do laboratório.



## 7 ENSAIOS E ANÁLISES DE RESULTADOS

Neste capítulo descreve todos os ensaios ao betão realizados no estado fresco, como também no seu estado endurecido, resultando para ambos estados uma análise de resultados.

No estado fresco do betão foram realizados o ensaio de abaixamento e o espalhamento do betão, determinando para ambos os ensaios as suas classes, foi ainda determinada a massa volúmica fresca do betão para todas as composições em estudo.

Na caracterização do betão no estado endurecido foram realizados um maior número de ensaios, nomeadamente:

- Resistência á compressão;
- Resistência á flexão
- Resistência á compressão diametral;
- Absorção por capilaridade;
- Absorção por imersão;
- Resistividade elétrica;
- Difusão de cloretos;
- Ataque de sulfato de Sódio.

Com estes ensaios foi possível verificar a conformidade do betão produzido segundo o método ACI.

### 7.1 Ensaio no estado fresco do betão

#### 7.1.1 Ensaio de espalhamento

Com a realização do ensaio de espalhamento obtém-se um valor que é considerado um parâmetro reológico nos betões relacionado com a fluidez desse material.

Este método permite determinar a consistência do betão fresco através do espalhamento do betão numa mesa plana sujeita a um determinado número de pancadas.

Neste ensaio foi utilizada uma mesa de espalhamento numa superfície horizontal plana, não sujeita a vibrações externas ou choques, esta composta com dobradiças articuladas no tabuleiro da mesa no que permitem levantar esta até ao limite correto de trabalho e cair então para

paragem inferior. A mesa deve ficar de modo a que quando a parte superior cair sobre o batente inferior, a tendência do topo para ressaltar seja mínima.

Antes de efetuar o ensaio deve-se proceder á limpeza da mesa e do molde, humedecendo-os sem os molhar excessivamente. Colocar o molde, centrado, na parte superior da mesa e fixá-lo com os pés sobre as abas ou recorrendo a ímanes.

Encher o molde com betão em duas camadas iguais, usando a colher, compactando cada camada com 10 pancadas, com a barra de compactação. Se for necessário adicionar mais betão à segunda camada, para manter um excedente acima do topo do molde. Usando a barra de compactação, rasar a parte superior do molde e limpar o tabuleiro da mesa do betão em excesso.

Após 30 s de se ter compactado o betão, levantar o molde devagar na vertical com as duas mãos, durante um período de 3 a 6 s. Estabilizar a mesa de espalhamento, colocando os pés na prancha de pé, à frente da mesa, e levantar devagar o tabuleiro até este atingir o batente superior para que o topo da mesa não tenha um forte impacto contra o batente superior. Permitir a queda livre do tabuleiro sobre o batente inferior. Repetir este ciclo até atingir um total de 15 quedas, demorando cada uma não menos que 2 s nem mais que 5 s. Medir com a régua a dimensão máxima do espalhamento do betão segundo duas direções  $d_1$  e  $d_2$  (Figura 24), paralelos às arestas da mesa e registar as duas medições com aproximação aos 10 mm.

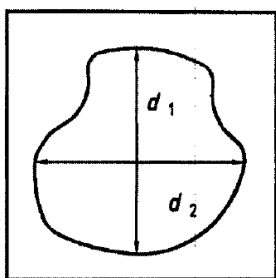


Figura 24 – Medição da dimensão máxima do espalhamento do betão segundo duas direções  $d_1$  e  $d_2$  (mm)

A partir do diâmetro de espalhamento calcula-se a media do espalhamento.

Após efetuar os ensaios como descrito anteriormente obteve-se os valores mencionados no Quadro 76.

Quadro 76 – Valores do ensaio de espalhamento para as diferentes misturas de betão

Composições	Espalhamento (mm)	Classe
Padrão	395	F2
Padrão_40% CV	422	F3
BED_1,7% SP	385	F2
BED_40% CV_1,7% SP	387	F2

O espalhamento é de extrema importância no momento da colocação do betão, visto que, essas operações podem influenciar substancialmente os requisitos de durabilidade, permeabilidade e a resistência mecânica do betão endurecido.

Como conclusão deste parâmetro verificou-se que o betão padrão com 40 % de cinzas volantes destacou-se dos restantes betão do estudo quanto a sua classe de espalhamento, obtendo para este uma classe F3 sendo este o mais fluido que os outros betões do estudo, os outros todos obtiveram uma classe de espalhamento F2.

### 7.1.2 Ensaio de abaixamento

A consistência do betão está muito relacionada com a capacidade de movimentação deste, isto é, está ligada com a aptidão que o betão tem de se espalhar e a sua plasticidade delimita a facilidade de o moldar, esta mobilidade relativa está relacionada com o abaixamento que a mistura apresenta. Este ensaio está relacionado com o tipo de estrutura a construir como se verifica no Quadro 77.

Quadro 77 – Abaixamento recomendado em função do tipo de construção

Tipo de construção	Abaixamento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Fundações e muros de suporte reforçados	75	25
Fundações planas, caixotes e paredes estruturam	75	25
Vigas paredes reforçadas	100	25
Pilares de edifícios	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Betão em massa	75	25

O abaixamento consiste em encher um cone com o betão por camadas devidamente compactadas e posteriormente retirar o cone e medir a diferença entre a altura do cone e a face superior da mistura.

Para cada amassadura foi realizado o ensaio de abaixamento, para validar o método ACI (Quadro 63) pois este método inicia-se prevendo um abaixamento, caso este valor não for o esperado ter-se-á de realizar novo cálculo da composição.



Figura 25 – Realização do ensaio de abaixamento com o cone de Abrams

Após a realização da amassadura e antes de encher os moldes, foi efetuado o ensaio de abaixamento segundo a norma NP EN 12350-2:2009 [43] por cada mistura, este foi executado com o auxílio do cone de Abrams tal como se observa na Figura 25 e que forneceram os dados no Quadro 78.

O ensaio de abaixamento é válido no caso de se verificar um abaixamento real, no qual o betão permaneça intacto e simétrico. O abaixamento medido não for o pretendido, a dosagem de água pode ser corrigida por tentativas experimentais e a composição é recalculada para uma nova dosagem de água.

Os valores obtidos foram os inicialmente previstos pelo método ACI, verificou-se que nas composições padrão apresentavam um menor abaixamento. Esse fenómeno deve-se ao facto de as amassaduras padrão serem um betão corrente sem superplastificante.

Quadro 78 – Valores obtidos do ensaio de abaixamento para as diferentes misturas de betão

Composições	Abaixamento (mm)	Classe
Padrão	80	S2
Padrão_40% CV	75	S2
BED_1,7% SP	115	S3
BED_40% CV_1,7% SP	100	S3

### 7.1.3 Ensaio da determinação da massa volúmica

Existem determinados fatores físicos que influenciam a massa volúmica e que se relacionam diretamente, tal como a densidade dos agregados utilizados nas composições e das proporções da mistura.

Outros como a densidade dos agregados utilizados na composição e também o teor de humidade inicial e final dos agregados podem levar à formação de vazios no betão, reduzindo a sua densidade, isto quando é utilizado uma quantidade de água acima da saturação na mistura [44].

A massa volúmica é determinada segundo a norma NP EN 12350-2:2009 [43] que especifica um método para a determinação da massa de um betão, o princípio é compactar dentro de um recipiente rígido e estanque a mistura de betão, de volume e massa conhecidos, e então pesá-lo.

Na realização do ensaio são utilizados diversos equipamentos apropriados para o ensaio em causa, tal como:

- Recipiente;
- Varão de compactação;
- Balança;
- Colher;
- Maço.

Procedimento:

1. Calibrar e pesar o recipiente de modo a determinar o seu volume (V) e a massa (m1)
2. Encher o recipiente em 2 ou mais camadas, dependendo da consistência do betão, até completa compactação.
3. No âmbito da dissertação, o recipiente encheu-se em duas camadas de volume aproximadamente igual. Cada camada foi sujeita a uma distribuição uniforme de 25 pancadas efetuadas com o varão. Após a compactação de cada uma das camadas bate-se levemente com o maço de borracha de forma a libertar as bolsas de ar contidas na amostra.
4. Prodede-se ao nivelamento da superfície com auxílio da colher e seguidamente pesa-se o recipiente (m2).

A massa volúmica é calculada através da fórmula:

$$D = \frac{m2 - m1}{V} \quad (7.1)$$

Em que:

D - é a massa volúmica do betão fresco, em kg/ m<sup>3</sup>;

m1 – é a massa do recipiente vazio, em kg;

m2 – é a massa do recipiente completamente cheio do betão compactado, em kg;

V – é o volume do recipiente em m<sup>3</sup>.

A massa volúmica do betão fresco é arredondada ao 10 kg/m<sup>3</sup> mais próximos.

Após os ensaios de massa volúmica todos os valores das misturas foram compilados no Quadro 79 no qual se pode observar os valores reais das misturas de betão.

Os valores calculados anteriormente no Quadro 79 foram comparados com os valores previstos pelo método ACI 211-91:2002 [32], para a massa do betão fresco no caso das misturas correntes obtiveram valores bastantes semelhantes, no caso dos betão de elevado desempenho os valores reais obtidos foram muito diferentes dos valores previstos tal como se verifica Figura 26.

Quadro 79 – Valores da massa volúmica de betão para as diferentes misturas

Massa Volúmica do Betão					
Composição	Volume (m3)	Peso (kg)		y(kg/m <sup>3</sup> )	Massa Volúmica do Betão Prevista
		M1	M2		
Padrão	0,003375		23,26	2300	2280
Padrão_40% CV		15,50	23,27	2303	2280
BED_1,7% SP			23,57	2391	2280
BED_40% CV_1,7% SP			23,55	2385	2280

Os betões BED têm valores da massa volúmica elevados devido ao volume de vazios baixo em relação aos betões correntes e por sua vez com uma maior quantidade cimento por m<sup>3</sup>.

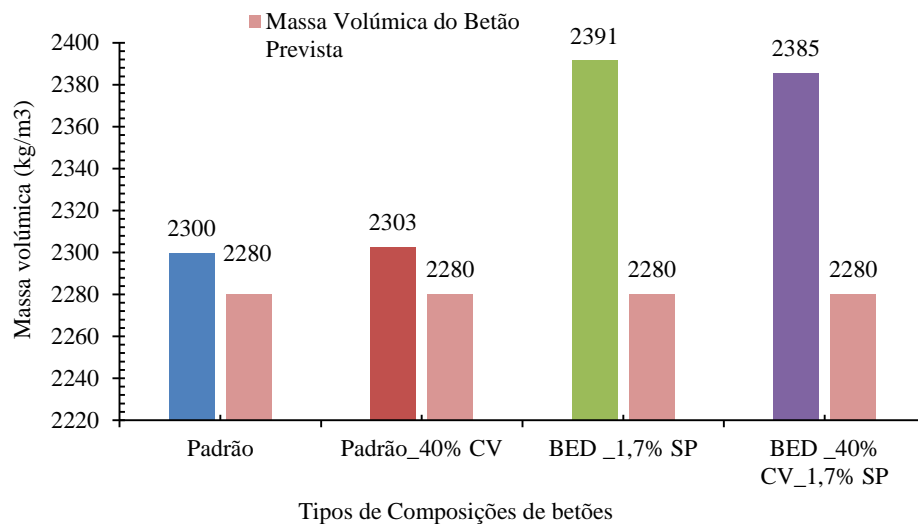


Figura 26 – Variação dos valores da massa volúmica de betão para diferentes tipos de misturas

## 7.2 Ensaio no estado endurecido do betão

### 7.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Uma das propriedades com mais importância atribuída ao betão endurecido é em geral, a resistência à compressão [39].

Na determinação da tensão de rotura à compressão do betão foi utilizada um equipamento hidráulico de compressão. Esta prensa hidráulica tem capacidade de aplicação de forças gradualmente crescentes, de forma contínua e sem choques, no caso deste ensaio foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com a dimensão do provete e perpendicularmente às faces do provete.

O ensaio da resistência à compressão é calculado com base na equação:

$$F_c = \frac{F}{A_c} \quad (7.2)$$

Onde:

$F_c$  - é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  - é a carga máxima à rotura, em N;

$A_c$  - é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, em  $\text{mm}^2$ ;

A resistência à compressão deve ser expressa com aproximação aos 0,5 MPa.

A amostra total de caracterização do betão produzido em laboratório foi constituída por um de 36 provetes, 3 provetes de cada série e a sua avaliação foi realizada aos 3, 14 e 28 dias para todas as composições estudadas.

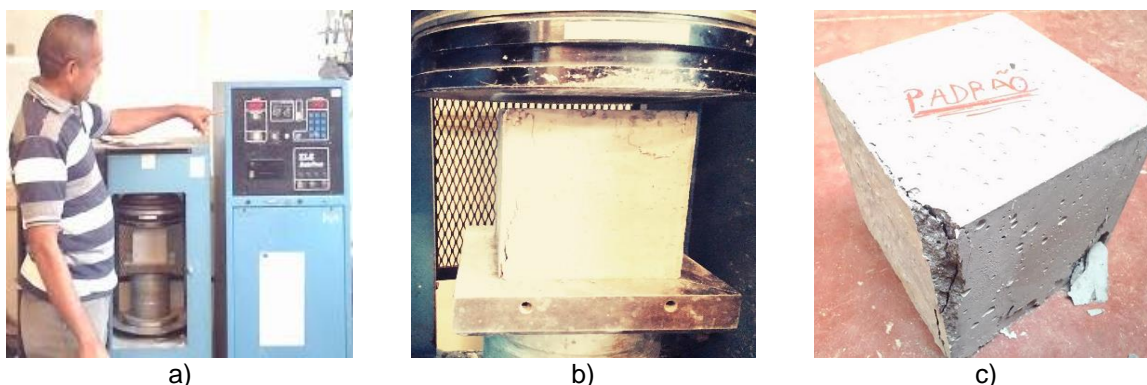


Figura 27 – a) Execução do ensaio da resistência á compressa; b) fim de ensaio; c) tipo de rotura



Na realização deste ensaio a primeira ação executada foi a pesagem de cada um dos provetes a ensaiar, como também registo das dimensões do provete a ser ensaiado e o valor da velocidade de ensaio, registando no fim de ensaio a carga de rotura de cada um dos provetes e avaliação do tipo de rotura tal como é mostrado na Figura 27.

Os resultados dos ensaios estão agrupados no Quadro 80 e o modo de rotura do provete pode ser visualizado na Figura 27, as roturas foram consideradas satisfatórias (normal) para os ensaios realizados.

Quadro 80 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Mistura	Idade (d)	Provetes	Peso (kg)	Força (KN)	Tensão de Compressão (MPa)	Média	Dif (MED-AMOSTRA)	Desvio Padrão	CV (%)
Padrão	3	a	7,69	466,60	20,74	21,68	0,94	0,77	3,57%
		b	7,68	509,20	22,63		0,95		
		c	7,60	487,40	21,66		0,01		
	14	a	7,68	823,00	36,58	36,83	0,25	0,36	0,97%
		b	7,81	823,00	36,58		0,25		
		c	7,75	840,00	37,33		0,50		
	28	a	7,80	928,00	41,24	41,50	0,25	0,30	0,71%
		b	7,78	943,00	41,91		0,41		
		c	7,79	930,00	41,33		0,16		
Padrão_40% CV	3	a	7,39	313,10	13,92	13,37	7,76	0,39	2,91%
		b	7,55	293,20	13,03		8,65		
		c	7,64	296,20	13,16		8,51		
	14	a	7,64	485,80	21,59	21,20	15,24	0,38	1,79%
		b	7,68	479,60	21,32		15,51		
		c	7,66	465,40	20,68		16,15		
	28	a	7,71	610,50	27,13	26,62	14,36	0,46	1,72%
		b	7,58	601,00	26,71		14,79		
		c	7,66	585,50	26,02		15,47		
BED_1,7% SP	3	a	7,87	1165,00	51,78	54,52	30,10	0,78	1,43%
		b	7,82	1194,00	53,07		31,39		
		c	7,92	1152,00	51,20		29,52		
	14	a	8,05	1236,00	54,93	70,64	18,10	1,71	2,41%
		b	7,92	1330,00	59,11		22,28		
		c	7,86	1283,00	57,02		20,19		
	28	a	7,90	1943,00	86,36	84,27	44,86	2,50	2,96%
		b	7,86	1817,00	80,76		39,26		
		c	7,94	1928,00	85,69		44,19		
BED_40% CV_1,7% SP	3	a	7,60	703,00	31,24	32,34	9,57	0,78	2,40%
		b	7,42	739,00	32,84		11,17		
		c	7,50	741,00	32,93		11,26		
	14	a	7,73	1158,00	51,47	50,33	14,64	0,82	1,64%
		b	7,63	1115,00	49,56		12,73		
		c	7,59	1124,00	49,96		13,13		
	28	a	7,52	1409,00	62,62	62,22	21,13	3,59	5,76%
		b	7,64	1494,00	66,40		24,90		
		c	7,60	1297,00	57,64		16,15		

Com os resultados todos compilados foram possível visualiza-los com o objetivo de uma análise mais simples e critica como verifica na Figura 27.

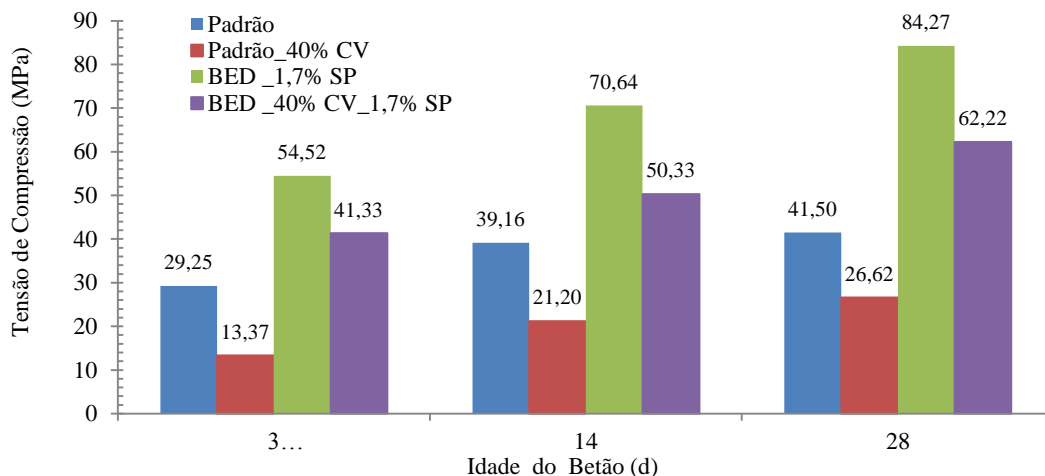


Figura 28 – Variação da tensão de compressão com a idade do betão em conformidade de resistência à compressão

### 7.2.1.1 Critérios

De acordo com a norma a conformidade da resistência à compressão do betão esta é avaliada em provetes ensaiados aos 28 dias, para:

- Grupos de “n” resultados de ensaios consecutivos, com ou sem sobreposição, fcm (critério 1);
- Cada resultado individual de ensaio fci (critério 2).

A conformidade é confirmada se forem satisfeitos ambos os critérios do Quadro 81 tanto para a produção inicial como para a produção contínua, embora no âmbito da dissertação apenas tenha importância a produção inicial.

Quadro 81 – Critérios de conformidade para resistência à compressão do betão

Produção	Número "n" de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo (fcm) N/mm2	Critério 1	Critério 2
		Media dos "n" resultados (fcm) N/mm2	Qualquer resultado individual de ensaio (fci) N/mm2
Inicial	3	$\geq f_{ck}+4$	$\geq f_{ck}-4$
Continua	$\geq 15$	$\geq f_{ck}+1,48\sigma$	$\geq f_{ck}-4$

### 7.2.1.2 Verificação dos critérios de conformidade

O controlo da conformidade é uma parte integrante do controlo da produção. No Quadro 82 verifica-se os requisitos de conformidade do betão produzido, a conformidade é verificada quando os dois critérios forem satisfeitos.

Quadro 82 – Verificação dos critérios de conformidade

Composição	Valor Característico especificado, fck, cubo	Tensão média fcm, (MPa)	Critério 1		Critério 2	
			Média dos "n" resultados (fcm) N/mm <sup>2</sup> ≥ fck+4		Qualquer resultado individual de ensaio (fci) N/mm <sup>2</sup> ≥ fck-4	
Padrão	30	41,5	41,50≥34	V	41,24≥26	V
Padrão + 40% CV	30	26,62	22,62≥34	NV	26,02≥26	V
BED_1,7% SP	60	84,27	84,27≥64	V	80,76≥56	V
BED_40% CV_1,7% SP	60	62,22	62,22≥64	NV	57,64≥56	V

### 7.2.1.3 Determinação da classe do betão

Nos Quadros 80 e 84 são apresentadas classes de resistência dos betões estudados. Os betões com CV apresentam classes de resistência à compressão inferiores ao especificado C25/30 e C50/60.

Quadro 83 – Classe de resistência à compressão do betão

Compressão	fck ≤ fcm-4	fck ≤ fci+4	fck,cubo N/mm <sup>2</sup>	Classe de resistência à compressão
Padrão	≤ 37,5	≤ 45,24	≤ 37,5	C30/37
Padrão_40% CV	≤ 22,62	≤ 30,02	≤ 22,62	C16/20
BED_1,7% SP	≤ 80,27	≤ 88,27	≤ 80,76	C60/75
BED_40% CV_1,7% SP	≤ 57,64	≤ 64,22	≤ 58,13	C45/55

O gráfico da Figura 29 ilustra a influência da razão a/c na resistência à compressão do betão. Os resultados indicados mostram que quanto menor for a razão a/c maior é a tensão de rotura do betão.

A Figura 30 apresenta o significado de resistência característica do betão.

Quadro 84 - Classes de resistência à compressão para betão normal e o betão pesado

Mistura	Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cyl}$ (N/mm <sup>2</sup> )
	C8/10	8	10
	C12/15	12	15
Padrão_40% CV	C16/20	16	20
	C20/25	20	25
	C25/30	25	30
Padrão	C30/37	30	37
	C35/45	35	45
	C40/50	40	50
BED_40% CV_1,7% SP	C45/55	45	55
	C50/60	50	60
	C55/67	55	67
BED_1,7% SP	C60/75	60	75
	C70/85	70	85
	C80/95	80	95
	C90/105	90	105
	C100/115	100	115

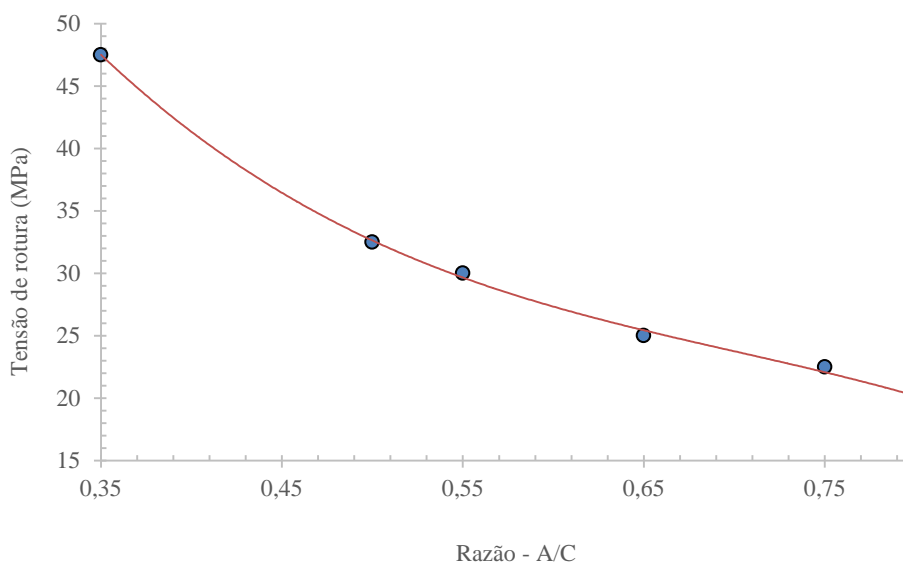


Figura 29 – Influência da água A/C na resistência á compressão [47]

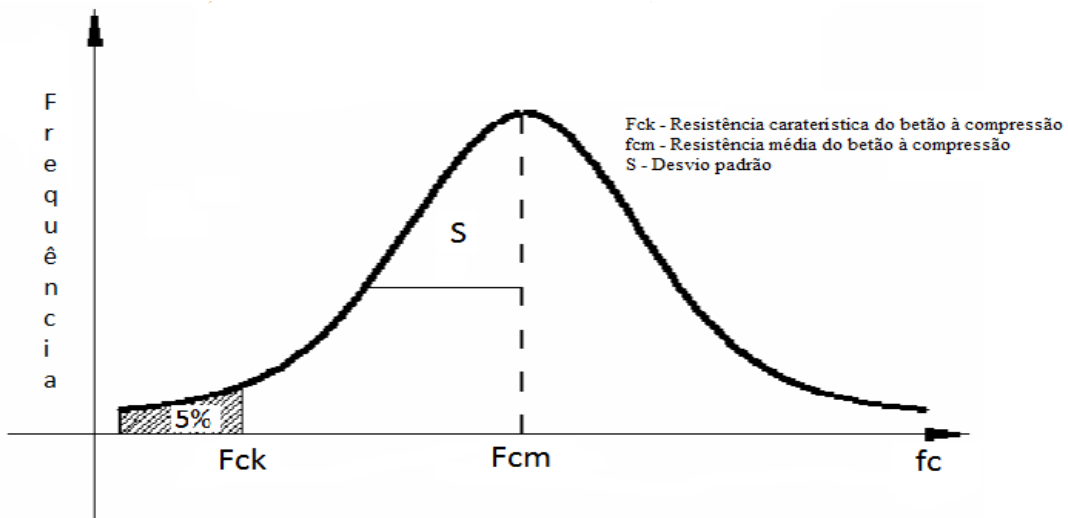


Figura 30 – Valor característico da resistência (fck) [47]

Na análise direta do gráfico da Figura 28 pode observar-se que os menores valores de  $a/c$  se verificam para o betão BED\_1.7%SP e o BED\_40%CV\_1.7%SP, o que justifica o valor elevado de resistência à compressão obtido quando comparado com as restantes composições estudadas uma vez que quanto menor for a razão  $a/c$  maior é a resistência à compressão do betão.

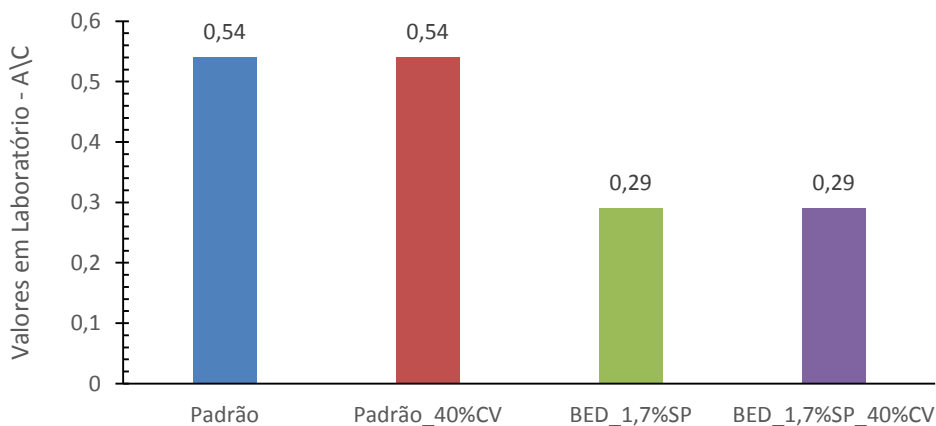


Figura 31 – Comparação dos valores de razão A/C previstos pelo American Concrete Institute (ACI) e obtidos no estudo em laboratorial

Apesar de ter sido necessário adicionar água à mistura como se verifica na Figura 31 foram obtidos valores de resistência à compressão acima do previsto exceto para os betões com cinzas

volantes obtendo assim composições do lado da segurança, tema de reconhecida importância no setor da construção.

Quadro 85 - Valores de resistência à compressão dos provetes ensaiados

Composição	fck, cubo (Experimental) N/mm <sup>2</sup>	fck,cubo (Classe Pretendida) N/mm <sup>2</sup>	Diferença (N/mm <sup>2</sup> )
Padrão	37,50	30,00	7,50
Padrão _ 40% CV	22,62	30,00	-7,38
BED _ 1,7% SP	80,27	60,00	20,27
BED _40% CV_1,7% SP	58,22	60,00	-1,78

Comparando os resultados obtidos com o valor mínimo a ser cumprido para pertencer à respetiva classe de resistência à compressão (Quadro 85), podemos assumir que o método aplicado conduz a valores de resistência à compressão conservativos para os betões sem cinzas volantes.

Tal como se pode ver nos Quadro 86 a obtenção da classe C30/37 para o betão 1 fez com que se atingisse o valor máximo para as classes de exposição definidas na especificação LNEC E 464 [20].

No Quadro 87 pode ver se as classes de exposição ambiental onde as composições estudadas podem ser aplicadas.

Os requisitos para o betão resistir às ações ambientais são dados em termos de valor limite para a composição e propriedades estabelecidas para o betão.

Deve limitar-se ao mínimo a quantidade de água na produção do betão, pois a água em excesso evapora-se criando no betão uma rede de poros capilares que afetam a sua resistência e durabilidade. É de referir no entanto que com o desenvolvimento dos adjuvantes plastificantes com elevado desempenho é atualmente possível utilizar quantidades muito pequenas de água no fabrico do betão sem afetar a trabalhabilidade [47].

Quadro 86 - Valores limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos, [20]

Tipo de cimento	CEM I (Resistência); CEM II/A(1)				CEM II/b(1); CEM II/A(2);CEM IV(2);CEM V/A(2)			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Mínimo recobrimento nominal (mm) *	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima razão água/cimento	0,65		0,60		0,65		0,55	
Mínima dosagem de cimento, C (kg/m <sup>3</sup> )	240		280		260		300	
Mínima classe de resistência	C25/30 LC25/28		C30/37 LC30/33		C25/30 LC25/28		C30/37 LC30/33	

(1) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-w e aos cimentos II/B-w, respetivamente.

(2) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa

Quadro 87 – Classes de exposição ambiental on as composições estudadas podem ser aplicadas

Composição	Razão a/c	Dosagem de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Classe de resistência	Classe de exposição
Padrão	0,54	428	C30/37	XC1,2,3,4
Padrão_40% CV	0,54	428	C16/20	-
BED_1,7% SP	0,29	637	C60/75	XC1,2,3,4
BED_40% CV_1,7% SP	0,29	637	C45/55	XC1,2,3,4

Face às exigências preconizadas na legislação em vigor, percebe-se que estes betões podem ser aplicados em locais expostos a condições ambientais diferentes (químicas e biológicas) sem que o procedimento e durabilidade do betão sejam postos em causa Quadro 88.

O facto de ter sido necessário acrescentar água à mistura para obter o abaixamento desejado implica um ajuste nas quantidades finais dos constituintes de forma a obter valores por metro cúbico de betão - Composição final para 1m<sup>3</sup> de betão causa Quadro 88.

Quadro 88 - Composição final para 1m<sup>3</sup> de betão

Composição	Quantidade de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de Agregado grosso (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de Água <sup>17</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de Agregado Fino (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de Cinzas volantes (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de SP (kg/m <sup>3</sup> )
Padrão - B1	428	288,46	231	1333,46	-	
B1 + 40% CV	256,8	288,46	231	1333,46	171,2	
BED - B2 + 1,7% SP	637	288,46	231	1124,12	-	0,8
BED - B2 + 40% CV + 1,7% SP	382,2	288,46	231	1124,12	254,8	0,48

### 7.3 Ensaios e análise resultados de durabilidade

#### 7.3.1 Absorção de água por capilaridade

O fenómeno de absorção por capilaridade acontece sempre que existem diferenças de pressão entre a superfície livre de um fluido e a sua superfície livre em vasos capilares. O equilíbrio do sistema é restituído pela ascensão do fluido através desses poros, como referem o Coutinho e Gonçalves (1973) [47]. Este fenómeno pode ser representado através de curvas que apresentam a variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contato com à água, em função do tempo.

O ensaio de capilaridade do betão foi efetuado no sentido de avaliar como uma composição de betão condiciona a ascensão capilar de água através dos seus poros, sendo um requisito técnico atual para a sua utilização.

Na realização deste ensaio seguiu-se a especificação do LNEC E 393 [48]. Para o ensaio da capilaridade foi utilizado diversos equipamentos tais como:

- Balança de precisão de  $\pm 0,05\%$  da massa a utilizar;
- Bandeja metálica;
- Campânula;
- Estufa ventilada a  $40 \pm 5$  °C;
- Suportes plásticos.

Para realização do ensaio foi necessário três provetes cúbicos 100x100x100 (mm) por cada uma das quatro misturas de betão do estudo. Estes foram recolhidos de cada mistura, após os 28 dias de cura foram submetidos a ensaio.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efetuado por diversas etapas:



1. Registou-se a massa do provete de ensaio, seco em estufa ventilada a  $40 \pm 5$  °C durante 14 dias -  $M_0$ ;
2. Nivelou-se uma bandeja e colocou-se o provete sobre a mesma, apoiado em suportes plásticos nos cantos para permitir a exposição da face cortada à água;
3. Adicionou-se uma lâmina de água à bandeja de forma a imergir a face do provete cortado em  $5 \pm 1$  mm, tapando-se posteriormente a bandeja com uma campânula de forma a evitar evaporação;
4. No final de cada tempo estipulado pela norma registou-se a massa de cada provete ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas, num processo de  $60 \pm 5$  segundos. Nesta operação, foi necessário retirar o provete da bandeja e colocá-lo sobre uma base não absorvente.

Todos os resultados experimentais obtidos da capilaridade foram calculados pela expressão (7.3) que traduz a absorção de água por ascensão.

$$A_{ci} = \frac{M_i - M_0}{A_p} \quad (7.3)$$

$A_{ci}$  - absorção de água por ascensão capital no instante  $i$  ( $\text{g}/\text{mm}^2$ );

$M_i$  - massa do provete após  $i$  horas em contacto com a lâmina de água (g);  $M_0$  - massa inicial do provete de ensaio seco em estufa (g);

$A_p$  - área da superfície do provete em contacto com a água ( $\text{mm}^2$ ).

Os coeficientes de capilaridade foram calculados com base na construção dos gráficos de absorção por capilaridade de todas as composições, tal como se pode observar nas Figura 33 e Figura 34.

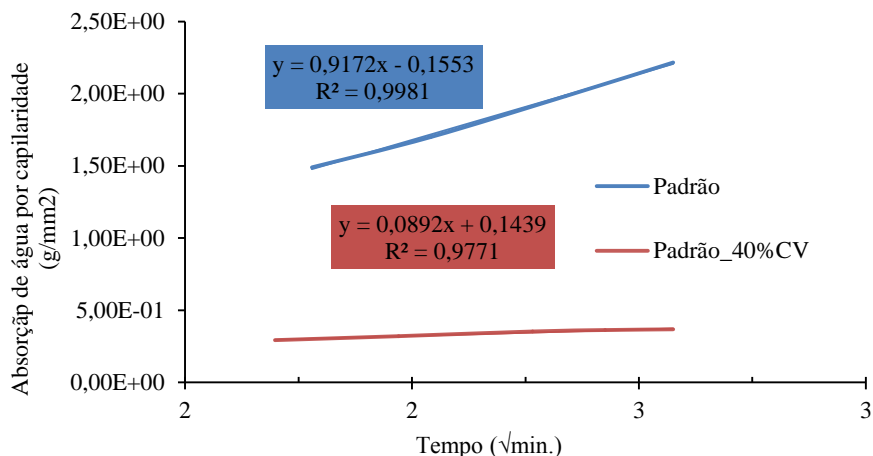


Figura 32 – Valores calculados dos coeficientes de absorção por capilaridade relativamente às misturas do betão Padrão

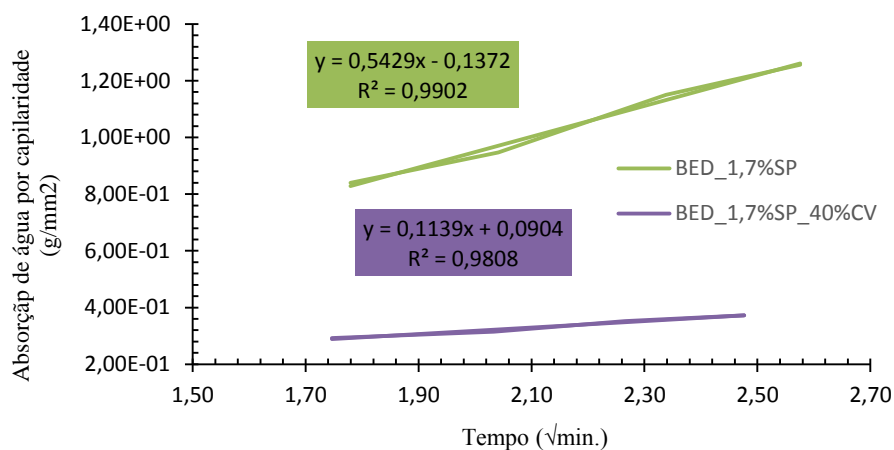


Figura 33 – Valores calculados dos coeficientes de absorção por capilaridade relativamente às misturas do betão de elevado desempenho (BED)

Os resultados dos coeficientes dos ensaios de capilaridade foram compilados no Quadro 89 no qual se visualiza a diferença de valores nas diversas composições dos betões estudados.

Quadro 89 – Coeficientes de capilaridade dos betões

Composições de Betão	Coeficiente de capilaridade $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
Padrão	9,17E-01
Padrão_40%CV	8,92E-02
BED_1,7%SP	5,43E-01
BED_1,7%SP_40%CV	1,14E-01

Através do gráfico apresentando na Figura 34 foi possível analisar a evolução da absorção capilar de cada provete das diferentes misturas do betão.

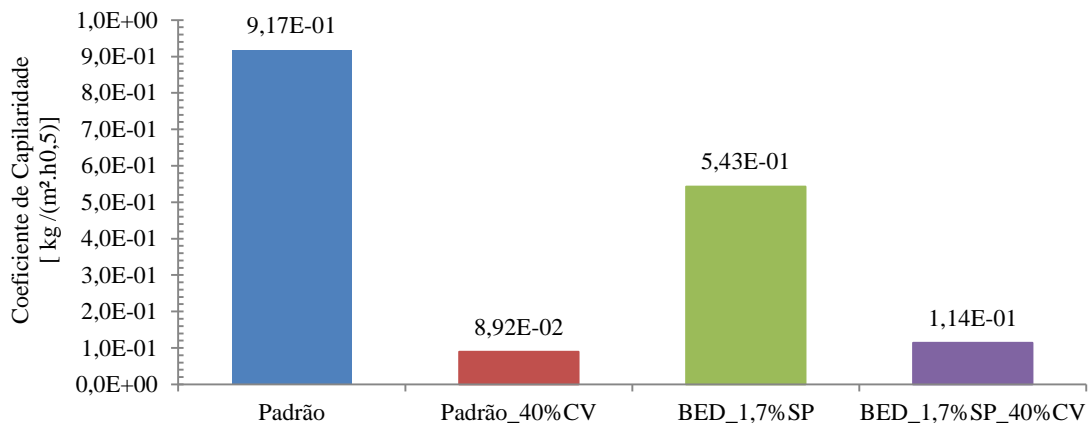


Figura 34 – Valores da absorção por capilaridade das diversas composições de betão submetidas a ensaios laboratoriais

Observando o gráfico anterior é possível verificar, os betões que tiveram menor absorção de água por capilaridade foram os betões com adição de cinzas volantes relativamente às composições estudadas, este fator é justificado no subcapítulo seguinte.

Relativamente ao grupo das composições de betões verifica-se que a composição padrão é aquela que apresenta um valor superior a todas as outras, este fator é devido à razão A/L e adição das cinzas volantes.

Dentro do grupo de cada composição, nomeadamente o padrão, e as BED, verifica-se que o comportamento apresenta a mesma tendência decrescente para ambos casos, adição da CV é um fator predominante no comportamento da absorção por capilaridade para as composições de betão.

### 7.3.2 Absorção de água por imersão

Uma outra forma de absorção de água no betão deriva da sua imersão, esta tem influencia diretamente na sua durabilidade. O ensaio em causa permite a quantificação do volume de vazios acessíveis na massa de betão quando submetido a este ensaio.

A metodologia deste ensaio laboratorial seguiu a especificação do LNEC E-394 [49].

Na realização do ensaio foi necessário recorrer ao equipamento descrito posteriormente.

- Balança de precisão de  $\pm 0,05\%$  da massa a utilizar;
- Balança hidrostática (Figura 35);
- Estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C;
- Recipiente com água.

Tal como no ensaio anterior da capilaridade a determinação das amostras seguiu a mesma base que o anterior, a geometria dos provetes escolhidos para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido foi o cubo com a dimensão de 100x100x100 mm.

O procedimento de ensaio foi segundo a norma LNEC E-394 [49] seguindo todas as fases do ensaio cuidadosamente.

Colocou-se os provetes no recipiente com água tal que estes ficassem imersos em 1/3 da sua altura, durante o período de uma hora;

Repetiu-se o processo, adicionando água ao recipiente até perfazer 2/3 e a totalidade da altura dos provetes, ambos em períodos de uma hora.

Aguardou-se até os provetes atingirem massa constante, e posteriormente registaram-se as suas massas com superfície seca -  $M_1$  - e hidrostática após saturação -  $M_2$ ;

Secou-se os provetes na estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C até massa constante e registaram-se as massas -  $M_3$ .



a)



b)

Figura 35 – a) Pesagem dos provetes imersos em água; b) Pesagem dos provetes saturados com superfície seca na balança hidrostática

Após todas as tarefas efetuadas procedeu ao tratamento dos valores como é indicado no Quadro 90, foi possível analisar os resultados obtidos da absorção de água por imersão dos provetes do betão determinados a partir da equação calculada em função da massa seca do provete ( $M_1$ ), massa hidrostática do provete depois de saturado em água à pressão atmosférica ( $M_2$ ) e massa do provete saturado em água à pressão atmosférica ( $M_3$ ).

$$A_i(\%) = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} * 100 \quad (7.4)$$

As variáveis representam:

$A_i$  - absorção de água por imersão (%);

$M_1$  - massa do provete saturado com superfície seca (g);

$M_2$  - massa hidrostática do provete saturado (g);

$M_3$  - massa do provete seco em estufa (g).

Por fim, a absorção de água por imersão obteve-se por percentagem de massa, tal como indicado no Quadro 90.

Quadro 90 – Valores de absorção de imersão para as composições estudadas

Composições de Betão	Absorção de água por imersão (%)
Padrão	16,61
Padrão_40%CV	3,09
BED_1,7%SP	9,37
BED_1,7%SP_40%CV	1,40

Após os valores adquiridos no Quadro 90 procedeu-se a construção da variação desses valores ilustrados na Figura 36.

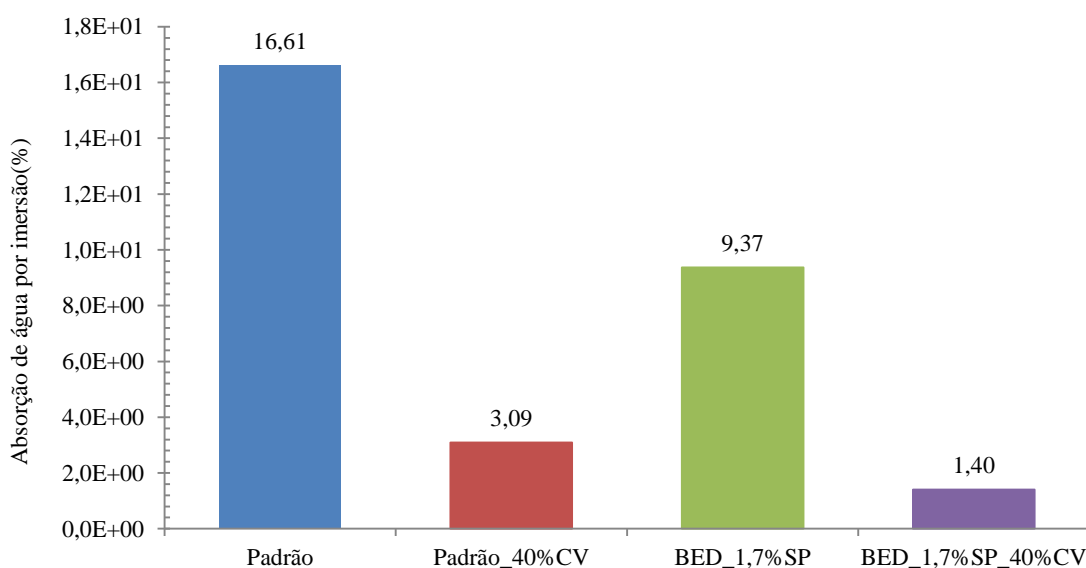


Figura 36 – Valores da absorção por imersão das diversas composições de betão do estudo

Através da Figura 36 pode-se analisar de uma forma compreensível a absorção de água por imersão dos diferentes provetes dos betões.

Nos betões analisados verifica-se que o betão padrão obteve uma absorção de água por imersão superior aos restantes. Os betões com cinzas volantes foram aqueles que apresentaram os valores mais baixos de absorção.

Verifica que os betões de referência, tanto o betão padrão como o betão de elevado desempenho possuem valores superiores de absorção quando comparados com os betões que

contém cinzas volantes, este aspeto poderá ser contabilizado devido adição da cinza volante nos betões.

O ensaio demonstrou alguma sensibilidade relativamente á quantidade de ligante nomeadamente o acréscimo de 428 kg/m<sup>3</sup> para 637 kg/m<sup>3</sup>, esta adição provocou uma diminuição destacada do valor da absorção das composições.

A substituição de 40% de cimento pela cinza volante incitou a uma diminuição da absorção das composições Padrão\_40% CV e da BED\_1.7%SP\_40%CV.

A redução do valor da absorção nas composições com cinzas volantes poderá estar associada à densificação da matriz ligante e consequente redução de vazios resultantes da interação de vários efeitos [50]:

- O emprego de CV induz um aumento do volume de ligante, uma vez que a substituição de cimento por CV foi feita em massa e as CV são dotadas de uma menor massa volúmica;
- O efeito filler conferido pela forma e dimensão das partículas de CV, que garante uma maior compacidade e densidade à mistura;
- A redução da quantidade de hidróxido de cálcio na pasta endurecida, proporcionada pelas reações pozolânicas das CV, o que torna os betões menos permeáveis, pois passam a conter menor quantidade de um composto que, apesar de pouco, é solúvel na água.

### 7.3.3 Resistências aos sulfatos

A caracterização da resistência ao ataque dos sulfatos foi levada a cabo através da adaptação da norma NP EN 1378 [51] aplicável para agregados.

O principal objetivo da norma é:

- Apreciação quantitativa (perdas de massa);
- Qualitativa (observação visual).

O agregado ou o material quando submetido alternadamente a imersões numa solução saturada de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou sulfato de magnésio (Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e a secagens na estufa, sofre alterações modificando as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

Existe um grupo de fatores que influenciam o ataque dos sulfatos às estruturas de betão, estes agentes depende em:

- Concentração e natureza do ião sulfato;
- Concentração de catiões presentes na solução de sulfatos (sódio, potássio, magnésio, amoníaco);
- Do teor de  $C_3A$  do cimento;
- Densidade, permeabilidade (qualidade do betão);
- Nível do lençol freático e sua variação sazonal;
- Fluxo da água no solo e porosidade do solo;
- Forma da construção e qualidade do betão.

Os fatores referidos anteriormente danificam gravemente todas as estruturas de betão expostas ao ataque de sulfatos.

O desenvolvimento do ataque dos sulfatos está descrito na Figura 37 tal como aconteceu no estudo em causa.

No caso das diferentes misturas de betão foram utilizados provetes com dimensões de 100x100x100 mm no qual foram submetidos à imersão numa solução saturada de sulfato de sódio anidro ( $Na_2SO_4$ ).

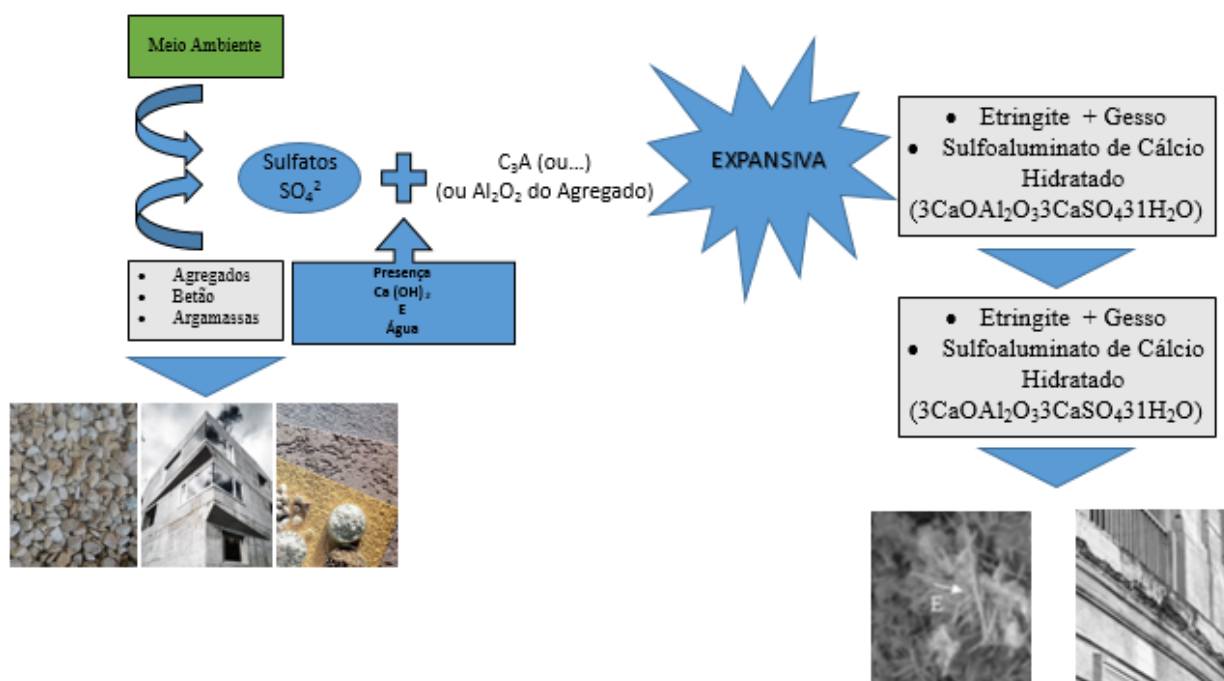


Figura 37 – Processamento do ataque dos sulfatos numa estrutura (Skalny et al, 1996)



A solução de sulfato sódio anidro tem as características químicas e físicas que estão descritas no Quadro 91.

Quadro 91 - Ficha técnica do sulfato de sódio anidro (Quimidois, 2005)

Composição química	
Sulfato de sódio (%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Min. 99.5
Percentagem de Água (H <sub>2</sub> O)	Max. 0.05
Cloreto de sódio (%NaCl)	Max. 0.30
Resíduo insolúvel em ácido (%)	Max. 0.01
pH solução aquosa 1%	7±0.5
Caraterísticas físicas	
Aspetto	Pó branco, fluido
Cheiro	Inodoro
Temperatura de fusão (°C)	884
Massa volúmica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.4±0.1
Solubilidade em água à temperatura de 20 °C	19.4 g/100g de água (20 °C)

Os provetes utilizados no ensaio de ataque aos sulfatos foram sujeitos a 8 ciclos com um total de 72 dias.

Antes de iniciar o ensaio os provetes foram colocados numa estufa ventilada à temperatura de 105±5°C durante o tempo necessário para remover qualquer humidade residual que existisse. Todos os provetes foram devidamente escovados, lixados e limpos.

Para realizar o ensaio foi necessário efetuar a preparação da solução de (Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>), no qual foi necessário proceder a diversas operações, tais como:

- Com a água previamente aquecida e fixada num intervalo de temperatura de 25<sup>0</sup> a 30<sup>0</sup>C foi-se adicionando e agitando o sulfato de sódio vigorosamente até esta ficar saturada, de acordo com os dados do fabricante: 40.8g/100g de água a 30<sup>0</sup>C;
- Após 48 horas de agitação, com a solução à temperatura ambiente, mediu-se a densidade pesando uma proveta de 1000 ml, com o objetivo de conseguir uma densidade média, dentro dos valores normativos 1.151 – 1.174 g/l, o valor obtido na solução para o ensaio foi de 1.162 g/l verificando intervalo da norma. O pH da mistura foi determinado pH médio de 8.7;
- O volume de solução utilizado foi 2.5 vezes superior ao volume dos provetes imersos e quando imersos cobertos pela solução de pelo menos 1,5 cm. O recipiente esteve sempre tapado para evitar a evaporação da solução e a entrada de impurezas.

A temperatura do ensaio foi conservada a cerca de 30<sup>0</sup>C, para evitar a cristalização do sulfato de sódio que ocorre à temperatura ambiente.

O ensaio ocorreu em duas fases dado o elevado número de provetes por mistura, em cada fase foi utilizada uma nova solução de sulfato e verificada a sua densidade.

Apos a preparação da solução para o ensaio procedeu-se ao início do mesmo. Foram colocados os provetes dentro de um recipiente com a solução preparada, esta ficou condicionada 24 horas de maneira a não haver qualquer troca de matérias (poeiras, outras) a norma prevê 16 a 18 horas, mas com objetivo de acelerar a degradação optou-se por deixar as 24 horas tendo em conta que se trata de um betão corrente e outro de elevado desempenho.

Após as 24 horas de exposição à solução os provetes foram retirados do recipiente. Estes ficaram em repouso durante 20 minutos com objetivo de escorrimento, após este tempo foram colocados em estufas ventiladas a 105±5<sup>0</sup>C. Os provetes permaneceram na estufa pelo menos uma semana para garantir que atingissem uma massa constante, facto confirmado com pesagens sequenciais após o arrefecimento dos provetes à temperatura ambiente para confirmar a massa constante.

Após todas as operações anteriores efetuadas compilou-se todos os resultados de forma a reunir os dados das diferentes misturas de betão no Quadro 92.

Quadro 92 – Valores da variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos

Misturas	Data	Tempo de ensaio (d)	Número de Ciclos	Massa Do Proverte (g)	Varição da Massa (g)
Padrão	07/01/2014	72	8	2121,18	5,46%
	20/03/2014			2236,95	
Padrão_40%CV	07/01/2014			2122,03	2,14%
	20/03/2014			2167,45	
BED_1,7%SP	07/01/2014			2096,55	3,70%
	20/03/2014			2174,05	
BED_1,7%SP_40%CV	07/01/2014			2119,73	1,81%
	20/03/2014			2158,15	

No Quadro 92 estão representados os dados de variação da massa dos provetes no ensaio de resistência aos sulfatos para cada mistura, no quadro é referido o valor do início do ciclo e o final de todos os ciclos, apresentando na totalidade a variação da massa para cada mistura de betão submetida ao ensaio.

Os valores no Quadro 92 foram formulados graficamente como se observa na Figura 38.

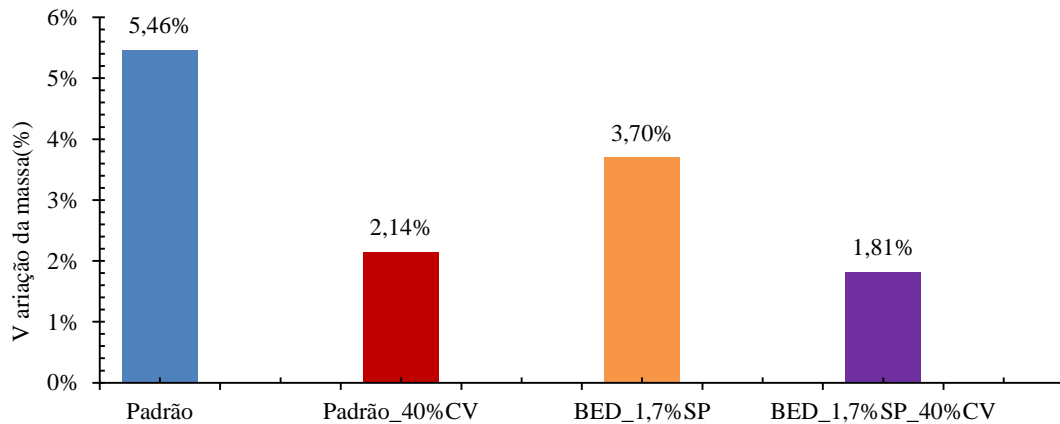


Figura 38 – Variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos

Na Figura 38 verifica-se que os diferentes betões do estudo têm comportamentos diferentes, tal como era de esperar, uma vez que os betões padrão são considerados betões correntes e os restantes são betões de elevado desempenho.

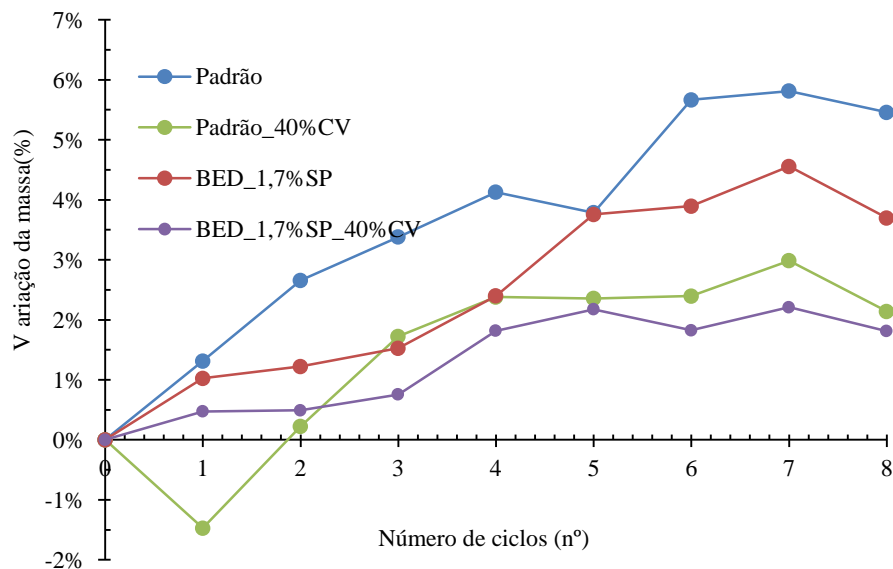


Figura 39 – Variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos ao longo do número de ciclos

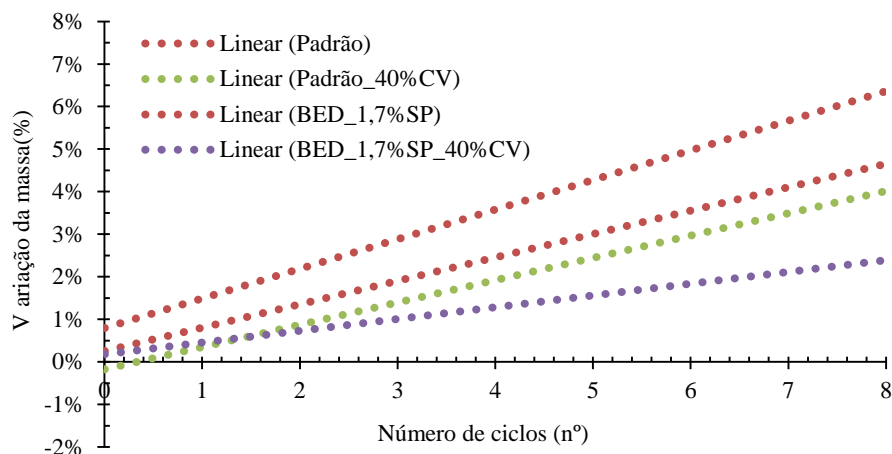


Figura 40 – Tendência da variação da massa para cada mistura de betão para ensaio de resistência aos sulfatos ao longo do número de ciclos

Os betões sem cinzas volantes tiveram valores mais elevados que os betões com cinzas volantes como se observa na Figura 39. Comparando os valores no betão corrente o betão com cinza volante apresenta um valor inferior de ataque aos sulfatos que o betão padrão, da mesma forma o BED e BED com cinza volante seguiu a mesma tendência que os betões correntes como se verifica na Figura 40. Estes resultados devem-se à menor porosidade dos betões com Cinzas Volantes.

### 7.3.4 Penetração de cloretos

Numa estrutura de betão a penetração de cloretos ocorre por difusão através da rede de poros existente no seu interior, o processo é fortemente condicionado pelo teor de água no betão.

Devido à penetração de cloretos a despassivação das armaduras que, juntamente com a diferença de potencial elétrico instalada no aço, provoca uma corrosão prematura e acentuada. O objetivo do ensaio é quantificar a resistência do betão à penetração de cloretos, parâmetro que é fundamental na durabilidade dos betões. A migração de cloretos foi realizada através de um ensaio no procedimento CTH, rápido método e desenvolvido por Luping [52].

Em termos normativos, o ensaio de cloretos seguiu a especificação LNEC E-463 [53].

Observando a penetração dos cloretos sob potenciais químicos e elétricos como unidirecional e assumido que o fluxo de íons que transita o material é o resultado da soma dos dois processos, é possível recorrer a uma Lei de Fick transformada para caracterizar o fenómeno através da equação simplificada (7.5).

$$DNE = \frac{(0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (7.5)$$

Em que:

DNE: coeficiente de difusão  $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;

U: valor absoluto da voltagem aplicada, V;

T: valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica,  $^{\circ}\text{C}$ ;

L: espessura do provete, mm;

X<sub>d</sub>: valor médio da profundidade de penetração, mm;

T: duração do ensaio, horas

Para efetuar o ensaio de penetração de cloretos seguiu-se o procedimento que se apresenta:

1. Após terminado o período de cura, colocou-se os provetes de ensaio numa câmara de vácuo por 3 horas à pressão aproximada de 20 mbar, valor compreendido no intervalo entre 10 e 50 mbar definido pela especificação do ensaio;
2. Após 3 horas de vácuo, foi adicionada a solução de hidróxido de cálcio na câmara para que os provetes ficassem imersos por 1 hora;
3. Desligou-se a bomba de vácuo deixando permanecer os provetes imersos em hidróxido de cálcio por  $18 \pm 2$  horas sob pressão atmosférica;
4. Colocou-se os provetes no interior das mangas de borracha e ajustou-se os mesmos com o auxílio das braçadeiras;
5. Posicionou-se os provetes no equipamento de indução de corrente elétrica e aplicou-se as soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio, desempenhando funções de solução catódica e anódica respetivamente;

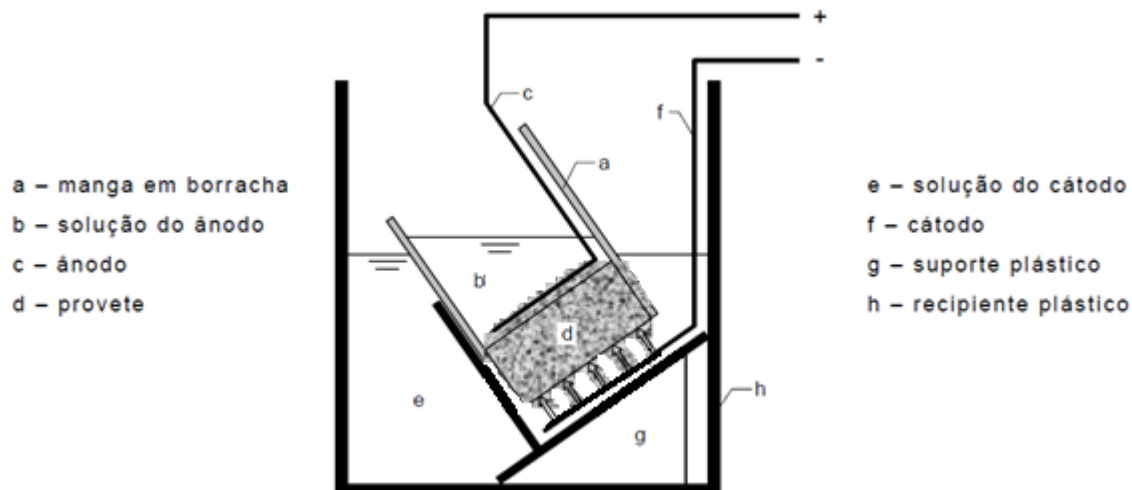


Figura 41 – Esquema do equipamento de indução de corrente elétrica no qual se visualiza a posição correta do betão no interior da manga isoladora juntamente com os diferentes tipos de soluções

De acordo com a norma do ensaio o esquema observado na Figura 41 foi adotado e elaborado um esquema parecido no Laboratório de Materiais de Construção no Departamento de Engenharia Civil, na Universidade do Minho, tal como se pode verificar na Figura 42



Figura 42 – Esquema de ensaio penetração de cloretos usado no laboratório materiais de construção da Universidade do Minho

6. Instalou-se uma corrente elétrica de 30 volts e calibrou-se a mesma através do valor resultante de amperagem, num processo iterativo;

Quadro 93 – Duração do ensaio CTH [52]

Intensidade de corrente inicial, $I_0$ (mA)	Duração do ensaio, $t_{CTH}$ (horas)
$I_0 < 5$	168
$5 \leq I_0 < 10$	96
$10 \leq I_0 < 30$	48
$30 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 120$	8
$120 \leq I_0 < 240$	4
$I_0 > 240$	2

7. Fixada a corrente elétrica de ensaio, registou-se a temperatura inicial da solução anódica -  $T_i$  - e definiu-se o tempo de ensaio -  $t$ ;
8. Decorrido o tempo de ensaio, registou-se novamente a temperatura da solução anódica –  $T_f$ ;
9. Retirou-se os provetes das mangas de borracha, partindo-os em metades e aplicando-lhes a solução de nitrato de prata (Figura 43);



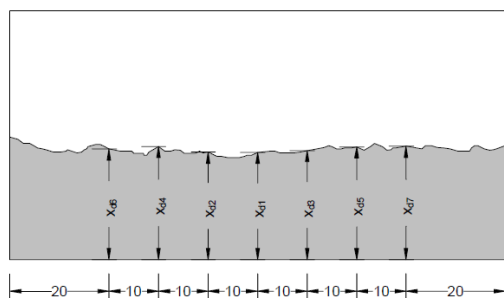
a)



b)

Figura 43 – a) Ensaio de compressão diametral dos provetes b) Verificação da camada penetrada pelos cloretos

Após todo procedimento concluído procedeu-se às leituras dos perfis dos provetes correspondente á penetração dos cloretos, tal como se indica na Figura 44. A profundidade de penetração dos cloretos determina-se pulverizando a espessura dos provetes com uma solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ).



a)



b)

Figura 44 – a) Perfil da medição da profundidade de penetração (mm) dos cloretos; b) Medição da penetração dos cloretos nas composições estudadas

Após a realização das medições dos provetes de todas as composições, procedeu-se à compilação dos dados e ao cálculo da difusão de cloretos de acordo com a equação 7.5, no qual resultou no Quadro 94 os valores finais dos coeficientes de difusão de cloretos para cada uma das composições.

Quadro 94 – Valores dos coeficientes de difusão de cloretos nos betões

Composições de Betão	Coefficiente de difusão de cloretos $D_{nsm} (10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s})$
Padrão	33,64
Padrão_40% CV	13,05
BED_1,7% SP	29,26
BED_40% CV_1,7% SP	17,46

Com estes valores do coeficiente de difusão de cloretos visualizados no Quadro 94 construiu-se um gráfico no qual se pode verificar toda a variação das composições do estudo em causa relativamente à penetração dos cloretos, como se observa na Figura 45.



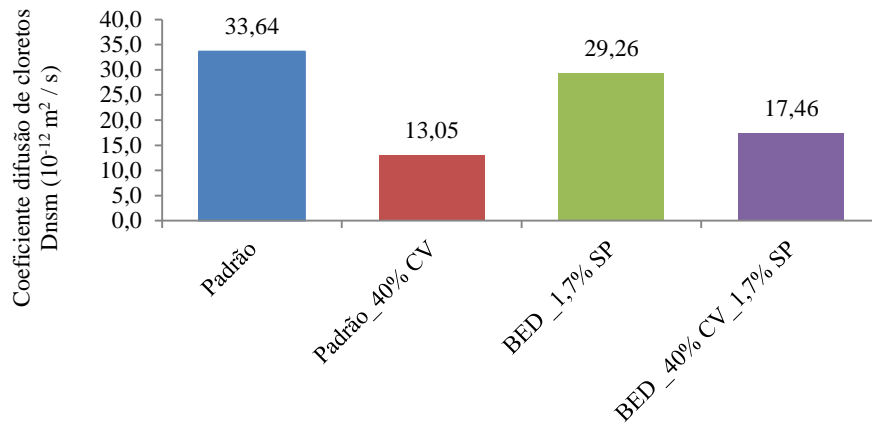


Figura 45 – Variação do coeficiente de difusão de cloretos dos betões

Nas composições ensaiadas, os resultados obtidos mostraram que a introdução de CV foi especialmente benéfica, isto porque possibilitou o aumento significativo da resistência dos betões à migração de iões de cloreto.

Verificou-se tal como nos casos dos ensaios da absorção de água por imersão ou capilaridade, a migração dos iões de cloreto foi condicionada pela porosidade das respetivas matrizes das composições de betão.

Nas composições estudadas parece que a presença de Cinzas Volantes é suficiente para o preenchimento dos poros tal já não se verifica nas dosagens sem Cinzas Volantes.

Tal como outros autores referidos a introdução de CV nas misturas beneficiou claramente a resistência à migração de cloretos, devido à diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio que provocaram, resultante das reações pozolânicas das CV [50]. Este fator poder ser considerado preponderante, o aumento continuado da quantidade de CV deveria levar a uma progressiva diminuição do D<sub>nsm</sub>.

Assim, os resultados obtidos a principal diferença a registar está associada à introdução ou não de CV nas composições.

No Quadro 95 apresentam-se os valores do coeficiente de difusão em estado não estacionário (D<sub>ns</sub>) correspondente a uma classe de resistência à penetração de cloretos, no qual nos baseamos para classificar as nossas composições de estudo.

Quadro 95 – Valores do coeficientes de difusão em estado não estacionário (D<sub>ns</sub>) correspondente a uma classe de resistencia à penetração de cloretos [52]

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, Dns	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 < 10^{-12} \text{ M}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	Ultra elevada

Assim para os betões sem cinzas volantes a classe de resistência à penetração de cloretos resultante é reduzida, já nos betões com CV foi possível obter uma classe de resistência moderada.

## 8 BETÕES EM TIMOR – LESTE

A ilha de Timor situa-se no Arquipélago de Sonda, sendo esta a maior das Pequenas Ilhas de Sonda. Timor é constituído pela parte oriental da ilha, o ilhéu de Jaco, a ilha de Ataúro e o enclave de Oécussi, na costa norte do Timor ocidental. A parte oriental da ilha é percorrida horizontalmente pela cordilheira de Ramelau. A leste da ilha destaca-se o monte Matebian.

No contexto geológico, Timor Leste expõe uma grande diversidade litológica. Esta está associada a francas potencialidades em rochas ornamentais e rochas e minerais industriais, fator que vem de encontro às necessidades básicas imediatas para a reconstrução do território no qual se destacam as potencialidades em matéria-prima para a construção civil e obras públicas.

Num trabalho efetuado anteriormente por Audley-Charles et M. G. na constituição de uma carta geológica simplificada como se visualiza na Figura 46, pode se observar uma grande diversidade litológica e distribuição temporal das unidades geológicas que ocorrem em Timor Leste, mesmo assim com o avanço tecnológico na área da geologia poderá fazer novas pesquisas e sabe-se que muitos outros recursos existirão forçosamente, tal como referido anteriormente, a sua divulgação dependerá da execução de trabalhos de prospeção a grande escala.

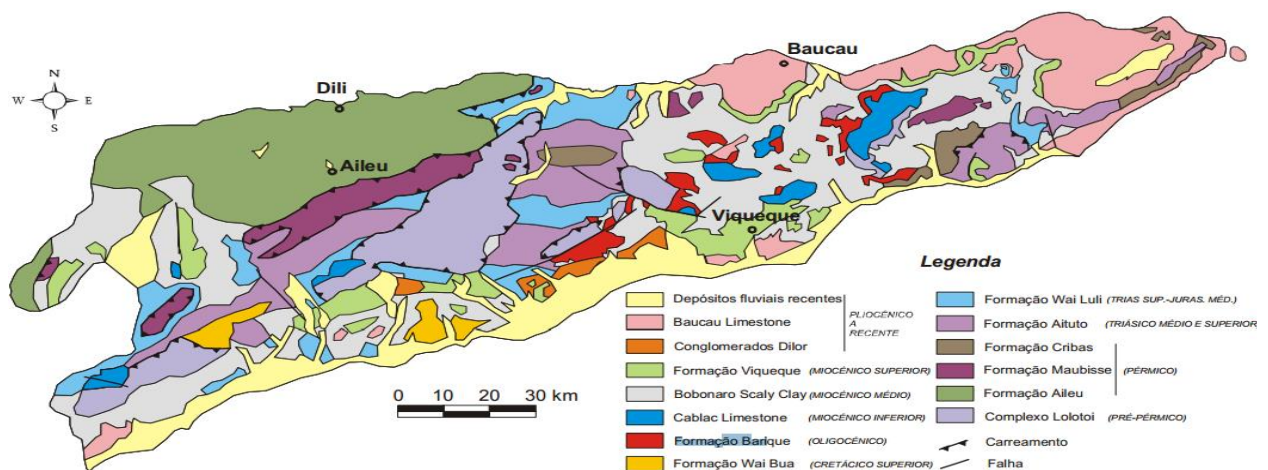


Figura 46 – Carta geológica simplificada de Timor Leste [54]

Os trabalhos futuros passarão pela cooperação de entidades estrangeiras, nomeadamente países CPLP, munidas de conhecimento e capacidade técnica.

Neste cenário é importante a abundância em calcários para fins ornamentais e para a indústria do cimento e/ou da cal e as potencialidades em argilas para a cerâmica estrutural, em relação á parte de agregados destaca-se as rochas ígneas intrusivas e as areias e cascalheiras fluviais o qual constituirão a principal fonte de agregados para usar na construção civil, nomeadamente no fabrico do betão.

Na generalidade, em Timor a tecnologia do betão era pouco frequente na construção civil do país, esta apenas era utilizada com alguma frequência pelos portugueses, tal como se exemplifica (Figura 47 a).



a)



b)

Figura 47 – a) Antigo Mercado em Bacau feito parcialmente em betão por portugueses; b) Em remodelação atualmente

O povo timorense utilizava a construção tradicional sem betão, utilizando o bambu como material de referência de construção, como se observa na Figura 48. O uso do betão para a construção de qualquer infra estruturas da parte dos timorenses foi após a sua independência como se visualiza na Figura 49.



Figura 48 – Casa tradicionais construídas com materiais correntes e acessíveis á população

A construção comparada antes da sua autonomia mudou bastante como se verifica na Figura 49.



Figura 49 – Tipo de construção de casa atual em Timor Leste

O facto de descoberta de novos recursos minerais e petrolíferos levou á modificação da situação económica do país, com mais recurso económico, tal como se vive atualmente. Este facto permitiu captar empresas especializadas na construção civil, nomeadamente na tecnologia do betão possibilitando a construção de novos edifícios, infraestruturas rodoviárias e pontes, assim como outros equipamentos.

Um dos grandes exemplos de construção em Timor Leste é atualmente a construção da ponte de Comoro II a qual se encontra numa fase final com a implementação da tecnologia de betão. Neste projeto da Ponte Comoro I e II foi aplicado betões nos vários elementos (Pilares, Vigas, Lajes) com classes de betão na ordem C25/30 e C50/60, havendo já uma necessidade de controlo do betão e de fiscalização por parte de entidades governamentais, Agência De Desenvolvimento Nacional (ADN) e Ministério as Obras Públicas República Democrática Timor Leste.

Os betões foram fabricados com agregados de Timor Leste e com cimento indonésio Tonasa. Também se usaram adjuvantes da Sika. Nas Figura 50 e 51 podemos ver como exemplo a aplicação de um betão da classe C 25/30 em fundações, pilares e vigas na ponte Comoro.



Figura 50 – Fundações da Ponte Comoro II com uma classe de betão na ordem do C25/30

[55]



Figura 51 – Exemplo do uso duma classe de betão C 50/60 nos pilares da Ponte Comoro II

[55]

O betão destes elementos que se observam nas Figura 50 e Figura 51 pode-se constatar que existe uma elaboração detalhada da parte da equipa técnica sobre as características do betão da Ponte Comoro II usado ao longo da sua construção como se observa na Figura 52.

Rua : Fomento Comoro River  
 Contact : 728 1888 / 724 3585  
 Dili, Timor Leste  
 e-mail : esperanza\_group@yahoo.com

**G&S**

WORKSHEET CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST  
 PROJECT : COMORO BRIDGE II, DILI - TIMOR LESTE  
 LOCATION : DILI - TIMOR LESTE  
 CONTRACTOR : CNT - WDKA JO

**STRENGTH TEST CONCRETE BORE PILE P4**

No	Struktur/lokasi Concrete Class (ft <sup>2</sup> )	Proportion(kg/CuM)					W/C (%)	S/A (%)	Slump (cm)	Date		Sample No	Age Days	Weight (Kg)	Area (cm <sup>2</sup> )	Density g/cm <sup>3</sup>	Load kN	Strength Mpa	Average (Mpa)
		Water	Cement	F. Agg.	C. Agg.	LN				Pouring	Test								
1	Bore Pile P4 A1 Fe 35	190	455	759	975	4.00			16+/- 2	30/11/2012	3/12/2012	1	3	8.305	225	2.461	555	24.67	25.33
												2	3	8.430	225	2.488	585	26.00	
											7/12/2012	3	7	8.495	225	2.517	890	39.56	
												4	7	8.330	225	2.468	810	36.00	
											14/12/2012	5	14						
												6	14						
											28/12/2012	7	28						
												8	28						
												9	28						
2	Bore Pile P4 A2 Fe 35								16+/- 2	5/12/2012	8/12/2012	1	3	8.325	225	2.467	495	22.00	22.67
												2	3	8.255	225	2.446	525	23.33	
											12/12/2012	3	7	8.390	225	2.486	620	27.56	
												4	7	8.350	225	2.47	630	28.00	
											19/12/2012	5	14						
												6	14						
											2/1/2013	7	28						
												8	28						
												9	28						
3	Bore Pile P4 A3 Fe 35								16+/- 2	6/12/2012	9/12/2012	1	3	8.375	225	2.481	680	30.22	28.89
												2	3	8.410	225	2.492	620	27.56	
											13/12/2012	3	7	8.485	225	2.514	675	30.00	
												4	7	8.465	225	2.508	700	31.11	
											20/12/2012	5	14						
												6	14						
											4/1/2013	7	28						
												8	28						
												9	28						
4	Bore Pile P4 B1 Fe 35	190	455	759	975				16+/- 2	3/12/2012	6/12/2012	1	3	8.205	225	2.431	445	19.78	19.00
												2	3	8.240	225	2.441	410	18.22	
											10/12/2012	3	7	8.265	225	2.449	610	27.11	
												4	7	8.400	225	2.489	750	33.33	
											17/12/2012	5	14						
												6	14						
											31/12/2012	7	28						
												8	28						
												9	28						

Figura 52 – Fundações da Ponte Comoro II com uma classe de betão na ordem do C25/30 [55]

Atualmente a construção da nova fábrica de cimento que iniciar-se-á em Janeiro de 2015, visto que os depósitos de calcários existentes na região de Baucau deverão garantir o abastecimento de matéria-prima durante 100 anos e possibilitando produzir novos cimentos. Este facto terá um impacto enorme na indústria da construção civil com utilização da tecnologia do betão, fazendo chegar este produto a pequenos empresários de construção assim como também possibilitando a concretização de grandes projetos a Timor Leste.

Alguns projetos já estão em fase final tal como a ponte Comoro (Figura 53) e outros a iniciar.



Figura 53 – Ponte Comoro quase finalizada com partes em betão [55]



Figura 54 – Ponte Comoro esta finalizada com partes em betão [55]



## 9 CONCLUSÕES

A dissertação pretendeu apurar a viabilidade da aceitação do sistema de composição de betões proposto pelo American Concrete Institute à realidade da construção executada no país em Timor Leste.

Como aproximadamente todos os métodos de composição disponíveis, o método ACI 211.1-91 foi desenvolvido na altura em que o betão era essencialmente produzido por agregados, cimento e água. Devido a esse motivo, a sua aplicação não é fácil ou direta quando adjuvantes minerais ou orgânicos são considerados na mistura e além disso não há forma de conciliar mais de dois tipos de agregados.

O objetivo do estudo passou pela construção de tabelas, à semelhança do que se efetua método ACI 211.1-91 de forma a facilitar/agilizar o processo de composição de betões através de uma metodologia de fácil compreensão para que possa ser utilizado por profissionais experientes assim como por pequenos empreiteiros ou outros profissionais com pouca experiência na área.

Para esta finalidade, definiu-se um programa experimental compreendendo a formulação de diferentes composições de betão utilizando constituintes correntes no nosso país e a caracterização mecânica desses betões.

O estudo concebido para definir a formulação dos betões no enquadramento referido, permitiu a obtenção de betões com a resistência à compressão pretendida, capazes de ser formulados com recurso a tabelas e que cumprem as exigências relacionadas com as classes de exposição ambiental referidas na especificação LNEC E 464, podendo assim ser aplicados em diversas obras de construção civil garantindo um tempo de vida útil de projeto em diversas condições de exposição ambiental.

Este método é um dos poucos que permite enfatizar a arrumação do agregado por frações, é uma pena que esta abordagem (medida da densidade do agregado grosso por frações) não seja estendida ao agregado fino.

O aspeto frágil deste sistema são os valores de água requeridos para a amassadura. Os agregados não são considerados para a previsão da resistência à compressão, a mesma depende exclusivamente da razão a/c.

Portanto, se há diferenças nos agregados e na resistência do cimento, a resistência à compressão obtida para determinada razão a/c varia.

Em sùmula, o estudo desenvolvido mostra viabilidade prática no emprego do método descrito no ACI 211.1-91, na produção de betões com qualidade e que podem perfeitamente ser aplicados em diversas obras de construção civil, demonstrando-se eficaz quando utilizados constituintes produzidos e largamente utilizados na indústria da construção em Portugal.

Este trabalho é portanto um fundamental passo para a aprovação do método proposto pelo ACI uma vez que permitiu obter composições que encontram-se do lado da segurança, atingindo assim os objetivos a que nos propusemos.

Verificou-se que em todos os ensaios efetuados no estudo em causa, segundo os requisitos exigidos pela normalização NP-EN 206-1 para a durabilidade dos betões, observou-se a existência de alguma dispersão nos resultados de ensaios mas não significativa. Esta diferença é notável nos betões das diferentes composições, nomeadamente nos betões correntes em relação aos BED.

É notável nos betões estudados que a introdução da cinza volante aumenta a durabilidade dos betões, a tendência dos resultados é verificada ao longo dos ensaios realizados para avaliação da durabilidade dos betões.

Verifica-se que os betões sem CV têm índices de durabilidades inferiores aos que contém este material.

## **9.1 Estudo Futuro**

Após o estudo concluído em Portugal é importante averiguar a sua utilização em Timor Leste, este deverá ter uma vertente prática em estruturas de construção (Pontes, Edifícios, Barragens, outros). Todo conteúdo de informação da dissertação deve ser aplicado num estudo real sobre o controlo de qualidade do betão, assim como a sua conformidade, aplicado a estudo pratico e real em causa.

Este estudo poderá ser reproduzido e complementado com novos materiais presentes em Timor Leste, adaptando o aos recursos de materiais existentes no país.

A substituição parcial ou total ou adição dos novos materiais ao estudo poderá ser uma alternativa ao estudo em causa, assim como a introdução do metacaulino ou outros, pelo mesmo método de dimensionamento de betão, o ACI. No estudo novo poderá utilizar-se novos aditivos e averiguar qual a sua influência no desempenho á durabilidade dos betões.

O estudo poderá ser complementado com ensaios relacionados com a durabilidade de betões, nomeadamente os ensaios de carbonatação, resistividade elétrica e ultrassons, estes poderão ser realizados para os betões estudados assim como os propostos com os novos materiais.



## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Stanley, *Highlights in the History of Concrete*. 1982.
- [2] NP EN 206:2007 - Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ, 2007.
- [3] J. Smeaton, “Smeaton’s Tower,” 2014. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Smeaton's\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Smeaton's_Tower).
- [4] J. Aspdin, “The Journal of the Society of Estate Clerks of Works,” *J. Soc. Estate Clerks Work.*, vol. 3, no. 29, p. 196, 1890.
- [5] NP EN 197-1:2001/A 1:2005 (Ed. 1) - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Portugal, 2001.
- [6] NP EN 197-1:2012 - Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Portugal: IPQ, 2012.
- [7] J. L. Barroso De Aguiar, *Controlo Da Qualidade do Betão*. Universidade do Minho, Guimarães, 2008, p. 26.
- [8] P. Cunha, P., J., *Tese de Doutoramento - Conformidade da Resistência à Compressão do Betão*. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2011.
- [9] NP EN 12620:2002 - Agregados para betão. Portugal: IPQ, 2002.
- [10] NP EN 13055-1:2005/AC :2010 - Agregados leves. Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção. Portugal: IPQ, 2010.
- [11] J. B. Aguiar, “Materiais de construção I.” Guimarães, Portugal, 2005.
- [12] LNEC E 467:2006 - Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos. Portugal: LNEC, 2006.
- [13] LNEC E 461:2007 - Betões. Metodologias para prevenir reações expansivas internas. Portugal: LNEC, 2007.

- [14] NP EN 1008:2003 - Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Portugal, 2003.
- [15] NP EN 934-2:2009 -Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção Parte 2: Adjuvantes para betão Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. Portugal: IPQ, 2009.
- [16] I. Bauer, F, L, A;Olivan, L, “Accelerated Tests for Concrete Made with Slag Cement,” A.S. Testing, Ed., 1978.
- [17] EN 12878:2005 (Ed. 2) - Pigmentos para a coloração de materiais de construção à base de cimento e/ou cal. Especificações e métodos de ensaio. Portugal: IPQ, 2005.
- [18] NP EN 450-1:2012 (Ed. 3) - Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Portugal: IPQ, 2012.
- [19] NP EN 13263-1:2005+A1:2009 (Ed. 1) - Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade. Portugal: IPQ, 2009.
- [20] P. Cachim, A especificação do betão segundo a NP EN 206-1. Portugal: Universidade de Aveiro, p. 39.
- [21] LNEC E 462 - 2004 - Betão. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário. LNEC, Lisboa, Portugal, 2004.
- [22] NP EN 13670-1:2011 - Execução de estruturas em betão. Portugal.
- [23] LNEC E 466 - Fíleres calcários para ligantes hidráulicos. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional Engenharia Civil, 2005.
- [24] NP EN 1504-2:2006 - Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de proteção superficial do betão. Portugal: IPQ, 2006.
- [25] LNEC E 464:2007 Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional Engenharia Civil, 2007.

- [26] LNEC E 465 - Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS. Lisboa , Portugal: Laboratório Nacional Engenharia Civil, 2007.
- [27] NP EN ISO 9001:2008 - Sistemas de gestão da qualidade. Requisitos (ISO 9001:2008/Cor 1:2009). Portugal: IPQ, 2008.
- [28] NP EN 12350-1:2009 (Ed. 2) - Ensaio do betão fresco. Parte 1: Amostragem. Portugal: IPQ, 2009.
- [29] NP EN 12390-3:2011 - Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Portugal: IPQ, 2011.
- [30] “SECIL - Cimento Portland, CEM I 42,5R,” 2014.
- [31] NP EN 196-1:2006 (Ed. 3) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Portugal: IPQ, 2006.
- [32] ACI Committee 211, “ACI 211.1-91 (Reapproved 2002), Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavyweight, and Mass Concrete,” 2002.
- [33] NP EN 933-2:1999 (Ed. 1) - Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Portugal: IPQ, 1999.
- [34] American Concrete Institute, Ed., ACI 214R-2 - Evolution of strength test results of concrete, ACI Commit. Detroit, 2002.
- [35] American Concrete Institute, Ed., ACI, 318 - Building Code Requirement for Structural Concrete, ACI Commit. Detroit, 2008.
- [36] ASTM International, ASTM, C192/C192M - Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. American: ASTM, 2007.
- [37] A. S. Coutinho, Fabrico e Propriedades do betão, Volume 1. Lisboa, Portugal, 1988.
- [38] ASTM International, ASTM C29 / C29M:2009 - Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. ASTM, 2009.

- [39] ASTM C 136-90 - Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American United States: ASTM.
- [40] NP EN 1097-3:2002 (Ed. 2) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Portugal: IPQ, 2002.
- [41] NP EN 12390-3:2009 (Ed. 2) - Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes. Portugal: IPQ, 2009.
- [42] NP EN 12390-2:2009 (Ed. 2) - Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. Portugal: IPQ, 2009.
- [43] NP EN 12350-2:2009 (Ed. 2) - Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. Portugal: IPQ, 2009.
- [44] B. M. M. Silva, Betão leve estrutural com agregados de argila. FEUP, Porto, 2007.
- [45] Instituto Português da Qualidade, Ensaio de betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes. - Norma Portuguesa NP EN 12390-3. Caparica: IPQ, 2009.
- [46] J. Costa, A.; Appleton, “ESTRUTURAS DE BETÃO I,” Instituto Superior Técnico, 2002.
- [47] A. Coutinho, A. S.; Gonçalves, Fabrico e propriedades do betão - Volume II, Volume II. Lisboa, Portugal, 2006.
- [48] LNEC E 393 - Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa, Portugal: LNEC, 1993, p. 2.
- [49] LNEC E 394 - Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. Lisboa, Portugal: LNEC, 1993, p. 2.
- [50] A. Azevedo, “Betões De Elevado Desempenho Com Incorporação De Cinzas Volantes,” Universidade do Minho, 2002.
- [51] IPQ, NP 1378:1976 – Agregados. Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio. Lisboa, Portugal: IPQ, 1976.



- [52] T. Luping, “Chloride transport in Concrete – Measurement and Prediction,” Chalmers university of Technology, 1996.
- [53] LNEC E 463 Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa, Portugal: LNEC, 2004, p. 8 P.
- [54] M. G. Audley-Charles, “The geology of Portuguese Timor,” Mem. Geol. Soc. London, p. n.o 4, 76 p., 13, 1968.
- [55] “Agência De Desenvolvimento Nacional E Agência De Planeamento Económico E Investimento,” Díli, 2012.