



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Borges Loureiro Otimização da Quantidade de Cinzas Volantes em Betões – Benefício Económico

Pedro Miguel Borges Loureiro

Otimização da Quantidade de Cinzas Volantes
em Betões – Benefício Económico

UMinho | 2013

outubro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Borges Loureiro

Otimização da Quantidade de Cinzas Volantes
em Betões – Benefício Económico

Tese de Mestrado
Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

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

outubro de 2013

Agradecimentos

No término deste meu estudo científico gostaria de expressar o meu mais sincero e honroso agradecimento as todas as pessoas e entidades que me auxiliaram de alguma forma a realizar esta dissertação de mestrado, frisando mais concretamente:

O Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar, que me propôs e coordenou este estudo, agradeço a sua inteira e pronta disponibilidade para me auxiliar nas minhas pequenas e grandes dúvidas no decorrer de todo o processo, bem como a confiança que em mim depositou para levar a cabo esta investigação chegando por fim aos objetivos delineados inicialmente.

Os funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Carlos Jesus e Fernando Pokee, o meu muito obrigado pelo apoio prestado na obtenção dos materiais necessários para a realização das amassaduras, bem como o auxílio nos trabalhos executados no laboratório.

A empresa Britaminho – Granitos & Britas do Minho, Lda. pelo fornecimento gratuito dos agregados necessários para a realização do estudo bem como a entrega das fichas técnicas dos agregados por si produzidos.

A minha família e namorada, pelo apoio, amizade e carinho demonstrado no decorrer da minha vida, felicito-os pelo meu crescimento enquanto homem, que me permitiu obter um olhar crítico sobre o mundo em que vivemos e que me ajudou a chegar a este ponto que muito me orgulho. Agradeço-lhe mais concretamente pelo incentivo, compreensão e paciência que demonstraram para comigo no decorrer desta minha dissertação.

Resumo

O presente trabalho de investigação teve como objetivo determinar qual o máximo benefício económico ao substituir, no betão, o cimento por cinzas volantes.

O betão é um material amplamente utilizado pela população mundial, e como a população está a crescer, o consumo deste material também seguirá o mesmo sentido. O crescimento sustentável é um problema de grande importância a nível mundial, por isso, na construção deverá existir a consciencialização para obter materiais e construções mais sustentáveis.

No âmbito deste trabalho, procurou-se estudar uma composição de um betão que apresente a maior quantidade possível de cinzas volantes em substituição do cimento, sem que seja alterada a sua classe de resistência. Para o estudo das composições de betões recorreu-se ao método ACI 211, método já consagrado a nível internacional. Ao seguir esta metodologia chegou-se à conclusão que é possível obter um betão com a mesma classe de resistência se, no máximo, substituir 20% de cimento por cinzas volantes. Ao aumentar a percentagem a substituir a classe de resistência cai para o nível inferior, conservando-se nesse nível se, no máximo, substituir 40% de cimento por cinzas volantes.

Após realização dos trabalhos experimentais, 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, sendo que a principal novidade foi a inclusão das cinzas volantes neste mesmo método, que inicialmente não prevê a inclusão de adições.

No final chegou-se à conclusão que é possível reduzir em cerca de 12.75% a 17.28%, o custo do betão, recorrendo à introdução de cinzas volantes.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Metodologia ACI; Betão; Cinzas volantes, Benefício económico.

Abstract

This research project aims to determine the maximum economic benefit to replace in concrete, cement with fly ash.

Concrete is a material widely used by the world's population, and as the population is continuously growing, the use of this material will also follow in the same sense. Sustainable growth is an issue of great worldwide importance, being so, construction should be conscience to obtain materials that are more sustainable.

In the extent of this project, we look to find a composition for concrete that will include the greatest quantity of fly ash to replace cement, without altering its strength abilities. To be able to study the compositions of concrete we used the AC1 211 method, recognized on an international level. Following this method, we came to the conclusion that it is possible to achieve concrete with the same level of strength if, at the max, substitute 20% of cement by fly ash. By increasing the percentage of replace the strength drops to the lower level, keeping it at this level, at max, for 40% of cement replaced by fly ash.

After completion of this experimental work , it was concluded that it is possible to produce concrete with consistency and strength in accordance with values initially specified , using the methodology described in ACI 211 and using current constituents in the construction industry, and the main novelty was the inclusion of fly ash in the same method, which initially did not foresee inclusion for additions.

In the end, it came to the conclusion that it is possible to reduce the cost of concrete by about 12.75 % to 17:28 %, by inserting fly ash.

Keywords : Sustainability , Methodology ACI , Concrete , Fly Ash, Economic benefit .

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e objetivos	2
1.2. Organização da dissertação	3
2. Sustentabilidade	5
2.1. A necessidade do desenvolvimento sustentável	6
2.2. Sustentabilidade na construção	9
2.3. A sustentabilidade do betão	10
3. O Betão	13
3.1. Generalidades	14
3.2. Constituintes de Betão	16
3.2.1. Cimento	16
3.2.2. Agregados	21
3.2.3. Água da amassadura	24
3.2.4. Adjuvantes	26
3.2.5. Adições	29
3.3. Produção do betão	32
3.3.1. Generalidades	32
3.3.2. Fabrico	33
3.3.3. Transporte	35
3.3.4. Colocação	36
3.3.5. Compactação	37
3.3.6. Cura	37
3.4. Classificação do Betão	39
3.4.1. Classes de exposição relacionadas com ações ambientais	39
3.4.2. Classes de consistência	44
3.4.3. Classes relacionadas com a máxima dimensão do agregado	45
3.4.4. Classes de resistência à compressão	45
3.4.5. Classes de massa volúmica do betão leve	45
4. Métodos de Estudo de Composição de Betões	47

4.1. Generalidades.....	48
4.2. Descrição do Método ACI	50
4.2.1. Generalidades.....	50
4.2.2. Procedimento.....	50
5. Estudo da Composição	57
5.1. Estudo de composição de betões utilizando cinzas volantes.....	58
5.2. Materiais utilizados no estudo	58
5.2.1 Cimento	58
5.2.2. Cinzas Volantes	59
5.2.3. Agregados	60
5.2.4. Água da Amassadura	64
6. Trabalho Experimental	73
6.1. Generalidades.....	74
6.2. Composições estudadas.....	74
6.3. Realização da amassadura.....	76
6.3.1. Ensaio de Abaixamento	78
6.3.2. Ensaio da determinação da massa volúmica.....	80
6.4. Moldagem, desmoldagem e cura	82
6.5. Ensaio de resistência à compressão.....	84
6.6. Critérios de conformidade de resistência à compressão.....	87
6.6.1. Verificação da conformidade	87
6.6.2. Determinação da classe do betão.....	88
7. Análise Económica.....	89
8. Estudos Futuros	93
9. Conclusão	97
10. Referências Bibliográficas	99
11. Anexos	103

Índice de figuras

Figura 1 – Previsão do crescimento mundial para 2040	6
Figura 2 - Previsão do consumo de energia a nível mundial até 2040.....	7
Figura 3 - Previsão das emissões de dióxido de carbono para 2040	7
Figura 4 - Evolução da resistência à compressão com a idade	15
Figura 5 - Evolução da resistência à compressão dos cinco betões experimentados.....	19
Figura 6 - Carote que demonstra a pasta de cimento envolvendo os agregados	24
Figura 7 - Visualização ao microscópio de uma amostra de cinzas volantes...	31
Figura 8 - Ilustração de uma betonagem.....	56
Figura 9 - Cimento Secil - CEM I 42.5R	58
Figura 10 - Betoneira utilizada nas amassaduras	76
Figura 11 - Cone de Abrams utilizado para o ensaio de abaixamento	78
Figura 12 - Exemplo de molde utilizado nas amassaduras	83
Figura 13 - Mesa vibratória.....	83
Figura 14 - Prensa hidráulica existente no laboratório de materiais de construção (UM).....	84
Figura 15 - Provete antes e depois do ensaio para determinação da classe de resistência à compressão.....	86

Índice de quadros

Quadro 1 - Designação dos cimentos	18
Quadro 2 - Requisitos mecânicos expressos como valores característicos especificados.....	19
Quadro 3 – Classes de exposição.....	39
Quadro 4 – Valores limites das classes de exposição para o ataque químico provenientes de solos naturais e de águas neles contidas	41
Quadro 5 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos	42
Quadro 6 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para vida útil de 50 anos	43
Quadro 7 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos	43
Quadro 8 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos	43
Quadro 9 – Classes de abaixamento	44
Quadro 10 – Classes de compactação	44
Quadro 11 – Classes Vêbê	44
Quadro 12 – Classes de espalhamento	44
Quadro 13 – Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal e para betão pesado	46
Quadro 14 – Classes de resistência à compressão para betão leve.....	46
Quadro 15 – Classes de massa volúmica do betão leve.....	46
Quadro 16 – Abaixamento recomendado em função do tipo de construção	51
Quadro 17 – Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento	52
Quadro 18 – Relação entre razão a/c e resistência à compressão do betão ...	53
Quadro 19 – Volume de agregado grosso por unidades de volume de betão .	54
Quadro 20 - Primeira estimativa para massa do betão fresco.....	55
Quadro 21 - Caracterização do cimento Portland CEM I 42.5R [32].....	59
Quadro 22 - Resultados obtidos após ensaio granulométrico	62
Quadro 23 - Capacidade do recipiente.....	63
Quadro 24 - Resultado do ensaio para a determinação da baridade dos agregados	64

Quadro 25 - Dados mais relevantes para iniciar o estudo das composições de betões	65
Quadro 26 - Resultado da estimativa da quantidade de água necessária para a amassadura.....	65
Quadro 27 - Resultado da relação entre razão a/c e resistência à compressão do betão	66
Quadro 28 - Resultado das quantidades de ligante a utilizar	67
Quadro 29 - Resultado do volume de agregado grosso por unidade de volume de betão	67
Quadro 30 - Resultado da quantidade de agregado grosso necessária	68
Quadro 31 - Primeira estimativa de massa volúmica do betão	69
Quadro 32 - Resumo das quantidades dos constituintes a utilizar nas amassaduras.....	70
Quadro 33 - Ajuste da quantidade de água de amassadura	71
Quadro 34 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m ³ de betão	74
Quadro 35 - Quantidade de material necessário para a realização de 0.03 m ³ de betão	75
Quadro 36 - Resultado da quantidade de água presente nos agregados	77
Quadro 37 - Ajuste da quantidade efetivamente utilizada	77
Quadro 38 - Ensaio de abaixamento (discrção do método)	79
Quadro 39 - Resultados relativos ao ensaio de abaixamento	80
Quadro 40 - Síntese do método utilizado para a determinação da massa volúmica do betão	81
Quadro 41 - Comparação entre da massa volúmica obtida e a esperada	82
Quadro 42 - Ensaio da resistência à compressão (discrção do método)	85
Quadro 43 - Resultados obtidos relativos aos ensaios de resistência à compressão.....	86
Quadro 44 - Critérios de conformidade para a resistência à compressão do betão	87
Quadro 45 - Verificação dos critérios de conformidade.....	87
Quadro 46 - Classe de resistência à compressão do betão	88
Quadro 47 - Ficha de consumos para obter o betão I	91
Quadro 48 - Ficha de consumos para obter o betão III	91
Quadro 49 – Ficha de consumos para obter o betão IV	91
Quadro 50 - Conclusão sumária entre os betões I, III, IV.....	92

Lista de Abreviaturas

ACI – American Concrete Institute

EIA – International Energy Agency

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

INE – Instituto Nacional de Estatística

EUA – Estados Unidos de América

CEM – Cimento

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EDP – Energias de Portugal

CV – Cinzas Volantes

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

O betão nos dias que correm é cada vez mais utilizado pela indústria da construção, apesar de desta indústria mostrar cada vez mais interesse no desenvolvimento e utilização de novos materiais, com o intuito de reduzir os impactos associados.

Apesar de o betão ser um material muito enraizado na cultura da construção civil em Portugal, muito por causa das satisfatórias características mecânicas e de durabilidade, é sem dúvida alguma um material pouco amigo do ambiente e cada vez mais caro. Sabendo que o betão é um material composto, e que entre outros constituintes utiliza na sua composição um ligante, que normalmente é o cimento. Pois bem, aqui reside o grande problema, sendo o cimento um produto que implica um elevado número de operações e maquinaria pesada para o produzir leva-o a ser “rotulado” como um produto com muita energia incorporada e conseqüentemente a contribuir para o aumento das emissões de gases que provocam o efeito de estufa. Existem investigadores que dizem mesmo que a energia consumida no fabrico do cimento representa cerca de 80 a 90% da energia necessária para o fabrico do betão e que a produção de uma tonelada de cimento liberta uma tonelada de dióxido de carbono para a atmosfera [1].

Por tudo isto, e porque o consumo de betão está a aumentar com o crescimento da população mundial é imperativo que se encontrem soluções para tornar o betão num material mais sustentável. Logo, existem investigadores [3] que chegaram à conclusão que a substituição parcial de cimento por adições nomeadamente, cinzas volantes, sílica de fumo e escórias de alto-forno, podem contribuir para uma diminuição acentuada no custo ambiental.

O propósito deste trabalho passa por desenvolver um estudo sobre composições de betões que implique a utilização de cinzas volantes, para dessa forma diminuir substancialmente a percentagem total de cimento presente no betão. O objetivo final será encontrar uma percentagem ótima de cinzas volantes que possam substituir o cimento sem contudo diminuir as

qualidades do betão, nomeadamente a sua resistência à compressão. Esse objetivo será alcançado quando obter uma percentagem de cinzas volantes que não contribuam para a diminuição da classe resistência quando comparando com o betão de referência que não irá conter nenhum tipo de adições. Importa acrescentar que o desenvolvimento do estudo das composições dos betões seguirá o método ACI 211.1-91 [2], que é já um método utilizado e reconhecido mundialmente. No final será realizado um estudo económico para saber, com melhor exatidão, qual o proveito financeiro que as cinzas acrescentam ao betão, visto que, é já reconhecido que estas atribuem ao betão um enorme proveito ambiental.

1.2. Organização da dissertação

A dissertação está organizada em dez capítulos, sendo que no primeiro se faz a contextualização da problemática e a justificação da escolha do objeto de estudo nesta investigação. Apresentam-se também os objetivos gerais e concluiu-se com a apresentação da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo aborda-se o tema da sustentabilidade, define-se o problema que a humanidade tem em mãos. Indica-se o possível futuro sem um desenvolvimento sustentável e por último aponta-se como a construção, e mais propriamente o betão, contribuem para o acentuar do problema.

No terceiro e quarto capítulo realiza-se o levantamento do estado da arte. O capítulo três trata o material betão indicando os seus constituintes, a sua produção bem com a classificação do betão, sendo abordadas as classes de exposição ambiental, consistência, abaixamento e resistência à compressão. Já o capítulo quatro aborda alguns métodos que estudam a composição de betão e é descrito essencialmente o método ACI.

No quinto capítulo inicia-se uma componente mais prática desta investigação, sendo realizado o estudo das composições de betões, este estudo prevê a utilização do método ACI, e tem como objetivo definir composições que contenham cinzas volantes.

No sexto capítulo dá-se o início da campanha experimental, onde são descritos todos os trabalhos realizados em laboratório. Entre outros trabalhos são enumerados os trabalhos de amassadura e os ensaios de determinação da resistência á compressão dos betões previamente estudados. No final verificam todos os critérios de conformidade e encontra-se a classe de resistência dos betões estudados.

No sétimo capítulo elabora-se um estudo económico, onde se compara o betão de referência com o betão contendo maior percentagem de cinzas volantes, sem contudo ver diminuída a sua classe de resistência.

No final, são apresentadas as conclusões, referências bibliográficas e os anexos.

2. Sustentabilidade

2.1. A necessidade do desenvolvimento sustentável

Devido ao contexto atual é necessário, cada vez mais, olhar para a sustentabilidade como um fator de extrema importância para o desenvolvimento mundial. O crescimento da população é já um dado adquirido. Segundo alguns estudos realizados há quem aponte para um aumento de cerca de 2000 milhões de novos habitantes a nível mundial já em 2040, ou seja, a população mundial num espaço de trinta anos ultrapassará o impressionante número dos 9000 milhões de habitantes (fig.1). Este crescimento é impulsionado sobretudo por países do continente Asiático e Africano. [3]

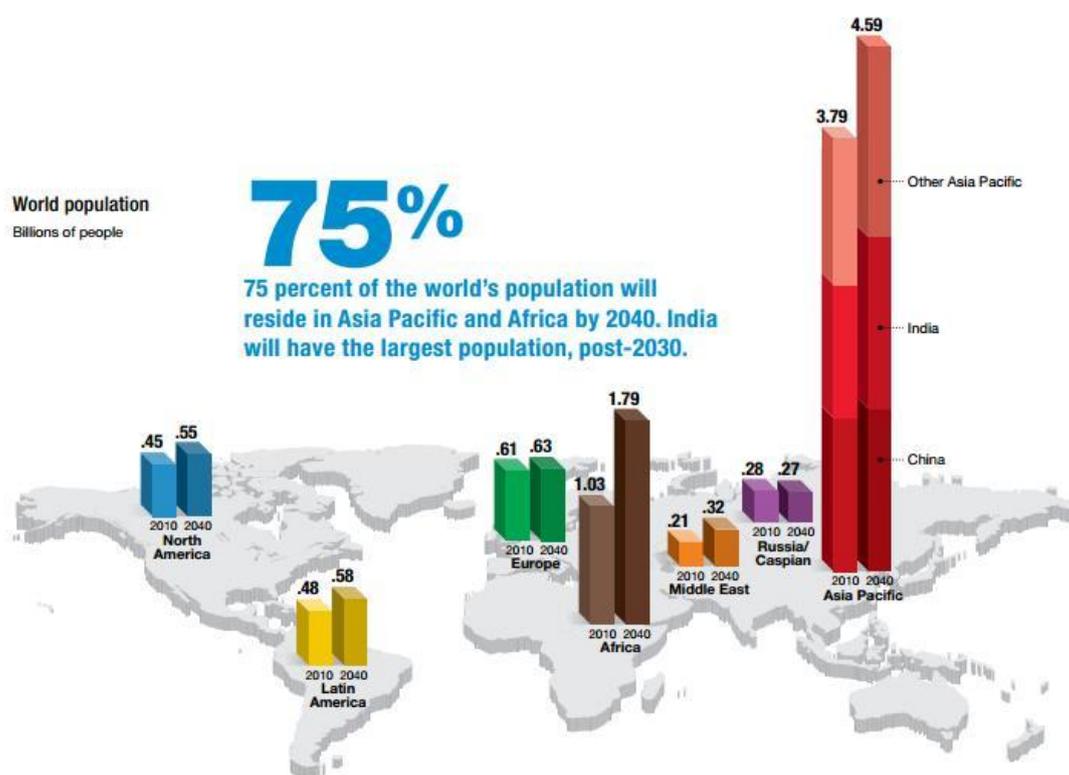


Figura 1 – Previsão do crescimento mundial para 2040 [3]

Com a perspetiva de aumento populacional e do crescimento económico a nível mundial assistir-se-á a um aumento significativo da procura de energia. Existem agências que já desenvolveram estudos sobre este crescimento, nomeadamente a IEA (International Energy Agency) indica que a procura de energia crescerá cerca de 1,2% ao ano até 2035, isto significa que existirá um aumento da procura de energia de cerca de 35% relativamente a 2010 (fig.2). A

China, Índia e os países Africanos contribuirão com 53% do crescimento da procura de energia [3].

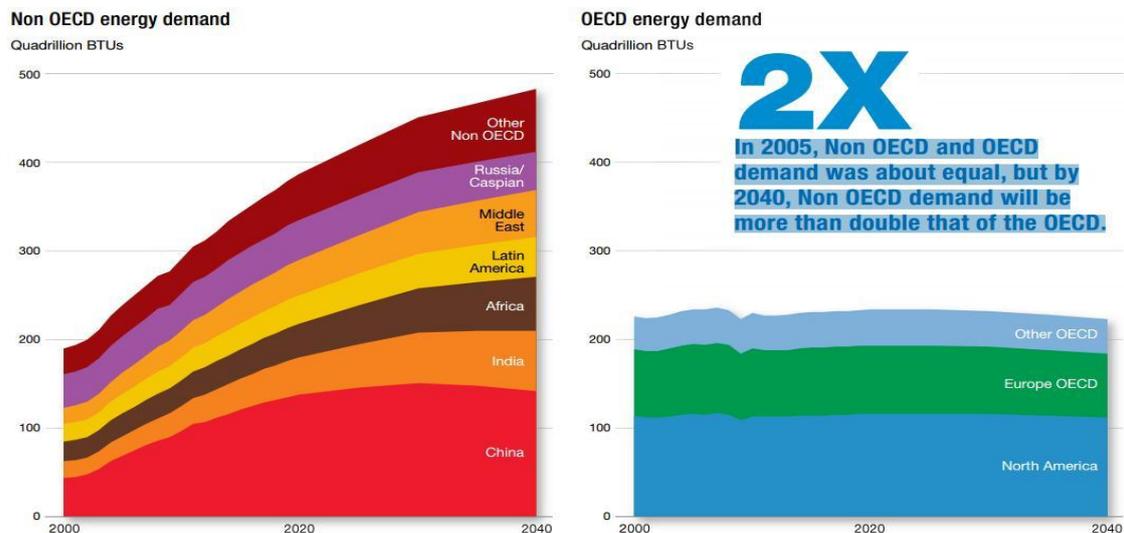


Figura 2 - Previsão do consumo de energia a nível mundial até 2040 [3]

Por consequência ao aumentar a procura/consumo de energia, nomeadamente as energias que derivam de produtos fósseis, o nível de emissões de dióxido de carbono (CO₂) (gás que contribui para o aumento do efeito de estufa) tenderá a seguir a mesma orientação. Nos últimos anos, a taxa de concentração de CO₂ na atmosfera tem vindo a aumentar cerca de 0.6% ao ano. Ao relacionar este dado com o aumento da população mundial, já anunciado, é admitido que as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, por volta do ano 2035 cheguem aos 42.3 mil milhões de toneladas [3].

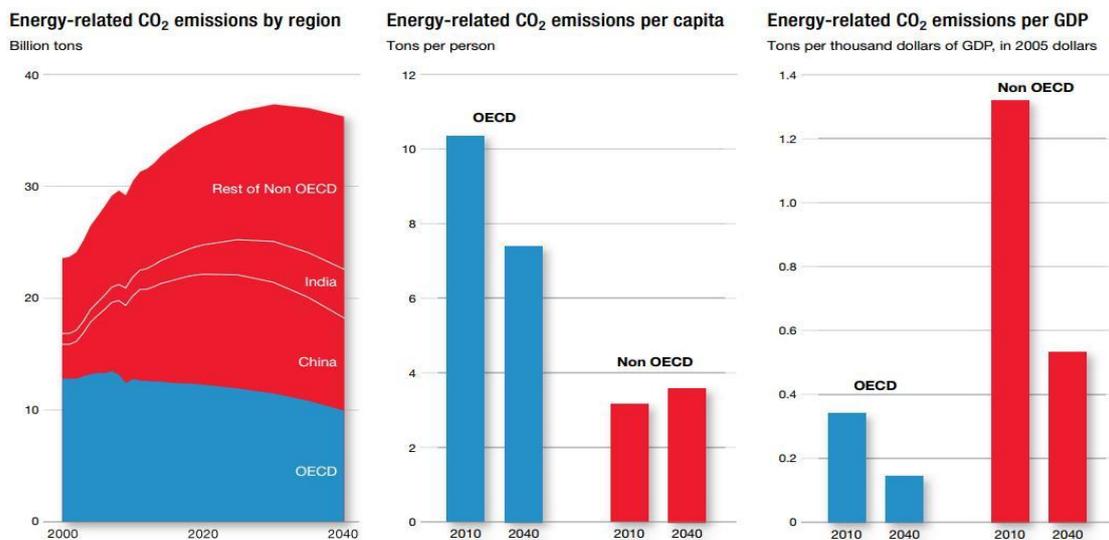


Figura 3 - Previsão das emissões de dióxido de carbono para 2040 [3]

A figura 3 reflete o aumento das emissões de dióxido de carbono, indicando também os principais responsáveis. Assiste-se então, que grande parte da responsabilidade deste aumento recai sobre os países não pertencentes a OCDE (fig.3). Esse facto justifica-se com a forte evolução de economias emergentes, nomeadamente as Asiáticas e Africanas. A estabilidade ou o pequeno aumento das emissões de CO₂ por parte dos países pertencentes à OCDE também facilmente se justifica com a mudança de mentalidades e políticas que procurem uma maior eficiência energética. Contudo a crise que se tem assistido na Europa também contribuiu significativamente para esse desfecho positivo. Pois é essencial que sejam adotadas políticas de eficiência energética, e inculcar uma maior sensibilização às populações mundiais para desse modo promover a conservação do planeta, minorando ou mesmo eliminando as causas que contribuem para degradação do meio ambiente.

Então poder-se-á concluir que existem fatores primordiais que impulsionam cada vez mais a necessidade emergente do chamado desenvolvimento sustentável. Fatores como o crescimento abrupto da população, a urbanização do planeta, a enorme expansão do consumo e as escolhas de tecnologias que satisfaziam necessidades de curto prazo, sem se considerarem as consequências que essas poderiam arrastar, comprometeram em muito o futuro do planeta. Grande parte da matéria-prima consumida no planeta é muitas vezes devolvida ao ambiente sob a forma de poluição e ocupação dos solos. Tudo isto acarreta consequências irreversíveis ao longo dos anos. As mudanças climáticas e o aquecimento global são exemplos das consequências que derivam da má utilização, por parte do homem, das matérias-primas disponíveis no planeta.

O desenvolvimento sustentável é um conceito sistémico que é facilmente traduzido num modelo de desenvolvimento global que agrega as características de desenvolvimento ambiental. O termo foi utilizado pela primeira vez no seio da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, na elaboração do relatório de Brundtland, em 1987. Segundo o mesmo relatório o desenvolvimento sustentável era aquele que *“procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar*

que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e económico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais”.

2.2. Sustentabilidade na construção

Olhando mais singularmente para a indústria da construção, nomeadamente o sector dos edifícios, visto ser este o sector económico mais influente na Europa, assiste-se no entanto, a um claro desinteresse por parte dos construtores. Estes baseiam-se basicamente em métodos de construção tradicionais e mão-de-obra pouco qualificada, tais factos conduzem a consumos muito elevados de matérias-primas, de recursos energéticos não renováveis e pela produção exagerada de resíduos.

Genericamente, a construção de edifícios é responsável pelo consumo de 40% dos recursos minerais (pedra, brita, areia, etc.), 25% da madeira, 40% da energia e 16% da água [4]. No nosso panorama nacional, e apesar dos dados estatísticos não ilustrarem o quadro real, estima-se que os edifícios (habitação e serviços) durante a fase de utilização são responsáveis pelo consumo de cerca de 20% dos recursos energéticos nacionais, 6,7% do consumo de água e pela produção anual de 420 milhões de metros cúbicos de águas residuais [5]. Ainda de acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE), a indústria da construção é responsável pela produção anual de cerca de 7,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos.

Tais factos retratam um cenário obscuro e potenciam um aumento de impactos ambientais, sociais e económicos. Desta forma, os três pilares em que assentam o crescimento sustentável são comprometidos, impossibilitando as gerações futuras de terem as mesmas possibilidades das gerações presentes em satisfazerem as suas necessidades.

Mesmo existindo técnicas de construção de comprovada qualidade que possibilitam uma maior eficiência nas três vertentes que suportam a teoria da sustentabilidade, grande parte dos edifícios construídos ou renovados, ainda

são realizados utilizando as técnicas de sempre. Este facto sucede-se muito devido á falta de consciência por parte dos construtores e dos compradores, que ainda olham para a sustentabilidade na construção como um acréscimo de custo aos valores globais da obra, sem contudo olhar aos benefícios que podem obter a longo prazo. Para tentar mudar este panorama a Comissão Europeia propôs a realização de ações para salientar os benefícios que a construção sustentável pode trazer a longo prazo, e ainda efetuou a revisão dos códigos, normas e regulamentos na área da construção, através da incorporação de preocupações associadas à sustentabilidade neste domínio.

2.3. A sustentabilidade do betão

Com o desenvolvimento de tecnologias que contribuam cada vez mais para o acentuar da sustentabilidade na construção, é natural que comecem a aparecer materiais mais sustentáveis do que outros. E olhando mais concretamente para o betão, sabe-se à partida que é um material composto e que utiliza na sua composição o cimento, para proporcionar a coesão necessária entre os seus constituintes. Conferindo a este mesmo uma resistência à compressão que todos apreciam e que convenceu a população mundial durante os últimos anos, levando esta a abandonar quase por completo, em meados do século XX, a execução de construções, que até então, utilizavam predominantemente o ferro/aço.

Naturalmente que o betão não é um exemplo de sustentabilidade, muito por culpa da incorporação de cimento na sua composição. Todo o processo de fabrico de cimento acarreta uma elevada fatura ambiental, isto é, a este processo estão associados vários impactos ambientais de extrema relevância. Para fabricar cimento existem essencialmente duas fases distintas, a extração da matéria-prima, nomeadamente a argila e o calcário, e a montante temos a produção de cimento e clínquerização. O desmoronamento e erosão do solo, a poluição do ar, a contaminação de águas, a perturbação de habitats, a redução da biodiversidade e a poluição sonora são impactos relacionados com a primeira fase do processo, já na segunda fase os principais impactos associados são o aquecimento global e a poluição do ar. Todos estes impactos

derivam essencialmente da aplicação de maquinaria pesada, que utilizam essencialmente combustíveis fósseis, durante o todo o processo de produção.

Como o betão já faz parte do quotidiano das pessoas (há mesmo quem defenda que o betão é o melhor amigo do homem), por muito que não tenha um comportamento ambiental de exceção, é extremamente complicado extinguir este material de um momento para o outro, tanto devido às suas características funcionais como devido ao seu enraizamento na cultura das pessoas a nível mundial. Por isso tem existido um esforço da comunidade científica para de algum modo tornar o betão mais sustentável. Uma das soluções já encontrada será diminuir a quantidade de cimento presente na composição do betão, substituindo-o por cinzas volantes. Este é um material com características semelhantes às do cimento e como é já um subproduto, quando se adiciona ao betão, torna-o diretamente mais sustentável.

Contudo, não se pode desprezar os outros dois pilares que apoiam a sustentabilidade. É verdade que no plano ambiental o betão não tem um comportamento positivo, mas se olharmos ao plano social, poder-se-á afirmar que é um material globalmente aceite, e que contribui para um aumento da qualidade e durabilidade dos edifícios, aumentando o conforto e a segurança das pessoas.

No plano económico, poder-se-á aferir que está vulnerável e diretamente ligado à flutuação do preço dos combustíveis. E como se perspectiva uma diminuição das reservas naturais de petróleo é seguro afirmar que o aumento progressivo do preço será uma tendência natural.

Neste trabalho estudar-se-á qual a percentagem máxima de cimento que poderá ser substituída por cinzas volantes, sem que a classe de resistência do betão seja diminuída. Posteriormente será realizada uma análise económica, comparando o betão já otimizado com o betão de referência, que só contém cimento. Quantificando assim qual o ganho, em termos económicos, com a diminuição do cimento em detrimento das cinzas volantes.

3. O Betão

3.1. Generalidades

O betão é uma rocha artificial que deriva da mistura, nas devidas proporções, de um ligante hidráulico, agregados grossos e finos, água e possivelmente adjuvantes. Quando o ligante entra em contacto com a água reagem e dão origem a um endurecimento, posteriormente a mistura obtém coesão que lhe possibilita ser usada na construção civil.

Esta forma de produzir um material de construção não é assim tão recente, visto que, já há vários anos que o Homem junta pedras e areias utilizando um ligante, que inicialmente era o barro (argila). Mas o facto de este ligante não possuir características de durabilidade minimamente desejáveis, fez dele um produto bastante ultrapassado comparativamente aos utilizados na atualidade. Provavelmente e segundo relatos ao longo da história o betão começa a alcançar a notoriedade na construção após a descoberta do cimento Portland. Este é um ligante hidráulico que permitire ao betão alcançar um endurecimento mais rápido e forte. A partir desse momento a construção ganha um material que permitiria construir com uma maior qualidade e maior rapidez, deixando outros materiais em segundo plano [2].

A capacidade de adaptar as propriedades do betão consoante o tipo de intervenção pretendida foi algo que começou desde logo a ser estudado, seguindo os avanços tecnológicos que já existiam no início do século XX. A utilização da razão água cimento como um indicador para estimar a resistência do betão foi reconhecida por volta de 1918.

A invenção do cimento Portland por Louis Vicat em 1817, a do betão armado em 1848 por Lambot e a intervenção do arquiteto Auguste Perret em 1898, foram os pontos de partida para o uso de um material de construção que veio determinar um novo rumo à construção do século XX, tornando-se nos dias de hoje, no material mais utilizado na construção [1].

Ao longo dos anos o betão tem vindo a crescer exponencialmente em todas as obras a nível mundial. Mesmo em estruturas com base em outros materiais, nomeadamente o aço e a madeira, existe sempre peças construídas por betão, principalmente quando falamos da construção de fundações.

O facto de o betão ser um material muito utilizado na indústria da construção está relacionado, nomeadamente, com a facilidade de moldagem de elementos mais ou menos complexos, função de se comportar como um material plástico em estado fresco, com o baixo custo de materiais e processos utilizados e, ainda, com a pretensão de assegurar durabilidade aos elementos de betão armado, ou seja, garantir que durante o período de vida previsto não são necessários, ou são reduzidos, os custos de manutenção das estruturas [1].

Sem dúvida alguma que a propriedade mais importante que o betão nos proporciona é a sua elevada resistência à compressão, dessa mesma forma não se pode qualificar a sua resistência à tração, visto ser muito reduzida, é compensada pela introdução do aço, dando assim origem a um material compósito conhecido por betão armado. Mas para que essas propriedades sejam confirmadas é necessário que durante o endurecimento o betão não esteja sob influência de alguns fatores que podem condicionar negativamente a sua cura e conseqüentemente as características desejadas, nomeadamente a nível da compressão. Importa salientar que estas propriedades do betão endurecido não se encontram estáticas, visto que estas vão evoluindo ao longo dos vários anos. A título de exemplo, cerca de 50 a 60% da resistência final é atingida 7 dias após a sua aplicação, e que no final do vigésimo oitavo dia atinge por volta de 80 a 85% da sua resistência final (fig.4) [6].

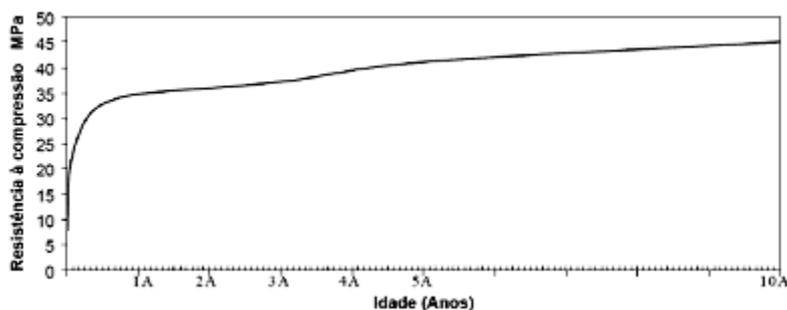


Figura 4 - Evolução da resistência à compressão com a idade [6]

Apesar da normal evolução do mundo o betão não foi um material que tenha sofrido nos últimos cinquenta anos uma elevada evolução quando comparamos com outros “ramos”, nomeadamente da informática e telecomunicações.

Podendo resumir a evolução do betão nestes últimos anos ao aparecimento de novos componentes (adjuvantes, adições, etc.) que melhoraram a qualidade final do betão [1].

Quando nos viramos para o custo do betão pode-se referir que o principal custo reside no cimento, logo o principal objetivo passa por otimizar a composição do betão, chegando a resistências desejáveis com a melhor quantidade de cimento possível, podendo mesmo substituir essa quantidade de cimento por uma percentagem variável de uma outra adição qualquer, como por exemplo pozolanas.

3.2. Constituintes de Betão

3.2.1. Cimento

O cimento é um material cerâmico que quando hidratado dá origem a uma reação exotérmica de cristalização, mantendo-se posteriormente estável mesmo quando colocado em ambientes fortemente preenchidos por água. O endurecimento da pasta dá-se ao longo do tempo, mas adquire cerca de 80/85% da resistência final aos 28 dias. Estas características fazem do cimento o principal aglutinante na produção do betão, envolvendo os outros constituintes como o agregado grosso e o agregado fino numa mistura muito resistente e coesa.

O cimento tem sofrido uma evolução durante todos estes anos, essa evolução prende-se sobretudo com a sua composição e finura. Prince e Tennis indicam que nos EUA o conteúdo de silicato de tricálcio (C_3S) de um cimento Portland tipo I aumentou de cerca de 30%, valor típico em 1950, para valores da ordem dos 45% a 50% em 1970 e 56% em 1998. Durante o mesmo período de tempo a finura do cimento sofreu um acréscimo de 100 para os 400 m^2/kg . Devido ao aumento do C_3S e à maior finura, o cimento Portland moderno hidrata mais rapidamente [7,8]. Desta forma chega-se a uma conclusão lógica e muito interessante, nos dias de hoje poder-se-á fabricar a mesma quantidade de betão mas com uma menor percentagem de cimento comparativamente com o

que se usava há quarenta anos atrás e sem comprometer a sua resistência, nomeadamente à compressão. Poderemos classificar esta notícia como muito boa visto que a indústria de produção de cimento é uma das grandes consumidoras de energia a nível mundial, e derivado a tudo isto o cimento tem um elevado custo ambiental, logo o facto de se poder produzir igual ou mesmo até melhor que antigamente e com uma percentagem menor de cimento é muito positivo.

Como podemos constatar anteriormente o cimento é sem dúvida o constituinte mais importante do betão. O mais utilizado é o Portland tipo I (CEM I). O cimento Portland foi registado por Apsdin que não revelou o processo para chegar ao fabrico desse cimento, deixando importantes dados por desvendar, nomeadamente a temperatura de cozedura e as proporções exatas de calcário e argila. Johnson em 1845 viria então a encontrar as quantidades necessárias para chegarmos a esse cimento Portland. O cimento Portland é um pó finamente moído e é formado por óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), que quando misturado e sujeito a temperaturas na ordem dos 1400 °C a 1600 °C, reagem entre si formando os compostos presentes no cimento. Este processo embora pareça ser muito simples é algo bastante complicado e envolve várias operações (entre 60 a 80) separadas ou contínuas, utilizando maquinaria pesada e consumindo grandes quantidades de combustível e energia elétrica. O material que nasce desse processo chama-se clínquer, sendo-lhe adicionada uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (CaSO₄) [9]. Devido a tudo isto se diz que o cimento é sem dúvida um material, pouco sustentável não só em termos económicos mas também ambientais.

Para além do cimento Portland tipo I (CEM I) existem outros. A NP EN 197-1 de 2001 apresenta cimentos que podem ser utilizados. Os cimentos que essa norma enumera são os CEM II, CEM III, CEM IV e CEM V, que incluem na sua constituição o clínquer mas também outros produtos ou melhor dizendo outros subprodutos, isto é, resíduos de outros processos industriais (Quadro 1).

Quadro 1 - Designação dos cimentos

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 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

Sendo o cimento o material mais importante no fabrico do betão é necessário que se faça uma escolha criteriosa da quantidade e qualidade do cimento presente na mistura. Por isso antes de escolhermos qual o cimento a utilizar deveremos perceber para que fins se destina o betão que será fabricado, com o intuito de entender qual o tipo de cimento mais aconselhável a utilizar na mistura.

A NP EN 197-1 de 2001 [10] enumera os requisitos mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade. Em termos mecânicos estão definidas três classes de resistência que servem de referência: classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5. Essas classes estão diretamente relacionadas com a resistência à compressão aos 28 dias para cada cimento. A cada classe pode-se atribuir a designação “N” (normal) ou “R” (rápido) consoante o cimento alcance resistências normais ou mais elevadas logo nos primeiros dias de cura (Quadro 2).

Em termos muito generalistas poder-se-á dizer que os cimentos das classes 32,5 e 42,5 são utilizados em obras mais correntes. Já no caso da classe 52,5 são usualmente utilizados em obras onde se exige uma resistência mecânica mais elevada, podendo ser utilizados para o fabrico de betões de elevado desempenho.

Quadro 2 - Requisitos mecânicos expressos como valores característicos especificados

Classe de resistência	Resistência à compressão MPa			
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
	2 dias	7 dias	28 dias	
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-		
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-		
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-		

Ainda falando sobre a resistência mecânica do cimento, o ACI 225R-99 [11] apresenta um estudo, onde se analisaram as resistências à compressão de vários betões constituídos por diferentes tipos de cimento e chegou-se à conclusão que após aproximadamente 90 dias de idade as resistências à compressão são semelhantes entre todos os betões. Depois desses 90 dias as resistências continuam a crescer mas, por os betões que no seu início de vida apresentavam resistências mais baixas passam a apresentar as resistências mais elevadas, e os que no início de vida apresentavam resistências mais elevadas após os 90 dias apresentam resistências mais baixas relativamente aos outros (fig. 5).

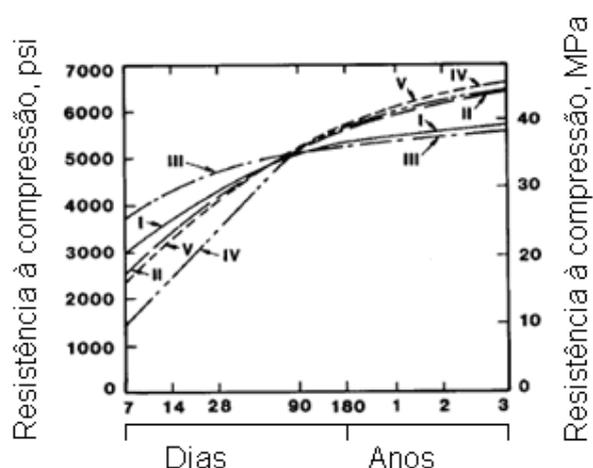


Figura 5 - Evolução da resistência à compressão dos cinco betões experimentados

A grande conclusão que este estudo chegou foi que os constituintes do cimento que mais contribuem para o aumento da resistência mecânica do betão são o silicato tricálcico e o silicato bicálcico. Sendo que cada um deles contribui para o aumento das resistências a idades diferentes do betão. O silicato tricálcico contribui para um aumento da resistência em idades muito jovens e para a resistência final, enquanto o silicato bicálcico contribui para o aumento da resistência em idades posteriores [9].

Relativamente aos requisitos físicos a NP EN 196-3 de 2006 estabelece o tempo de início de presa e expansibilidade. Em termos de tempo de início de presa são designados os valores característicos não inferiores a 75 min, 60 min e 45 min, para as classes 32,5, 42,5 e 52,5 respetivamente. Relativamente à expansibilidade tem como requisito um valor característico não superior a 10 mm, para todas as classes de resistência.

A variação da quantidade de cimento presente numa mistura de betão afeta a trabalhabilidade e plasticidade da mesma. Por isso quanto menor a quantidade de cimento (menos de 225 kg/m³) mais duro e menos maleável será o betão, já se tiver demasiada quantidade de cimento (aproximadamente igual a 400 kg/m³) o betão torna-se mais coesivo, fluido e trabalhável [11]. Isto deve-se ao facto de o cimento ser o composto mais fino que a mistura de betão possui, logo as partículas de cimento presentes na mistura permitem um melhor “arranjo” entre as partículas, diminuindo assim os espaços vazios ocupados muitas vezes por ar e água.

Para se avaliar a conformidade dos cimentos em Portugal recorre-se a duas normas harmonizadas, a NP EN 197-1 [10] que dá ênfase à composição, especificação e critérios de conformidade e a NP EN 196 [12] que está mais inclinada para os métodos de ensaio de cimento.

Um fator também muito importante é o seu armazenamento em estaleiro, visto que o armazenamento em obra não deve ser muito prolongado no tempo, e quanto mais fino for o cimento maior será essa preocupação, isto é, ainda menos tempo poderá estar armazenado, sob pena de comprometer as suas características. Existem alguns cuidados que se devem seguir quanto à escolha do local para o seu armazenamento, esse local deve conter uma humidade

reduzida, e deve ser bem ventilado por forma a manter a humidade reduzida. O cimento chega às obras em sacos de 40 kg ou a granel, e como indicação geral, este não deve permanecer armazenado, ainda que em condições ideais, por um período superior a três meses, sob pena de ver as suas propriedades comprometidas [13].

3.2.2. Agregados

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.

Além dessa designação podem ser de origem natural, artificial ou reciclados. Os agregados naturais derivam diretamente das pedreiras sendo apenas sujeitos a processamentos mecânicos, mantendo a natureza não rugosa das suas superfícies. É o caso dos godos, areias provenientes do mar, do rio, de dunas, cabedelos, de depósitos sedimentares ou areeiros. Os agregados artificiais derivam de processos industriais que lhes conferem uma modificação térmica ou outras. Neste tipo de agregados temos a brita, areias de trituração ou o pó de pedreiras que são o resultado da fragmentação de rochas com o auxílio de maquinaria existente nas pedreiras onde muitas vezes são extraídos esse tipo de agregados. Os agregados reciclados derivam de materiais inorgânicos muitas vezes oriundos dos escombros de outras construções ou utilizados anteriormente noutras construções.

Os agregados podem ainda ser classificados em normais, leves ou pesados consoante a sua massa volúmica. Os leves têm uma massa volúmica que compreende valores até 2000 kg/m^3 , os normais podem possuir uma massa volúmica compreendida entre 2000 a 3000 kg/m^3 e os agregados pesados podem possuir uma massa volúmica superior a 3000 kg/m^3 .

Uma outra consideração especial que se deverá ter são as impurezas que, nomeadamente os agregados naturais possam conter, e que normalmente condicionam a sua utilização em argamassas ou betões. A NP EN 12620 de

2004 [14] fixa limites aceitáveis dessas impurezas, tais como teor de finos ou teor de sulfatos solúveis. Aliás esta norma harmonizada estabelece várias características essenciais para os agregados utilizados em betões. Entre outras características fixa a resistência à fragmentação/esmagamento, a resistência ao polimento/desgaste, a durabilidade face ao gelo/degelo, etc. A mesma norma também remete para normas de “ensaio” tendo como objetivo comprovar essas mesmas características, um exemplo disso mesmo é a NP EN 1097 que estabelece ensaios com o intuito de aprovar as propriedades mecânicas e físicas dos agregados.

A escolha dos agregados empregues no betão deve ser feita de forma criteriosa tendo em conta as várias características já mencionadas. Os agregados geralmente ocupam cerca de 70% a 80% do volume total do betão e por isso mesmo deve-se ter esse cuidado especial, visto que as suas características podem afetar diretamente a trabalhabilidade, durabilidade, resistência, propriedades térmicas e densidade do betão.

Um dado importantíssimo que deve ser especificado é a máxima dimensão do agregado mais grosso (D_{max}). Este limite deve ser encontrado tendo em conta a largura mínima da secção de betão, com o recobrimento mínimo e também com o menor espaçamento entre armaduras, por forma a não provocar segregação do betão durante a sua colocação.

Logo o D_{max} tem que obedecer a:

- $D_{max} < \text{largura mínima da secção}$
- $D_{max} < 1,2 \text{ vezes o recobrimento}$
- $D_{max} < 1,2 \text{ vezes o espaçamento entre armaduras}$

Existem várias razões para graduar os agregados quanto ao seu diâmetro máximo e mínimo. Agregados que tenham uma boa curva granulométrica e não tenham deficiência ou excesso de nenhum tamanho das partículas, geralmente, produzem misturas com poucos vazios entre as partículas. Sendo o cimento o material com um custo mais elevado que os agregados e dado que a quantidade de cimento necessária aumenta com o aumento do número de vazios, é desejável que este seja o mais baixo possível [15].

Além da dimensão máxima do agregado deve-se ter em consideração a sua forma ou natureza da superfície. Os agregados naturais, nomeadamente godos, que possuem uma superfície lisa e arredondada permitem uma amassadura mais fácil comparativamente com os agregados artificiais (exemplo: britas), visto que a sua forma arredondada provoca menores atritos entre as partículas que constituem o betão, provocando uma menor necessidade de água durante a amassadura. Além da forma, também apresentam uma superfície específica menor, quando comparados com os agregados artificiais, logo voltam a ter uma menor necessidade de água. Há quem defenda que quando se utiliza agregados artificiais necessitar-se-á de cerca de mais 20% de água relativamente a amassaduras usando agregados naturais. Mas não existem só vantagens, visto que o facto de os agregados naturais apresentarem uma superfície mais lisa e arredondada não confere ao betão a coesão mais aconselhável.

Os agregados artificiais, nomeadamente as britas conferem ao betão uma maior coesão, por proporcionar uma maior aderência entre a pasta de cimento e o agregado (fig.6). Essa maior aderência é alcançada muito devido à superfície rugosa que este tipo de agregados apresenta, visto que apresentam uma maior área de contacto com a pasta e além disso apresentam protuberâncias e reentrâncias que estabelecem uma ligação com a pasta do estilo “macho-fêmea”. Quem fica a ganhar é o betão por conseguir obter uma maior resistência mecânica. Essa resistência é perceptível quando, em laboratório, se testa provetes e estes partem não só pela interface pasta/agregado mas também pelo próprio agregado. Isto é, naturalmente que a primeira parte a ceder num material composto é o componente mais frágil, que normalmente se situa nas interfaces entre o agregado e a pasta. Isso deve-se muito por culpa de ser o local no betão onde se situam mais poros e conseqüentemente maior concentração de água que leva a formar cristais de hidróxido de cálcio que têm baixa resistência mecânica. Logo é com toda a naturalidade que seja esse local a desenvolver as primeiras fissuras, mas com agregados britados poder-se-á aumentar a resistência na interface, reduzindo a quantidade de poros, conseguindo um aumento da resistência. Por esses motivos é que o agregado deixa de ser o elo mais forte e passa a ter uma

resistência semelhante à interface, logo quando rompemos um provete consegue-se não só quebrar a ligação entre a pasta e o agregado mas também o próprio agregado.



Figura 6 - Carote que demonstra a pasta de cimento envolvendo os agregados

Importante também será o facto de os agregados virem limpos, evitando o acumular de pó ou de argila na superfície dos mesmos. Estes intervenientes externos proporcionariam a necessidade de gastar mais água e também poderão comprometer a ligação da pasta de cimento ao próprio agregado.

A melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento do betão produzido com esse agregado, e em última análise ou caso de dúvida, os agregados devem ser julgados a partir das propriedades do betão que com eles se confeciona e não exclusivamente a partir dos resultados de diversos ensaios que dão indicações sobre a qualidade do agregado, permitindo apenas prever o seu comportamento no betão [6].

3.2.3. Água da amassadura

A água utilizada na amassadura do betão tem duas principais funções. A primeira consiste em iniciar uma reação com o cimento, por forma a hidratá-lo. Assim sendo, este ganha presa e endurece envolvendo os agregados. A segunda função, mas não menos importante, consiste em assegurar a trabalhabilidade do betão por forma a garantir que a mistura seja amassada facilmente e colocada em obra sem problemas de segregação.

A água poderá ser apta ou não apta muito dependendo da sua origem. A NP EN 1008 de 2003 [16] define e classifica os tipos de água e a sua aptidão para ser empregues na realização do betão. As águas têm várias origens, podem ser potáveis (ou água da rede), podem ser de origem natural, subterrâneas ou residuais industriais, ou ainda podem ser oriundas do mar. A água que deriva da rede normalmente satisfaz os requisitos da norma. As águas de origem natural, subterrânea ou residuais industriais podem também ser empregues no fabrico de betão mas devem ser ensaiadas antes de serem utilizadas. Já as águas que advêm do mar podem ser consideradas aptas para o fabrico de betão simples mas geralmente são consideradas não aptas para o fabrico de betão armado ou pré-esforçado. Isto porque para betões com armaduras o teor de cloretos presente é um fator muito importante e que não pode passar despercebido.

A quantidade de água poderá condicionar várias características importantes no betão final. Isto é, a quantidade de água pode afetar de forma direta, a forma, textura e dimensão dos agregados, abaixamento, razão água/cimento, quantidade de ar, tipo e quantidade de cimento, adjuvantes e condições ambientais.

Na realidade, a água de amassadura tem influência nas propriedades do betão através das substâncias dissolvidas, onde a ação destas pode dividir-se em três categorias:

- lões que alteram as reações de hidratação do cimento;
- lões que podem levar a expansões a longo prazo, pondo em risco a estabilidade do sólido;
- lões capazes de promover a corrosão das armaduras; e através de substâncias em suspensão, normalmente os sais e a argila [17].

A quantidade e tipo de água pode condicionar o tempo de início e fim de presa. O tempo de início de presa do betão deverá ser superior a uma hora, para que não ganhe presa ainda antes de ser colocado em obra, já o tempo de fim de presa não deverá exceder as 12 horas.

3.2.4. Adjuvantes

Os adjuvantes são materiais que se adicionam, em pequenas quantidades comparativamente com a massa global do cimento, antes e durante a amassadura do betão com o intuito de alterar as propriedades do betão, tanto em fresco como endurecido.

Os adjuvantes são classificados consoante a sua função. E a sua utilização deve ser efetuada com cuidado, isto é, nunca se deve utilizar adjuvantes sem antes conhecer os efeitos que estes podem trazer á mistura. Relativamente às quantidades a utilizar nunca devem exceder 5% da massa global do cimento, caso contrário poderá comprometer as qualidades finais do betão. Após a sua aplicação as propriedades do betão em fresco ou endurecido serão alteradas.

Cada vez mais se utilizam adjuvantes na mistura do betão e isso leva a que se aumente a variedade destes no mercado. Por isso é natural encontrarmos este tipo de produto mais desenvolvido, com o objetivo de satisfazer as necessidades mais exigentes do nosso dia-a-dia. Por essa razão torna-se difícil classificar o adjuvante “A” ou “B”, sendo que o mais importante é a sua função. Logo o mais importante não será saber como se designa o adjuvante mas sim as modificações que este pode trazer á mistura, entre as várias modificações temos como principais as seguintes [19]:

- Melhorar 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.

Contudo de todos os adjuvantes presentes na atualidade os que merecem mais atenção são sem dúvida os que são destinados a melhorar a trabalhabilidade. Isto porque, antigamente só se poderia melhorar a trabalhabilidade do betão caso se adicionasse mais água á mistura, pois bem, como se sabe a mistura

deverá conter a menor quantidade de água possível, sob pena de o betão quando endurecido ficar com as suas propriedades diminuídas, nomeadamente a sua resistência à compressão. Logo, os adjuvantes têm um papel importantíssimo, visto poderem melhorar a trabalhabilidade e ao mesmo tempo manter ou até diminuir a razão água/cimento. Estes adjuvantes são designados por redutores de água, e neste capítulo temos dois tipos de redutores de água: os plastificantes e os superplastificantes [20].

Os plastificantes permitem, regra geral, reduzir a quantidade de água na ordem de 5% a 15%, mantendo a trabalhabilidade desejada, já os superplastificantes vão mais além permitindo reduções de água na ordem dos 25% a 35%. No fundo estes produtos favorecem a dispersão e a desfloculação das partículas mais finas usadas no fabrico do betão, nomeadamente as do cimento e das adições. Assim sendo quando estes produtos redutores de água são introduzidos na mistura favorecem o afastamento das partículas de cimento. Essas partículas de cimento após a adição destes adjuvantes tendem a ficar ionizadas com cargas do mesmo sinal, passando a repelirem-se, deixando de ser dependentes da água para existir mobilidade entre as partículas. Logo, a distância entre as partículas pode reduzir-se dispensando a maior quantidade de água [20].

Em suma estes produtos redutores de água podem ser responsáveis por vários efeitos nas fases em que o betão se encontra fresco e depois quando está endurecido. Na fase em que o betão está fresco poderemos assistir:

- Aumento da massa volúmica, por consequência da redução da quantidade de água;
- Acréscimo significativo da fluidez do betão;
- Aumento da coesão da mistura, também derivado da diminuição da quantidade de água;
- Aumento significativo da capacidade de bombagem, devido á melhoria da trabalhabilidade e da coesão;
- Diminuição da segregação.

Depois de endurecido os plastificantes e superplastificantes utilizados no fabrico do betão também são responsáveis por:

- Aumento considerável das resistências mecânicas devido á diminuição da razão água/cimento;
- Grande redução da permeabilidade do betão á custa também da redução da razão água/cimento;
- A retração de secagem é também reduzida, também muito devido á redução da razão água/cimento.

Nota: Digamos que os plastificantes ou superplastificantes não são diretamente os responsáveis por todos estes acontecimentos mas como conseguem reduzir a quantidade de água estão ligados a estes acontecimentos indiretamente.

Estes produtos vieram sem dúvida revolucionar a tecnologia do fabrico de betão, permitindo nos dias de hoje fabricar betões de elevado desempenho e de ultra elevado desempenho. Para se ter a noção do que se acabou de referir, atualmente poder-se-á fabricar betões com uma razão água/cimento na ordem dos 0.2 e atingindo resistências da ordem de 150MPa.

A NP EN 206-1 [18] indica que a quantidade total de adjuvantes, se utilizados, não deve exceder a dosagem máxima recomendada pelo produtor nem ultrapassar 50g de adjuvantes por kg de cimento e não deve ser inferior a 2g por kg a menos que estes sejam dispersos numa parte da água de amassadura.

Já a especificação do LNEC E-374 indica que há diversas características a que os adjuvantes devem obedecer, nomeadamente a identificação (homogeneidade, cor, teor de sólido, entre outros), a compatibilidade com os cimentos e o comportamento no betão [19].

Os requisitos e critérios de conformidade dos adjuvantes para a utilização na formulação de betões encontram-se regulamentados pela norma NP EN 934-2 [20].

3.2.5. Adições

As adições são materiais finamente divididos usados no fabrico de betões e têm como objetivo melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais. São consideradas em dois tipos diferentes de adições inorgânicas:

- Adições quase inertes (Tipo I);
- Adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (Tipo II).

Segundo a NP EN 12620 de 2004 as adições do tipo I são agregados cuja maior parte passa no peneiro de 0.063mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades [14]. Estas adições levam a modificar a curva granulométrica na zona dos muito finos. Estas partículas muito pequenas ocupam os micro-espacos entre as partículas de maior dimensão, diminuindo assim a área de espacos vazios. Por consequência a mistura torna-se mais compacta.

Nas adições do tipo II são usados produtos inorgânicos que apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reatividade para com o hidróxido de cálcio mas insolúveis e inertes na água [1].

Como exemplo deste tipo de adições temos as cinzas volantes, sílica de fumo, escória granulada de alto-forno moída, metacaulino, cinzas de casca de arroz e pozolanas naturais. Com estas adições também poderemos reduzir a quantidade de cimento presente na mistura, melhorando a mistura em diversos fatores. Entre eles, o custo global do betão, a redução do consumo de energia, diminuição de emissões de CO₂, tudo isto inerente ao facto de reduzirmos a quantidade de cimento na mistura.

Os critérios de conformidade e aplicação destas adições estão definidos na NP EN 206-1 indicando que a sua aptidão geral está determinada para:

- Fileres conformes a NP EN 12620 de 2004;

- Pigmentos conformes com a EN 12878 de 2005;
- Cinzas volantes conformes com a NP EN 450-1 de 2006;
- Sílica de fumo conforme com a NP EN 13263-1 de 2007;
- Pozolanas conformes com a NP 4220 de 1993

Relativamente às cinzas volantes a NP EN 450-1 de 2006 define que é um pó fino constituído principalmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado (principalmente para a produção de eletricidade), com ou sem materiais de co-combustão, que tem propriedades pozolânicas e constituído essencialmente por SiO₂ e Al₂O₃, sendo no mínimo de 25 % em massa o teor de SiO₂ reativo.

As cinzas volantes são obtidas por precipitação eletrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima das caldeiras alimentadas a carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão. As cinzas volantes podem ser processadas, por exemplo por seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução de carbono, ou por combinação destes processos, em instalações adequadas. As cinzas volantes assim processadas podem ser cinzas volantes de origens diferentes. Se uma ou mais das cinzas volantes são obtidas por co-combustão, então as cinzas volantes processadas devem ser consideradas como cinzas volantes de co-combustão [1].

As cinzas volantes podem ser divididas consoante o seu teor em óxido de cálcio, se apresentar um teor de óxido de cálcio inferior a 10% pertencem à classe F e têm como principais características um baixo calor de hidratação e um maior controlo da reação alcalís-silica. As cinzas volantes que apresentam um teor em óxido de cálcio superior a 10% pertencem a classe C e estas já são utilizadas com o intuito de substituir o cimento no fabrico de betão. Isto acontece devido às propriedades cimentícias, podendo substituir uma elevada percentagem de cimento sem contudo perder a resistência à compressão.

As cinzas, tal como foi mencionado em cima, são um material extremamente fino apresentando uma superfície específica aproximadamente igual a 400 m²/kg. As partículas são tipicamente esféricas e apresentam um diâmetro que

se encontra num intervalo entre 1.0 a 150 μm , sendo que o diâmetro médio é de 10 μm .(fig.7)

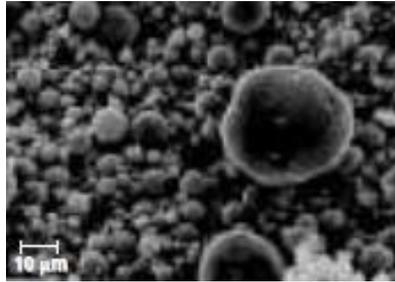


Figura 7 - Visualização ao microscópio de uma amostra de cinzas volantes [1]

Em termos da sua composição química depende muitas vezes do tipo e da quantidade de material mineral existente no carvão que foi queimado. Sendo que o grosso da sua composição química assenta sobretudo em cristais de dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (FeO_3) e óxido de cálcio (CaO).

3.3. Produção do betão

3.3.1. Generalidades

Para chegar ao encontro das maiores exigências do mercado a nível da qualidade é necessário que exista um maior rigor no momento da produção do betão. Não obstante o facto de ter um maior acompanhamento de todos os processos de produção de betão também não se pode descurar o emprego de matérias-primas com uma qualidade superior.

A produção do betão é cada vez mais controlada, para garantir esse controlo o betão deve ser especificado e produzido seguindo normas. Entre as diversas normas em Portugal segue-se muito a norma NP EN 206-1 [18] e a NP EN 13670-1 [21], estas incluem as principais regras atuais para a produção de betão.

Para que sejam adotadas a especificidade necessária à produção de betão, com a qualidade pretendida, tanto nas obras como em centrais de betão ou outros locais análogos, é recomendável a realização de um manual de qualidade. Nesse manual deverá constar todos os procedimentos a ter em consideração para desse modo fabricar um betão com o nível de qualidade pretendido. A norma NP EN 206-1 [18] identifica algumas das possíveis recomendações a adotar.

Existem alguns conselhos a adotar no momento do fabrico do betão que devem ser considerados, para desse modo obter um betão com características satisfatórias. Então se o objetivo passa por produzir um betão com grande durabilidade, que proteja as armaduras contra a corrosão do meio envolvente durante o tempo de vida útil previsto é recomendável ter em especial atenção os seguintes fatores:

- A escolha de constituintes adequados, que não contenham elementos prejudiciais que afetem a durabilidade do betão e protejam as armaduras;
- A escolha de uma composição tal que o betão satisfaça todos os critérios estabelecidos para o betão fresco e endurecido;

- A amassadura, colocação e compactação do betão deverão ser feitas de modo a que os constituintes do betão estejam uniformemente distribuídos em massa, sem segregação devendo adquirir uma estrutura fechada;
- A cura do betão deve ser realizada de modo a que a zona superficial de recobrimento das armaduras adquira propriedades que se esperam da composição [22].

3.3.2. Fabrico

Um dos aspetos a ter em especial atenção é sem dúvida a receção e armazenamento dos materiais que vão constituir o betão. Quando o fabrico de betão é realizado em centrais industriais esse aspeto é tomado em especial atenção, e normalmente os produtos são rececionados e armazenados obedecendo a cuidados particulares, nomeadamente o cimento será, obviamente necessário armazená-lo em local com uma humidade reduzida, para que este não entre em reação com a água do meio envolvente. Em obra nem sempre são tomados os cuidados necessários, porque o espaço de ação nem sempre oferece as melhores condições mesmo por desconhecimento de regras fundamentais por parte do operador. Entre essas regras temos como exemplo, prevenção da combinação dos materiais constituintes do betão com elementos nocivos, tal como terra ou folhas.

Aspetos correntes no fabrico de betões em obra, como a utilização de agregados por lavar, o seu armazenamento ao ar livre e expostos às condições atmosféricas ambientais, a utilização de equipamento de medições em volume dos constituintes, a adição de água em função do “aspeto” do betão, a incorporação de adições para reduzir a quantidade de cimento e outros, devem ser procedimentos proibidos quando se deseja obter um produto de qualidade superior, tanto no que concerne às suas propriedades mecânicas como quanto a consistência e durabilidade [23].

Os agregados que possuam água superficial devem permanecer armazenados por um período sempre superior a 12 horas, para dessa forma favorecer uma

uniformização do teor de humidade. Antes mesmo de os utilizar no fabrico de betão é de extrema importância determinar o seu teor de humidade para que se possa proceder às devidas correções de água que irá conter o betão, e assim evitar o excesso de água na mistura.

A mistura dos materiais constituintes do betão obedece a uma ordem concreta. Em primeira instância misturam-se os agregados grossos (brita) com os agregados finos (areia), ainda a seco, em seguida junta-se o cimento e continua-se a misturar, posteriormente acrescenta-se as adições, neste estudo em específico são as cinzas volantes. Então como se pode comprovar os materiais “entram” na mistura consoante a sua granulometria, em primeiro acrescenta-se os que apresentam uma maior granulometria e posteriormente vão se acrescentando os que apresentam uma menor granulometria. Antes de acrescentar a água deve-se continuar a misturar para desse modo obter uma mistura bastante homogénea, no final acrescenta-se a água, para que esta reaja com o cimento, criando uma pasta que envolva a superfície de todas as partículas contidas no betão.

A mistura pode ser realizada tanto de uma forma mecânica como manual. No caso de ser realizada manualmente essa operação é exequível com o auxílio de uma pá e a superfície deverá ser plana e impermeável. O processo realiza-se um pouco á semelhança do que foi descrito anteriormente até ao momento em que se adiciona a água. Nesse preciso momento a água deve ser colocada sob uma pequena cratera previamente realizada, na mistura dos materiais que compõem o betão, e desse modo não se escape para o exterior. Seguidamente amassa-se a mistura até se alcançar a melhor homogeneidade entre os componentes. Esse processo só se emprega para o fabrico de uma pequena quantidade de betão, visto que para maiores quantidades não se alcança os rendimentos e o controlo de qualidade pretendidos. A amassadura mecânica é realizada com o auxílio de betoneiras. As betoneiras vão misturando os materiais constituintes de uma forma mais eficiente, podendo obter uma mistura mais homogénea do que aquela alcançada através das amassaduras manuais.

O recurso a centrais industriais para o fabrico de betão é hoje o processo mais em voga, não só por ser prático mas também por permitir betões de muito melhor qualidade que nos casos anteriores referidos. Este processo de fabrico foi introduzido pela primeira vez na Alemanha em Hamburgo em 1903, tem tido um incremento e uma aceitação notáveis, dadas as vantagens que proporciona: maior qualidade e regularidade do betão, maior produtividade de fabrico, precisão devido à utilização de características constantes e utilização de processos de medição precisos dos constituintes [24].

3.3.3. Transporte

Existem diversas formas de transportar o betão, sendo que a escolha depende da quantidade de betão a transportar, da distância e claro das considerações económicas. Quando o betão é fabricado no estaleiro de obra este é transportado com o auxílio de baldes, contentores, caleiras, carrinhos de mão, telas transportadoras ou por meio de tubagens.

Quando se fala em transporte entre centrais industriais e o estaleiro de obra recorre-se normalmente a autobetoneiras. Neste caso o transporte deve ser devidamente programado para que não se corra o risco de o betão entrar em presa mesmo antes de ser colocado em obra, danificando a autobetoneira de forma irreversível e logrando amplos prejuízos. Logo é de extrema importante que fatores como distância central industrial/estaleiro de obra e meio envolvente ao estaleiro de obra devam ser devidamente considerados.

Além do mais, 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 [25].

3.3.4. Colocação

A colocação deve ser realizada no menor espaço de tempo possível após a execução da amassadura para dessa forma evitar a perda da trabalhabilidade, esta recomendação é descrita na norma NP EN 206-1 [18]. Imediatamente antes da colocação é necessário humidificar as cofragens, para que estas não absorvam a água inicialmente prevista para a hidratação do cimento presente na composição do betão.

As operações de espalhamento e compactação são 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.

Durante a colocação, o objetivo principal é depositar o betão o mais próximo possível da posição final, de modo a evitar segregação e garantir compactação adequada. De modo a atingir esse objetivo, as seguintes regras devem ser cumpridas [22]:

- A deslocação do betão, quer por imersão ou acção de uma agulha vibradora, deve ser evitada;
- O betão deve ser colocado em camadas uniformes e não em montes ou camadas inclinadas;
- A espessura de uma camada deve ser compatível com o método de vibração, de modo a que o ar preso no fundo de cada camada possa ser retirado;
- A velocidade de compactação e colocação deverá ser a mesma;
- A camada deve ser compactada convenientemente antes da colocação da camada seguinte, sendo a colocação efetuada quando a camada anterior ainda está plástica;
- Evitar a deslocação da cofragem e da amassadura devido ao processo de colocação do betão;
- O betão deve ser colocado num plano vertical para evitar segregação durante a colocação.

3.3.5. Compactação

A operação de compactação tem como principal objetivo a eliminação do ar contido no betão, para deste modo aumentar a coesão entre as partículas do betão e ao mesmo tempo aumentar a durabilidade do betão. Este processo realiza-se normalmente com auxílio de um instrumento mecânico que promove a vibração no interior do betão.

A obtenção da melhor compactação possível também depende muito do operador, visto que a experiência deste assume um papel de assinalável importância. Sabendo previamente quais os locais específicos que deve intensificar a vibração e assim diminuir substancialmente a quantidade de ar contido no betão.

É importante saber que, à volta das armaduras do betão armado ou pré-esforçado, das bainhas e das amarrações e nos cantos das cofragens são os locais onde se encontra a maior parte do ar contido no betão, logo nesses pontos específicos, o betão, deve ser cuidadosamente compactado de modo a que se crie uma massa compacta, livre de vazios, tendo em especial atenção a zona de recobrimento das armaduras.

3.3.6. Cura

O principal objetivo da cura é manter o betão saturado para que os espaços que inicialmente estão preenchidos pela água, da pasta do cimento fresca, sejam ocupados pelos produtos da hidratação do cimento.

A norma NP EN 206-1 [18] estabelece diferentes valores mínimos de tempo de cura, dependendo da velocidade de desenvolvimento da resistência do betão bem como das condições ambientais de exposição. É muito importante que o betão durante a cura, ou também conhecida como a fase do endurecimento, seja devidamente protegido durante o tempo conveniente, para dessa forma apresentar as propriedades esperadas.

Durante esta fase e principalmente nas primeiras horas de vida, é indispensável que haja uma prevenção contra a secagem precoce do betão,

principalmente quando este está exposto à radiação solar, visto que poderá originar a fissuração do betão devido à retração plástica.

Para além desse cuidado é necessário ter em especial consideração a escolha do processo de endurecimento mais adequado. Esse processo deverá conter um plano que indique a evolução esperada da resistência do betão, para desse modo identificar qual o momento mais adequado para a realização da descofragem sem comprometer as características previstas do betão.

Relativamente aos procedimentos de cura, os principais métodos disponíveis são:

- A manutenção da cofragem no lugar;
- A proteção do betão com filmes plásticos;
- A proteção do betão com coberturas húmidas;
- Aspergir sobre o betão água ou aplicar compostos de cura que formam membranas protetoras [26].

O betão só poderá ser regado após a presa do mesmo, para não alterar a composição anteriormente estudada.

3.4. Classificação do Betão

O betão é classificado consoante o seu comportamento especificado ou composição prescrita. Para ser classificado consoante o seu comportamento especificado é necessário ter como referência os requisitos que estão definidos na NP EN 206-1.

3.4.1. Classes de exposição relacionadas com ações ambientais

Segundo a NP EN 206-1 o betão pode estar sujeito a mais que uma ação ambiental, pelo que as condições ambientais às quais está sujeito podem ser expressas resultando numa combinação de classes de exposição. Isto porque, para uma dada estrutura, diferentes superfícies do betão podem estar sujeitas a ações ambientais distintas [18].

A NP EN 206-1 divide as classes de exposição ambiental tal como se mostra nos quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Classes de exposição

Classe	Descrição do ambiente	Exemplo informativo de condições em que pode ocorrer as classes de exposição
Sem risco de corrosão ou ataque		
X0	Para betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições exceto em situações gelo/degelo, abrasão ou ataque químico; Para betão com armadura ou elementos metálicos embebidos: muito seco	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar muito baixa

Continuação do quadro 3 – Classes de exposição

Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar muito baixa; Betão permanentemente submerso em água;
XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitas a contato prolongado com água; Um grande número de fundações;
XC3	Humidade moderada	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar moderada ou elevada; Betão exterior protegido da chuva;
XC4	Alternadamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas a contato com água, não incluídas na classe XC2

Corrosão induzida por cloretos		
XD1	Humidade moderada	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Elementos de betão expostos a águas industriais contendo cloretos;
XD3	Alternadamente húmido e seco	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento;

Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contato direto com a água do mar	Estruturas próximas da costa ou na costa
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas

Continuação do quadro 3 – Classes de exposição

Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes		
XF1	Moderado número de ciclos gelo/degelo, sem produtos descongelantes	Betão em superfícies verticais expostas à chuva e ao gelo. Betão em superfícies não verticais mas expostas à chuva ou gelo.
XF2	Moderado número de ciclos gelo/degelo, com produtos descongelantes	Betão, tal como nas pontes, classificável como XF, mas exposto aos sais descongelantes direta ou indiretamente.

Ataque químico		
XA1	Ligeiramente agressivo, de acordo com o Quadro 4	
XA2	Moderadamente agressivo, de acordo com o Quadro 4	
XA3	Fortemente agressivo, de acordo com o Quadro 4	

Quadro 4 – Valores limites das classes de exposição para o ataque químico provenientes de solos naturais e de águas neles contidas

Caraterística química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
------------------------------	---------------------------------------	------------	------------	------------

Águas				
SO ₄ ²⁻ 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 ₂ agressivo mg/l	prEN 13577:1999	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 até à saturação
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 e ≤ 1000	> 1000 e ≤ 3000	> 3000 até à saturação

Solos				
SO ₄ ²⁻ total mg/kg	EN 196-2	≥ 2000 e ≤ 3000	> 3000 e ≤ 12000	> 12000 e ≤ 24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

De modo a clarificar a aplicação das classes de exposição ambiental da norma NP EN 206-1 [18], o LNEC elaborou a especificação E-464 [37], na qual se

estabelecem valores mínimos da dosagem de ligante e máximos da razão a/c que, uma vez cumpridos, permitem supor que o tempo de vida de um betão será da ordem dos 50 anos; entendendo-se por tempo de vida aquele durante o qual os betões simples ou com armaduras, mantêm as propriedades especificadas sem necessidade de reparações [22].

Muito resumidamente, esta especificação do LNEC divide em dois grupos de mecanismos de deterioração do betão: os que provocam a corrosão das armaduras e rompem o betão de recobrimento; e os que provocam a deterioração do próprio betão. No primeiro grupo temos a carbonatação e a ação dos cloretos da água do mar ou de alguns sais descongelantes. Definindo-se quatro classes de exposição à carbonatação (XC1, XC2, XC3, XC4) e três classes de exposição aos cloretos (XS1/XD1, XS2/XD2, XS3/XD3) consoante o ambiente onde esta inserida a estrutura de betão. No segundo grupo temos a ação dos ciclos gelo/degelo, dos sulfatos e de outros ambientes quimicamente agressivos. Definindo-se duas classes de exposição ao ciclo gelo/degelo (XF1, XF2), e três classes de exposição a ambientes quimicamente agressivos (XA1, XA2, XA3). No final obtemos quadros resumo que indicam segundo as respetivas classes de exposição aos diferentes agentes agressores a mínima dosagem de ligante, a máxima razão A/C, a classe de resistência mínima do betão e o recobrimento mínimo (Quadro 5 a 8).

Quadro 5 – 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 (Referência); CEM II/A ⁽¹⁾				CEM II/B ⁽¹⁾ ; CEM III/A ⁽²⁾ ; CEM IV ⁽²⁾ ; CEM V/A ⁽²⁾			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Recobrimento mínimo (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima razão água/cimento	0.65	0.65	0.60	0.60	0.65	0.65	0.55	0.55
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	240	240	280	280	260	260	300	300
Mínima classe de resistência	C 25/30 LC25/28	C 25/30 LC25/28	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33	C 25/30 LC25/28	C 25/30 LC25/28	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33

⁽¹⁾Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T II/B-W, respetivamente.
⁽²⁾Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer portland, em massa.

Quadro 6 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para 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 ⁽¹⁾ ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A ⁽¹⁾		
	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Recobrimento mínimo (mm)	45	50	55	45	50	55
Máxima razão água/cimento	0.55	0.55	0.45	0.45	0.45	0.40
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	320	320	340	360	360	380
Mínima classe de resistência	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33	C 35/45 LC35/38	C 40/50 LC40/44	C 40/50 LC40/44	C 50/60 LC50/55

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

Quadro 7 - 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 ⁽¹⁾		CEM II/B ⁽¹⁾ ; CEM III/A ⁽²⁾ ; CEM IV ⁽²⁾ ; CEM V/A ⁽²⁾	
	XF1	XF2	XF1	XF2
Máxima razão água/cimento	0.60	0.55	0.55	0.50
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	280	280	300	300
Mínima classe de resistência	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33	C 30/37 LC30/33
Teor mínimo de ar (%)	-	4.0	-	4.0

⁽¹⁾Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T II/B-W, respetivamente.
⁽²⁾Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer portland, em massa.

Quadro 8 - 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 ⁽¹⁾ ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A ⁽¹⁾		
	XA1	XA2	XA3	XA1	XA2	XA3
Máxima razão água/cimento	0.55	0.50	0.45	0.50	0.45	0.45
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	320	340	360	340	360	380
Mínima classe de resistência	C 30/37 LC30/33	C 35/45 LC35/38	C 35/45 LC35/38	C 35/45 LC35/38	C 40/50 LC40/44	C 40/50 LC40/44

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

3.4.2. Classes de consistência

A NP EN 206-1 [18] indica que as classes de consistência são definidas para betão fresco devidamente misturado e em condições de poder ser compactado pelo método escolhido. A consistência do betão está muito relacionada com a mobilidade relativa deste, isto é, está ligada com a capacidade que o betão tem de se espalhar e a sua plasticidade determina a facilidade de o moldar, esta mobilidade relativa é muitas vezes medida em termos do abaixamento que a mistura apresenta. Esse abaixamento pode ser obtido através de um ensaio com o mesmo nome, que 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. Quanto maior for o abaixamento maior será a mobilidade relativa do betão.

A consistência pode ser definida pela NP EN 206-1 [18] através de quatro classes distintas: classe de abaixamento, classe vêbê, classe de compactação e classe de espalhamento (Quadros 9 a 12).

Quadro 9 – Classes de abaixamento

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

Quadro 11 – Classes Vêbê

Classe	Tempo Vêbê (s)
V0	≥ 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	≥ 1,46
C1	1,45 a 1,26
C2	1,25 a 1,11
C3	1,10 a 1,04
C4	< 1,04

Quadro 12 – Classes de espalhamento

Classe	Diâmetro de espalhamento (mm)
F1	≤ 340
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 550
F5	560 a 620
F6	≥ 630

3.4.3. Classes relacionadas com a máxima dimensão do agregado

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}) [18].

3.4.4. Classes de resistência à compressão

Quando o betão for classificado em relação à sua resistência, aplica-se o Quadro 13 para o betão da massa volúmica normal e betão pesado ou o Quadro 14 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 alcançado com um grau de incerteza de 5% [18].

3.4.5. Classes de massa volúmica do betão leve

O quadro 15 permite classificar o betão consoante a sua massa volúmica.

Quadro 13 – 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 $f_{ck,cyl}$ (N7mm ²)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N7mm ²)
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 14 – Classes de resistência à compressão para betão leve

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N7mm ²)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N7mm ²)
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
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		

Quadro 15 – Classes de massa volúmica do betão leve

Classes de massa volúmica	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Mass volúmica (kg/m ³)	≥ 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

4. Métodos de Estudo de Composição de Betões

4.1. Generalidades

O estudo da composição de betões deve ser executado tendo em especial atenção o binómio qualidade-custo, sem contudo deixar os requisitos de qualidade descurados, nomeadamente o comportamento que o betão deverá ter face à exposição ambiental e às diferentes solicitações mecânicas. Logo, por forma a obtermos um betão com o binómio qualidade-custo que pretendemos, teremos, previamente, de realizar uma seleção criteriosa dos materiais que serão usados na mistura. Esta seleção deverá também ter em consideração as características geométricas das peças a betonar, os meios disponíveis para a amassadura, transporte, colocação e cura, bem como as condições ambientais previstas para a altura da betonagem.

Os primeiros “estudos” sobre a composição adequada da mistura de betões foram realizados empiricamente, isto é, através da experiência que ia passando ao longo dos anos. O facto de existir o objetivo de alcançar um betão com consistência adequada para a mistura, cumprindo os requisitos de compacidade e estabilidade química que potenciasses a sua resistência, levou a que muitos investigadores da área pretendessem obter regras e critérios de composição.

Foram então alguns investigadores a contribuir para o desenvolvimento da composição de betões que hoje em dia conhecemos:

1896 – Feret descobre a relação entre a resistência à compressão e a compacidade, definindo-a como o quociente entre a dosagem de cimento e a soma dos volumes de água e vazios;

1907 – Fuller e Thompson propunham pela primeira vez uma curva granulométrica de mistura ótima dos agregados;

1925 – Bolomey após Abrams introduzir a noção de módulo de finura e trabalhabilidade, apresenta uma curva granulométrica de composição melhorada em relação à posposta por Fuller e Thompson;

1937 – Caquot precisa o conceito de efeito de parede;

1941 – Faury apresenta uma nova curva granulométrica de referência para a composição de betões. [23, 27]

Os métodos de composição de betões podem ser discriminados resumidamente em três grupos: métodos que seguem apenas a via experimental; métodos baseados em curvas de referência; métodos baseados em ábacos ou tabelas.

Os métodos que seguem a via experimental resumem-se em realizar várias amassaduras até chegar á mistura ótima, pretendida para uma determinada aplicação. Após chegarem a essa amassadura ótima é retirada toda a informação necessária para fazer novamente a mesma mistura, isto é, a quantidade de agregados, cimento e água. Este tipo de método é realizado em laboratório, e é bastante demorado, além disso implica um desperdício, ainda que reduzido.

Os métodos baseados nas curvas granulométricas de referência, consistem em obter uma mistura que deve ter o maior número de pontos coincidentes com a curva granulométrica de referência. Essas curvas granulométricas de referência foram obtidas após estudos experimentais que satisfaçam os requisitos necessários, de forma a alcançar uma maior compactidade possível sem contudo afetar a trabalhabilidade necessária. Neste grupo destaca-se os métodos de Fuller – Thompson, Bollomey e o Faury.

O grupo de métodos que se baseiam em ábacos ou tabelas, consiste em obter uma mistura usando composições preestabelecidas, com constituintes normalizados. Dessa forma não existem desvios na qualidade do betão a obter, desprezando assim novos estudos para novas composições de betões sem contudo comprometer a resistência necessária para determinado efeito. O facto de os constituintes serem normalizados contribui muito positivamente para este tipo de métodos deterem sucesso, visto que, a sua qualidade está assegurada, não existindo flutuações anormais na sua qualidade geral. O método que se destaca mais neste grupo é o método ACI.

4.2. Descrição do Método ACI

4.2.1. Generalidades

O método ACI 211.1-91 [2] faz parte dos métodos que se baseiam em ábacos ou tabelas. Este método de composição de betões é dos mais conhecidos e difundidos no mundo inteiro. Baseia-se no trabalho desenvolvido por Abrams e Powers, e fornece uma metodologia para quantificar proporções de constituintes necessários para a produção de betões com cimento, com ou sem adições ou adjuvantes. [2]

O método proporciona uma primeira aproximação de proporções que posteriormente será verificada por lotes experimentais no laboratório ou no campo podendo ser ajustado, se necessário, para produzir o betão com as características desejadas.

Recorrendo a tabelas, obtemos as quantidades de constituintes necessárias para a produção do betão com as resistências necessárias. Este método é utilizado correntemente em países que adotaram constituintes normalizados. Para isso esses mesmos constituintes só estarão normalizados se obterem a designação CE, respeitando as regras normalizadas dos países aderentes.

4.2.2. Procedimento

A obtenção das quantidades necessárias para ensaios laboratoriais, envolve uma série de passos, nos quais são consideradas as características dos materiais constituintes para a mistura.

1º Passo: Escolha do abaixamento

O abaixamento poderá ser especificado consoante a nossa vontade, como poder-se-á recorrer ao quadro 16, em que relaciona diferentes tipos de trabalho com o abaixamento mínimo e máximo recomendado.

Quadro 16 – 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 paredes reforçadas	100	25
Pilares de edifícios	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Betão em massa	75	25

2º Passo: Escolha da máxima dimensão do agregado

O objetivo deve ser o uso da maior quantidade possível de agregados tal que as suas partículas sejam aglomeradas pela pasta de cimento, ou seja, deve ser utilizado agregado com partículas da maior dimensão possível compatível com as condições da obra, com granulometria desde a areia fina ao agregado grosso de modo a minimizar o conteúdo de vazios na mistura de agregados como também a quantidade de pasta de cimento necessária. Assim, a mistura de agregados deve ter a maior compacidade possível o que, em geral, conduz, a um volume de 70 a 80% do volume total do betão [28].

3 Passo: Estimativa da quantidade de água e ar presentes na amassadura

A estimativa de água e ar presentes na amassadura retira-se a partir do quadro 17. Essa estimativa irá depender da escolha antecipada do nível de abaixamento e a dimensão máxima do agregado.

Quadro 17 – Requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão máxima dos agregados e do abaixamento

Abaixamento (mm)	Água, kg/m ³ por betão para as dimensões máximas nominais dos agregados							
	9,5	12,5	19,0	25,0	37,5	50,0	75,0	150,0
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 sem introdutores de ar (%)	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	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	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Exposição moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
Exposição extrema	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

A textura e forma dos agregados podem condicionar os requisitos de água de amassadura, isto é, poderemos necessitar de quantidades superiores ou inferiores relativamente às quantidades apresentadas anteriormente, contudo os valores apresentados têm um grau de certeza necessária para uma primeira estimativa das proporções. Se o abaixamento encontrado for diferente do que tinha estimado no início, deverá acrescentar-se ou diminuir-se a quantidade de

água presente na amassadura em 2kg/m^3 do betão, a fim de obtermos um acréscimo ou decréscimo de 10mm de abaixamento, respetivamente.

4º Passo: Escolha da razão água/cimento

A razão água/cimento é determinada com o intuito de obter a resistência e durabilidade desejadas. O facto de obtermos diferentes resistências quando se utiliza a mesma razão água/cimento, bastando utilizar diferentes agregados, cimentos e material cimentício desenvolveu a necessidade eminente de criar uma relação entre a razão água/cimento e a resistência do betão.

Então, com o objetivo de relacionar a resistência do betão com a sua razão água/cimento a ACI 211.1-91 [2] desenvolveu um quadro que nos ajuda a selecionar a razão água/cimento que mais pretendemos, diretamente relacionada com a resistência à compressão do betão aos 28 dias (Quadro 18).

Quadro 18 – Relação entre razão a/c e resistência à compressão do betão

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	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	0,60
15	0,79	0,70

*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 152x305mm 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.

Em situação normal a resistência média à compressão deve ser sempre superior ao valor característico, f_{ck} . É definido que a resistência do betão é satisfatória sempre que o valor médio de três testes consecutivos de resistência à compressão seja superior ao valor característico, f_{ck} , e:

- Nenhum valor individual seja inferior ao f_{ck} em mais de 3,4MPa, para resistências inferiores a 35MPa;
- Nenhum valor individual seja inferior ao f_{ck} em mais de 10% para resistências superiores a 35MPa.

5º Passo: Cálculo da quantidade de cimento

O cálculo da quantidade de cimento presente na amassadura é definido a partir das etapas anteriores, isto é, a quantidade de cimento é igual à quantidade de água por unidade de volume de betão, que foi definida no passo 3, a divide pela razão a/c, definida no passo 4.

Quantidade de cimento (kg/m^3) =

$$\frac{\text{Quantidade de água estimada por unidade de volume (kg/m^3)}}{\text{Razão a/c}} \quad (1)$$

Quadro 19 – Volume de agregado grosso por unidades de volume de betão

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão para diferentes módulos de finura de agregado fino			
	2,4	2,6	2,8	3,0
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19,0	0,66	0,64	0,62	0,60
25,0	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50,0	0,78	0,76	0,74	0,72
75,0	0,82	0,80	0,78	0,76
150,0	0,87	0,85	0,83	0,81

6º Passo: Estimativa da quantidade de agregado grosso

Esta estimativa retira-se a partir do quadro 19, que relaciona a dimensão máxima nominal do agregado com o módulo de finura de agregado fino.

O módulo de finura de um agregado calcula-se a partir do método ASTM 136, [29] indicando que o módulo de finura é igual ao somatório das percentagens acumuladas em massa de agregado que foram retidas nos peneiros da série normal, a dividir por 100. O módulo de finura é um valor adimensional.

No final obtemos o volume de agregados grossos, sendo esses volumes baseados em condições descritas no ASTM C29/C29M [30].

7º Passo: Estimativa da quantidade de agregado fino

A quantidade de agregado fino poder-se-á retirar a partir da consulta do quadro 20, que relaciona a dimensão máxima nominal do agregado com uma primeira estimativa de massa unitária de betão.

Quadro 20 - Primeira estimativa para massa do betão fresco

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Primeira estimativa de massa unitária de betão (kg/m ³)	
	Betão sem ar introduzido	Betão com ar introduzido
9,5	2280	2200
12,5	2310	2230
19,0	2345	2275
25,0	2380	2290
37,5	2410	2350
50,0	2445	2345
75,0	2490	2405
150,0	2530	2435

Estes valores são calculados para betões de teor em cimento médio de 330kg/m³ e abaixamento médio de agregados com 2,7kg/dm³ de massa específica.

8º Passo: Ajustes das quantidades de agregados finos

Como normalmente os agregados finos estão humedecidos dever-se-á contemplar esse excesso de peso que a água lhes acrescenta. Para que na altura em que se pesar o agregado fino se aumente nas devidas proporções a percentagem derivada do teor em água que aquela dada amostra contém.

A fórmula para calcular a massa do betão fresco por m³ é:

$$U_M = 10G_a(100 - A) + C_M \frac{1-G_a}{G_c} - W_M(G_a - 1) \quad (2)$$

Em que:

U_M – Massa unitária do betão fresco, kg/m³

G_a – Média ponderada da massa específica do combinado agregado grosso/fino

G_c – Massa específica do cimento (geralmente 3,15)

A – Quantidade de ar, em percentagem

W_M – Requisito de água de amassadura, kg/m³

C_M – Requisito de cimento, kg/m³

9º Passo: Ensaios e ajustes das quantidades

As proporções devem, por último, ser verificadas segundo ensaios laboratoriais preparados e testados segundo a ASTM C192/C192M [31] ou ensaios de campo.

Por último procede-se à betonagem das peças já dimensionadas (fig. 8).



Figura 8 - Ilustração de uma betonagem

5. Estudo da Composição

5.1. Estudo de composição de betões utilizando cinzas volantes

A composição dos betões é efetuada tendo em conta o método proposto pelo ACI 211.1-91 [2], e tem como objetivo obter betões com a menor quantidade de cimento possível substituindo-se por cinzas volantes, sem contudo, baixar a sua classe de resistência à compressão. Inicialmente estudar-se-á um betão que na sua composição apenas contém cimento como elemento ligante, desta forma será possível validar o método e encontrar um betão de classe pretendida (C 25/30) que servirá de referência. Em seguida estudar-se-ão betões que contêm cimento e cinzas volantes como elementos ligantes na sua composição.

5.2. Materiais utilizados no estudo

5.2.1 Cimento

O cimento a utilizar no desenvolvimento deste estudo será o cimento Portland CEM I 42.5R (fig.9) dado que é um dos cimentos mais utilizados nas obras de construção civil e que tem como principais características a sua elevada qualidade e desempenho possibilitando o fabrico de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.



Figura 9 - Cimento Secil - CEM I 42.5R

O cimento deriva da empresa Secil, que é uma das grandes produtoras nacionais de cimento. Segundo o fabricante este cimento é produzido na

fábrica da Secil-Outão e na Maceira-Liz sendo certificado segundo a norma NP EN 197-1 [32]. Na sua composição, entre outros compostos este cimento contém uma percentagem entre 95% a 100% de Clínquer Portland. O cimento é distribuído a granel utilizando sacos estanques, de forma a minimizar a deterioração, e normalmente tem peso de 40kg.

Através das fichas técnicas apresentadas pelo fabricante foi possível recolher mais informações úteis, podendo assim caracterizar melhor a capacidade deste cimento. A seguir temos o quadro 21 que apresenta as características químicas, físicas e mecânicas deste cimento CEM I 42.5R.

Quadro 21 - Caracterização do cimento Portland CEM I 42.5R [32]

	Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado ⁽¹⁾
	Químicas	Perda ao Fogo		NP EN 196-2
Resíduo Insolúvel		NP EN 196-2	≤ 5,0%	
Teor de Sulfatos		NP EN 196-2	≤ 4,0%	
Teor de Cloretos		NP EN 196-21	≤ 0.10%	
⁽¹⁾ As percentagens são referidas à massa do cimento				
	Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado
	Princípio de Presa		NP EN 196-3	≥ 60 min
	Expansividade		NP EN 196-3	≤ 10 min
Mecânicas – Resistência à Compressão (MPa)	Resistência aos primeiros dias		Resistência de Referência	NP EN 196-1
	2 dias	7 dias	28 dias	
	≥ 20	-	≥ 42.5 e ≤ 62.5	

5.2.2. Cinzas Volantes

As cinzas volantes a utilizar neste estudo foram produzidas no Centro de Produção de Sines da EDP e são colocadas no mercado pela empresa EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. As cinzas volantes são devidamente certificadas pelo organismo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tendo em consideração todas as provisões referentes à comprovação da conformidade e ao desempenho do produto descritas no anexo ZA da norma NP EN 450-1 [33]. O controlo de conformidade é alcançado através do trabalho

de inspeção submetido pelo fabricante que efetua um controlo da produção na fábrica e realiza ensaios complementares às amostras colhidas na fábrica de acordo com um plano de ensaios pré-estabelecidos. Posteriormente o organismo notificado (LNEC) realiza uma série de tarefas. Inicialmente efetua ensaios tendo em consideração as características mais relevantes do produto, em seguida executa uma auditoria inicial à fábrica e ao controlo de produção, prosseguindo com o acompanhamento contínuo, a avaliação e a aprovação do controlo de produção na fábrica e o ensaio de amostras colhidas em fábrica, no mercado ou mesmo no local da obra.

Através da declaração de conformidade emitida a favor das cinzas volantes utilizadas poder-se-á obter algumas informações quanto às suas características principais. Em anexo indicam-se resumidamente algumas dessas características, bem como, os valores característicos e os seus limites para de alguma forma poder qualificar e quantificar a qualidade das cinzas volantes empregues neste estudo. Muito resumidamente pode-se declarar que a finura das cinzas volantes são da categoria N, o seu valor declarado de finura é igual a 16%, a categoria de perda ao fogo é B e a sua massa volúmica é igual a 2300kg/m³.

5.2.3. Agregados

Os agregados selecionados para o estudo são fornecidos pela empresa Britaminho. Estes agregados são de origem granítica e são extraídos da pedra "Sorte do Mato das Lagedas" que se localiza no concelho de Guimarães.

Como agregados grossos (brita) foi selecionado a 6/12 mm, correspondendo aos intervalos de dimensões mínimas e máximas dos diversos fragmentos que a compõem. Segundo as fichas técnicas fornecidas pelo fabricante, estes agregados cumprem devidamente as seguintes normas:

- EN 12620:2002+A1:2008 – Agregados para Betão;
- EN 13043:2002/AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos de superfície, para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação;

- EN 13242:2002+A1:2007 - Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction;

Como agregado fino (areia) foi selecionada a 0/4 mm, correspondendo aos intervalos de dimensões mínimas e máximas, tal como nos agregados grossos. Também segundo as fichas técnicas podemos encontrar que estes agregados satisfazem as seguintes normas:

- EN 12620:2002+A1:2008 – Agregados para betão;
- EN 13139:2002/AC:2004 – Agregados para argamassas;
- EN 13043:2002/AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos de superfície, para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação;
- EN 13242:2002+A1:2007 - Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction;

Para estudar a composição do betão com recurso ao método ACI 211.1-91 [2] foi já identificado na secção 4.2.2. 6º passo, que será necessário conhecer o módulo de finura dos agregados, bem como a sua baridade. Por conseguinte procedeu-se a trabalhos complementares para se identificar os itens pretendidos.

Então a primeira tarefa inicia-se com a realização de uma análise granulométrica aos agregados, para depois encontrar o seu módulo de finura. No quadro 22 apresentam-se os resultados obtidos após a análise granulométrica dos agregados.

5.2.3.1. Cálculo do módulo de finura

A determinação do módulo de finura dos agregados é fundamental na formulação do betão. Este parâmetro é definido como a soma das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro da série normal, entende-se como 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 estendida até à máxima dimensão do agregado [34].

$$M.Finura = \frac{\sum[(100 - 19) + (100 - 29) + (100 - 45) + (100 - 63) + (100 - 84) + (100 - 99)]}{100}$$

$$M.Finura = 2.61 \quad (3)$$

Quadro 22 - Resultados obtidos após ensaio granulométrico

Dimensão dos Peneiros (mm)	Brita 6/12	Areia 0/4
	(% Acumulados Passados)	
25	100	
22.4		
20		
16	100	
14	100	
12.5	95	
11.2	79	
10	46	
8	14	100
6.3	6	
5.6		100
5		
4	1	99
2	1	84
1	1	63
0.5	1	45
0.25	1	29
0.125	1	19
0.063	1	11

5.2.3.2. Baridade

Existem diversas normas que especificam os diversos métodos para determinar a baridade dos agregados. Entre essas normas temos a ASTM

C29/C29M [30] que determina a baridade dos agregados em condições compactadas ou não compactadas, existe também a NP EN 1097 – 3 [35] que é muito usual no plano nacional. Embora no âmbito da dissertação se tenha seguido o método americano uma vez que é o utilizado pelo ACI 211.1-91 [2].

A. Princípio:

A baridade, também denominada como densidade aparente, define-se como sendo a relação entre a massa de uma quantidade de agregado e o volume ocupado pelo mesmo incluindo vazios.

B. Equipamento necessário:

Varão de compactação, de secção transversal circular, desempenado, com diâmetro de (16 ± 1) mm e comprimento de (600 ± 5) mm e com as extremidades arredondadas.

Recipiente, contentor cilíndrico de metal, preferencialmente com pegas. A capacidade do contentor vem em função da dimensão máxima do agregado a ser testado (Quadro 23). A superfície interna deve ser lisa e suficientemente rígida para não se deformar, mesmo em caso de choques. O bordo superior deve ser liso, plano e paralelo ao fundo.

Quadro 23 - Capacidade do recipiente

Dimensão máxima do agregado (mm)	Capacidade do recipiente segundo ASTM (l)	Capacidade do recipiente utilizado no estudo (l)
12	-	3.406
12.5	2.8	-

Balança, de capacidade adequada, com erro máximo admissível de 0,1% da massa do provete elementar. Para calibração a balança deve ter um erro máximo admissível de 0,1% da massa de água.

C. Preparação dos provetes elementares

Os agregados devem ser secos a (110 ± 5) °C até massa constante. A massa de cada provete elementar deve estar compreendida entre 125 a 200% da massa necessária para encher o recipiente.

D. Procedimento de ensaio

- 1- Pesar o recipiente vazio, seco e limpo (T).
- 2- O recipiente deve-se encher em três camadas iguais, cada uma das camadas é apiloada com 25 pancadas uniformemente distribuídas pela camada utilizando o varão de compactação.
- 3- A última camada deve ser nivelada de forma a encontrar o melhor balanço entre o número de vazios existentes na superfície do recipiente.
- 4- Pesar o recipiente cheio e registar a sua massa com aproximação de 0,1% (G).

E. Cálculo

A baridade (M) calcula-se para cada provete elementar segundo a seguinte equação:

$$Mi = \frac{G-T}{V} \quad (4)$$

Onde:

Mi – Baridade [kg/m³]

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

T – Massa do recipiente vazio [kg]

V – Volume do recipiente [m³]

Em seguida no quadro 24 apresenta-se os resultados obtidos no ensaio

Quadro 24 - Resultado do ensaio para a determinação da baridade dos agregados

Dimensão Máxima do Agregado (mm)	G (kg)	T (kg)	V (m ³)	Mi (kg/m ³)	M (kg/m ³)
12	6.068	1.102	3.406	1458.01	1461.54
	6.170			1487.96	
	6.002			1438.64	

5.2.4. Água da Amassadura

A água da amassadura deriva da rede de abastecimento pública de Guimarães e que naturalmente chega ao laboratório de Engenharia Civil da universidade. Esta satisfaz as exigências da norma NP EN 206-1 [18] e da especificação do laboratório nacional de engenharia civil E-372 [37].

5.3. Estudo da composição

A partir das expressões e dos conceitos indicados no método ACI, foram obtidas diferentes composições com as dosagens por metro cúbico com o objetivo de obter um betão com o comportamento especificado satisfazendo as propriedades e características pretendidas.

Os betões estudados neste trabalho experimental foram dimensionados com base nas diretivas da NP EN 206-1 [18] e E 464 [37]. No quadro 25 apresenta-se um resumo dos dados com mais ênfase, com o intuito de partir para o estudo das quatro composições pretendidas.

Quadro 25 - Dados mais relevantes para iniciar o estudo das composições de betões

Composições	Classe de Resistência Pretendida (MPa)	Ligante		Abaixamento (mm)
		Percentagem de Cimento	Percentagem de Cinzas Volantes	
Betão I	C 25/30	100	-	75 – 100
Betão II	C 25/30	60	40	
Betão III	C 25/30	80	20	
Betão IV	C 30/37	60	40	

1º Passo – Abaixamento pretendido: 75 a 100 mm

2º Passo – Dimensão máxima do agregado: 12 mm

3º Passo – Estimativa da quantidade de água na amassadura e ar contidos na mistura

Através do quadro 17, proposto na secção 4.2.2. 3º passo, indica-se os requisitos aproximados de água de amassadura e quantidade de ar em função da dimensão dos agregados e do abaixamento, logo no quadro 26 apresenta-se qual a estimativa de água necessária, obtido por interpolação, sabendo desde já as características pretendidas.

Quadro 26 - Resultado da estimativa da quantidade de água necessária para a amassadura

Abaixamento (mm)	Água, kg/m ³ por betão para as dimensões máximas nominais dos agregados								
	9,5	12,0	12,5	19,0	25,0	37,5	50,0	75,0	150,0
Betão sem introdutores de ar									
75 a 100	228	218	216	205	193	181	169	145	124

4º Passo – Escolha da razão água cimento

Através do quadro 18, proposto na secção 4.2.2 4º passo, indica-se qual a razão de água/cimento necessária tendo em consideração a resistência à compressão esperada ao fim de 28 dias de vida.

Uma vez que se pretendiam betões C25/30 e C30/37 chega-se a resistências médias (provetes cilíndricos) pretendidas de 29MPa e 34MPa respetivamente, o valor correspondente da razão a/c foi obtido por interpolação estando discrito no quadro 27, que seguidamente se apresenta.

Quadro 27 - Resultado da relação entre razão a/c e resistência à compressão do betão

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Razão água/cimento, por massa	Classe de Resistência
	Betão sem ar introduzido	
40	0.42	-
35	0.47	-
34	0.484	C 30/37
30	0.54	-
29	0.554	C 25/30
25	0.61	-
20	0.69	-

5º Passo – Cálculo da quantidade de ligante

Após obtermos a razão água/cimento, e a estimativa da quantidade de água necessária para a amassadura, nos passos imediatamente anteriores, chega-se facilmente à quantidade de ligante.

Contudo, como este trabalho tem como objetivo diminuir a percentagem de cimento presente no betão, substituindo-o por cinzas volantes e como o método ACI não prevê a introdução deste tipo de adições, foi então deliberado que ao valor total substitui-se diretamente a quantidade de cinzas, pretendidas para aquela amassadura, pela quantidade de cimento.

Assim sendo, no quadro 28, que se apresenta de seguida, indica-se a várias quantidades de ligantes necessárias para os quatro tipos de betões.

Quadro 28 - Resultado das quantidades de ligante a utilizar

Composições	Classe de Resistência pretendida (MPa)	Razão a/c	Estimativa de água utilizada	Quantidade de Ligante		
				Total	Cimento	Cinzas Volantes
Betão I	C 25/30	0.554	218	393.50	393.50	-
Betão II					236.10	157.40
Betão III					314.80	78.70
Betão IV	C 30/37	0.484		450.41	270.25	180.17

6º Passo – Estimativa da quantidade de agregado grosso

Em primeira instância afere-se o volume de agregados grossos através do quadro 19, já mencionado na secção 4.2.2. 6º passo. Esse quadro relaciona a dimensão máxima do agregado com o módulo de finura, já calculado na secção 5.2.3.1.

Através do quadro 29, que se apresenta de seguida, poder-se-á alcançar o volume de agregados grossos para um metro cúbico de betão, recorrendo a interpolações.

Quadro 29 - Resultado do volume de agregado grosso por unidade de volume de betão

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Volume de agregado grosso por unidade de volume de betão para diferentes módulos de finura de agregado fino		
	2,6	2.61	2,8
9,5	0,48	0.479	0,46
12	0.555	0.554	0.535
12,5	0,57	0.569	0,55
19,0	0,64	0.639	0,62
25,0	0,69	0.689	0,67
37,5	0,73	0.729	0,71
50,0	0,76	0.759	0,74
75,0	0,80	0.799	0,78
150,0	0,85	0.849	0,83

Em seguida (quadro 30), poder-se-á obter a quantidade de agregados grossos através da multiplicação do volume de agregado grosso, já obtido anteriormente, e baridade do agregado, também já obtido na secção 5.2.3.2.

Quadro 30 - Resultado da quantidade de agregado grosso necessária

Composição	Volume de agregado grosso por unidade de betão	Baridade (kg/m ³)	Quantidade de agregado grosso (kg/m ³)
Betão I	0.554	1461.54	809.69
Betão II			
Betão III			
Betão IV			

7º Passo – Estimativa da quantidade de agregado fino

Até este momento todos os constituintes do betão estão estimados faltando apenas determinar a estimativa do agregado fino. Segundo o método ACI a quantidade estimada de agregado fino obtém-se através da diferença entre a estimativa da massa volúmica do betão fresco e o somatório das quantidades dos materiais que constituem o betão, excluindo, como é óbvio, o agregado fino.

A estimativa da massa volúmica do betão, obtém-se através do método ACI. Estes valores são calculados tendo por base a quantidade média em cimento (330kg de cimento por m³) e abaixamento médio pretendido, neste caso 75 a 100mm, para agregados com 2,7 kg/dm³ de massa específica.

É desejado que para diferenças de 20kg na quantidade de cimento tendo como referência 330kg, seja corrigido a massa por m³ em 3kg na direção correta. O mesmo acontece com massa específica dos agregados, para diferenças de 0,1 que se desviem de 2,7 kg/dm³, a massa deve ser corrigida em 60kg na direção correta.

O quadro 31 tem origem no método ACI, e será adaptado ao âmbito do estudo que está a ser desenvolvido.

Quadro 31 - Primeira estimativa de massa volúmica do betão

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Primeira estimativa de massa volúmica de betão (kg/m ³)
	Betão sem ar introduzido
9.5	2280
12	2305
12.5	2310
19	2345
25	2380
37.5	2410
50	2445
75	2490
150	2530

A estimativa da massa volúmica do betão é determinada utilizando um interpolação entre os valores presentes na tabela, visto que, não existe diretamente na tabela apresentada pelo método ACI o valor de 12 mm para a dimensão máxima nominal do agregado.

O método ACI 211.1-91 [2] sugere dois métodos para a estimativa da quantidade de agregado fino, no âmbito deste estudo, essa estimativa foi calculada pelo método do peso.

A quantidade estimada do agregado fino é calculada através da diferença entre a primeira estimativa da massa volúmica e o somatório das quantidades de todos os constituintes do betão, com exceção do agregado fino, isto é, o somatório da quantidade de ligante, agregado grosso e água, que foram anteriormente calculadas. Assim sendo o método apresenta a seguinte equação.

$$E = A - \sum(B + C + D) \quad (5)$$

Onde:

- A- Primeira estimativa para a massa do betão fresco [kg/m³]
- B- Quantidade de cimento [kg/m³]
- C- Quantidade de agregado grosso [kg/m³]

D- Quantidade de água [kg/m³]

E- Quantidade de agregado fino [kg/m³]

O quadro 32, indica em resumo das quantidades de todos os constituintes para as amassaduras que serão realizadas no trabalho experimental.

Quadro 32 - Resumo das quantidades dos constituintes a utilizar nas amassaduras

Composição	Primeira estimativa para massa do betão fresco (kg/m ³)	Quantidade de Ligante		Quantidade de Água (kg/m ³)	Quantidade de Agregado Grosso (kg/m ³)	Quantidade de Agregado Fino (kg/m ³)
		Cimento (kg/m ³)	Cinzas Volantes (kg/m ³)			
Betão I	2305	393.50	-	218	809.69	883.81
Betão II		236.10	157.40			
Betão III		314.80	78.10			
Betão IV		270.25	180.17			826.90

8º Passo – Ajuste das quantidades de agregados finos e grossos

Quando se realiza a pesagem dos agregados deve-se ter em consideração o seu teor de humidade, visto que, na maioria das vezes estes apresentam-se húmidos. Logo o seu peso deve aumentar na percentagem de água que estes já contêm e ao invés dever-se-á acrescentar menos quantidade de água à amassadura, visto que os agregados já contribuem com parte da quantidade total de água necessária à amassadura.

Contudo, utilizando agregados devidamente secos, é necessário efetuar um ajuste na quantidade de água a utilizar nas amassaduras. Tendo por base a absorção de água por parte dos agregados será necessário acrescentar uma percentagem de água adicional para contornar este obstáculo. No quadro 33 indica a percentagem de água que será absorvida pelos agregados aquando da amassadura com base no coeficiente de absorção fornecido nas fichas técnicas.

Quadro 33 - Ajuste da quantidade de água de amassadura

Composição	Dimensão dos agregados		Coeficiente de absorção de água, W		Quantidade de água (kg/m ³)	
	Agregado Fino (mm)	Agregado Grosso (mm)	Agregado Fino (%)	Agregado Grosso (%)	Quantidade inicialmente prevista (kg/m ³)	Quantidade efetivamente usada (kg/m ³)
Betão I	0/4	6/12	0.1	0.4	218	222
Betão II						
Betão III						
Betão IV						

9º Passo – Ensaio e ajustes das quantidades

Após obter-se a composição dos betões para a amassadura, evolui-se para a etapa do laboratório. Esta etapa serve para comprovar a validade dos resultados obtidos, caso contrário será necessário o reajuste das composições.

6. Trabalho Experimental

6.1. Generalidades

Após a realização da pesquisa bibliográfica e seguindo a ordem de trabalhos propostos neste estudo, segue-se a próxima etapa, que consiste em desenvolver diferentes tipos de composições de betões e efetuar testes aos mesmos, nomeadamente, verificando a resistência à compressão.

Assim sendo, neste capítulo serão descritos todos os trabalhos práticos realizados em laboratório, particularmente, a produção do betão, os ensaios realizados ao betão fresco, as suas condições de cura e os ensaios de resistência à compressão efetuados ao betão aos 28 dias.

6.2. Composições estudadas

No quadro 34 mostra-se resumidamente as diferentes composições e respetivas quantidades de materiais necessários para a execução de 1m^3 de betão.

Quadro 34 - Resumo das quantidades necessárias para realizar 1m^3 de betão

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m^3)
	Agregados grossos 6/12 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42.5R (kg/m^3)	Cinzas Volantes Sines (kg/m^3)	
Betão I	809.69	883.81	393.50		218.00
Betão II			236.10	157.40	
Betão III			314.80	78.10	
Betão VI			270.25	180.17	

A primeira fase do trabalho consiste na produção de provetes cúbicos com 150mm de aresta, de acordo com a norma NP EN 12390-3 [38], sendo possível a sua produção com o auxílio de moldes em ferro fundido, que previamente são retificados e calibrados.

Para proceder á realização das amassaduras foi necessário produzir cerca de 0.03m^3 de betão. Essa quantidade justifica-se pela necessidade de encher 6 moldes, 0.02028m^3 e para realizar o ensaio de abaixamento, cerca de

0.0045m³, perfazendo uma quantidade total igual a 0.02478m³ que seguidamente foi arredondada de forma a compensar todas as perdas de betão, bem como garantir o enchimento homogéneo dos moldes.

Para garantir que a quantidade de água utilizada nas amassaduras era exatamente aquela que foi calculada anteriormente, era imperativo empregar agregados devidamente secos. Mas para que esses mesmos agregados não absorvessem parte da água necessária, que garantiria uma correta reação com os ligantes, foi necessário ajustar essa mesma quantidade, tendo em consideração o coeficiente de absorção de água, indicado na ficha técnica do material.

Assim sendo, a quantidade de água necessária é calculada através da seguinte expressão:

$$\text{Quantidade água} = W + W0.4 * Q. \text{Agregados grossos} + W0.1 * Q. \text{Agregados finos} \quad (6)$$

Em que:

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

W0,4 – Coeficiente de absorção de água do agregado grosso, %;

W0,1 – Coeficiente de absorção de água do agregado fino, %;

No quadro 35 indicam-se as quantidades de materiais utilizados em cada amassadura, tendo em consideração a adição de água descrita anteriormente.

Quadro 35 - Quantidade de material necessário para a realização de 0.03 m³ de betão

Designação da composição	Quantidade dos agregados		Quantidade de Ligante		Quantidade de água (kg/m ³)
	Agregados grossos 6/12 (mm)	Agregados finos 0/4 (mm)	Cimento CEM I 42.5R (kg/m ³)	Cinzas Volantes Sines (kg/m ³)	
Betão I	24.29	26.51	11.81		6.66
Betão II			7.08	4.72	
Betão III			9.44	2.34	
Betão VI		24.81	8.11	5.41	

Concluído o cálculo das quantidades de materiais a utilizar nas amassaduras, procedeu-se definitivamente ao trabalho em laboratório.

6.3. Realização da amassadura

O processo de amassadura tem como principal objetivo, garantir a mistura mais homogénea possível, para que dessa forma todos os materiais que compõem o betão fiquem devidamente envolvidos.

Para realizar a amassadura é utilizada uma misturadora (betoneira), presente no laboratório de materiais de construção, e para salvaguardar uma mistura homogénea é importante a ordem que se colocam os materiais constituintes. Logo, com a betoneira em funcionamento mistura-se a brita com a areia fina, em seguida adiciona-se o cimento e posteriormente as cinzas volantes, por último, adicionam-se a água. Após este processo deixa-se a betoneira (fig. 10) em funcionamento cerca de 5 minutos.



Figura 10 - Betoneira utilizada nas amassaduras

A primeira amassadura, a qual deu origem o *betão I*, foi realizada com agregados contendo um determinado teor de humidade. E como o estudo tinha

sido idealizado utilizando agregados devidamente secos causou um problema que teria que ser obviamente solucionado.

Logo, esse teor de humidade teria de ser previamente determinado. Para o determinar foi retirada uma porção de agregados finos e grossos à globalidade dos agregados disponíveis, seguidamente aferiu-se o peso inicial das duas porções e levando-as ao micro-ondas extraiu-se a percentagem total de água contida nos agregados, no final determinou-se o peso da água existente subtraindo-se o peso inicial pelo peso final das duas porções. O quadro 36 permite obter uma visão global do que foi descrito anteriormente.

Quadro 36 - Resultado da quantidade de água presente nos agregados

Agregados Finos			Agregados Grossos		
Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso água presente (g / %)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso água presente (g / %)
170.5	168.5	2.0 / 1.17	85.4	85.4	0.0 / 0

Mediante os resultados obtidos ajustaram-se as quantidades dos agregados e da água que iriam fazer parte da amassadura, tendo já em consideração o teor de humidade presente, nomeadamente nos agregados finos, visto que, com a experiência realizada provou-se que os agregados grossos não continham qualquer teor de humidade. No quadro 37 demonstra-se como foi realizado o ajuste.

Quadro 37 - Ajuste da quantidade efetivamente utilizada

Agregado Fino			Água		
Quantidade inicialmente prevista (kg/m ³)	% de água presente nos agregados	Quantidade efetivamente usada (kg/m ³)	Quantidade inicialmente prevista (kg/m ³)	% de água presente nos agregados	Quantidade efetivamente usada (kg/m ³)
883.81	1.17	894.15	222.00	1.17	219.40

Numa segunda amassadura, utilizando já cinzas volantes obteve-se um abaixamento superior ao pretendido, logo para evitar novo abaixamento indesejado foram realizadas amassaduras posteriores tendo o cuidado de utilizar agregados devidamente secos em estufa. Essa tarefa foi realizada por um período mínimo de 24h e usando uma temperatura constante por volta dos

104 °C. Posteriormente os agregados foram retirados e mantidos num local com baixa humidade, para que estes se conservassem secos e obtivessem uma temperatura ambiente. Este cuidado era de extrema importância, visto que, se as amassaduras fossem realizadas com os agregados a temperaturas demasiado elevadas estes tenderiam a absorver uma maior quantidade de água.

6.3.1. Ensaio de Abaixamento

No final de cada amassadura foi sempre realizado o ensaio de abaixamento, para dessa forma validar o método ACI (quadro 38), pois este método inicia-se prevendo um abaixamento. Se esse abaixamento não for o esperado ter-se-á de realizar novo cálculo da composição.

Então logo após a realização da amassadura e antes de encher os moldes, com o auxílio do cone de Abrams (fig. 11) foi efetuado o ensaio de abaixamento segundo a norma NP EN 12350-2 [39].

O ensaio de abaixamento só é válido no caso de se verificar um abaixamento verdadeiro, no qual o betão permaneça substancialmente intacto e simétrico.

Se 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.



Figura 11 - Cone de Abrams utilizado para o ensaio de abaixamento

Quadro 38 - Ensaio de abaixamento (discrição do método)

Princípio	O princípio deste ensaio é compactar o betão fresco no interior de um molde com forma troncocónica. Após a remoção do molde, verifica-se o abaixamento do betão estabelecendo-se a classe da sua consistência.
------------------	--

Material Necessário	Molde	Feito em metal, não facilmente atacável pela pasta de cimento, com pelo menos 1,5 cm de espessura;
		O interior deve ser liso e convenientemente retificado, sem rebites ou mossas;
		Deve ter uma forma troncocónica;
		Dimensões: 20 cm de diâmetro de base, 10 cm de diâmetro no topo e 30 cm de altura.
	Varão de compactação	Secção transversal circular;
		Dimensões: diâmetro de aproximadamente 16mm e comprimento de aproximadamente 600mm;
		Extremidades arredondadas.
	Placa/ Superfície	Não absorvente, rígida, plana, sobre a qual é colocado o molde.
	Colher	Com cerca de 100mm de largura
	Régua	Graduada de 0 a 300 mm;
Com divisões menores ou iguais a 5 mm.		

Procedimento	1. O equipamento em contacto com a amostra de betão deve ser previamente humedecido (molde, funil, varão de compactação e placa/superfície);
	2. Encher o recipiente em três camadas iguais, cada uma das camadas é apiloada com 25 pancadas uniformemente distribuídas utilizando o varão de compactação;
	3. Ao encher e apiloar a camada de topo, a superfície do molde deve ser regularizada (rasada) com uma colher de modo a ficar perfeitamente nivelado;
	4. Remover o molde, subindo-o cuidadosamente na vertical. Este processo de desmoldagem deve demorar entre 2 a 5 s e efetuado com um movimento firme;
	5. Procede-se à medição do abaixamento, entendendo-se que o abaixamento será igual à diferença entre a altura do cone de Abrams e a altura do ponto mais alto do betão que assentou

Os valores obtidos foram os inicialmente previstos pelo método ACI, mas contudo, notou-se que nas composições que continham cinzas volantes apresentavam um menor abaixamento. Esse fenómeno deve-se ao facto de as amassaduras terem sido efetuadas em períodos de tempo distintos, e com variantes que influenciaram os resultados finais. Tendo em consideração que a amassadura, que originou o betão I, foi realizada num período em que existia uma humidade relativa do ar substancialmente superior à humidade relativa existente no momento das outras amassaduras, pode explicar tais resultados.

No quadro 39 apresentam-se os resultados obtidos após a realização dos ensaios de abaixamento.

Quadro 39 - Resultados relativos ao ensaio de abaixamento

Designação da composição	Abaixamento (mm)	Classe de Abaixamento
Betão I	100	S2
Betão II	85	S2
Betão III	75	S2
Betão IV	75	S2

6.3.2. Ensaio da determinação da massa volúmica

A massa volúmica depende de fatores tais como, a densidade dos agregados utilizados na composição e também do teor de humidade inicial e final dos agregados, visto que, uma quantidade de água superior ao da saturação da mistura, pode favorecer a formação de vazios no betão, reduzindo assim a sua densidade.

O método utilizado para determinar a massa volúmica do betão vem descrito na norma NP EN 12350-2 [39] (quadro 40). Segundo a norma temos o seguinte:

Quadro 40 - Síntese do método utilizado para a determinação da massa volúmica do betão

Princípio	O betão fresco é compactado dentro de um recipiente rígido e estanque, de volume e massa conhecidos, sendo pesado posteriormente.
------------------	---

Material Necessário	Recipiente	Estanque
		Com rigidez suficiente para manter a forma
		Feito de metal não atacável facilmente pela pasta de cimento
		Tendo a face interna lisa e o bordo superior com acabamento de uma superfície plana
	Varão de compactação	Retilíneo
		Feito de aço
		Seção circular com um diâmetro de aproximadamente 16mm
		Comprimento de aproximadamente 600mm
		Extremidades arredondadas
	Balança	Capaz de obter precisões iguais a 0,01g
Colher	Com cerca de 100mm de largura	
Maço	Superfície macia	

Procedimento	1. Calibrar e pesar o recipiente de modo a determinar o seu volume (V) a sua 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. Procede-se ao nivelamento da superfície com auxílio da colher e seguidamente pesa-se o recipiente (m2).

Continuação do quadro 40 - Síntese do método utilizado para a determinação da massa volúmica do betão

Cálculo	$D = \frac{m2 - m1}{V}$ <p>No qual:</p> <p>D - massa volúmica do betão fresco, kg/m³; m1 – massa do recipiente vazio, kg; m2 – massa do recipiente cheio e compactado, kg; V – volume do recipiente, m³.</p>
----------------	---

Quadro 41 - Comparação entre da massa volúmica obtida e a esperada

Composição	m1 (kg)	m2 (kg)	V (m ³)	D (kg/m ³)	Densidade prevista (kg/m ³)
Betão I	6.193	24.659	0.008	2308	2305
Betão II		24.433		2280	
Betão III		24.583		2299	
Betão IV		24.453		2283	

Observando os resultados obtidos, chega-se á conclusão que a massa volúmica inicialmente prevista pelo método ACI 211.1-91 [2] é muito aproximada com a massa volúmica obtida através dos ensaios anteriormente descritos (Quadro 41).

6.4. Moldagem, desmoldagem e cura

Mesmo antes de proceder ao enchimento dos moldes (fig. 12) foi necessário um pequeno tratamento prévio. Em primeira instância foi verificado se os moldes estavam devidamente limpos e calibrados para ser utilizados. Em seguida procede-se à colocação de óleo para promover uma desmoldagem mais simplificada, após as primeiras horas de vida do betão.



Figura 12 - Exemplo de molde utilizado nas amassaduras

Depois de ter o molde devidamente preparado foi efetuado o seu enchimento. Essa operação foi cumprida tendo como objetivo obter um betão com o menor índice de vazios. Para alcançar esse objetivo foi utilizada uma mesa vibratória (fig 13), que após o enchimento total do molde, era acionada por um período de 5 segundos para dessa forma retirar a maior parte do ar contido no betão. No final a superfície era regularizada, retirando o excesso, e cumprindo o volume de betão pretendido.



Figura 13 - Mesa vibratória

Ao fim de 24h, é realizada a desmoldagem, e proceder-se-á à identificação de cada provete para posteriormente serem testados. Logo em seguida, inicia-se o processo de cura, durante este processo é importante assegurar a hidratação do betão, logo foi necessário colocar os provetes num local com características específicas em termos de temperatura e humidade. Recomenda-se que os provetes devam permanecer num local com uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de cerca de 98%. Neste trabalho experimental os provetes mantiveram-se numa câmara húmida e imersos em água por forma a obter as características ideais para cura dos provetes.

Após 28 dias o processo de cura termina e os provetes são pesados e ensaiados com o objetivo de determinar a sua resistência à compressão.

6.5. Ensaio de resistência à compressão

Para determinação da tensão de rotura à compressão dos vários provetes foi utilizada uma prensa hidráulica, já existente no laboratório de materiais de construção da Universidade do Minho. O ensaio foi realizado, com as forças aplicadas gradualmente sob o provete, de forma contínua e sem choques, à velocidade de 13.5kN/s.



Figura 14 - Prensa hidráulica existente no laboratório de materiais de construção (UM)

A amostra de caracterização do betão produzido em laboratório foi constituída por um total de 24 provetes, 6 provetes de cada série de amassaduras realizadas e a sua avaliação foi realizada aos 28 dias para todas as séries.

O procedimento adotado no ensaio foi o seguinte:

- 1º - Pesagem de cada um dos provetes a ensaiar;
- 2º - Limpeza dos pratos da prensa;

3º - Introdução dos dados na prensa hidráulica, nomeadamente, a dimensão dos provetes e a velocidade a que as forças eram aplicadas nos provetes;

4º - Registo da carga e conseqüentemente da tensão de rotura de cada provete.

O quadro 42 apresenta uma descrição sumária do ensaio da resistência à compressão.

Quadro 42 - Ensaio da resistência à compressão (discrição do método)

Princípio	Os provetes são ensaiados até à rotura numa máquina de ensaio de compressão conforme a NP EN 12390 [39]. Regista-se a carga máxima suportada pelo provete e calcula-se a resistência à compressão do betão.
------------------	---

Material Necessário	Máquina de ensaios de compressão	
----------------------------	----------------------------------	---

Procedimento	<p>1. Remover o excesso de humidade da superfície do provete antes de colocar na máquina de ensaio, os pratos da máquina e as superfícies do provete que vão estar em contacto devem estar completamente limpas e isentas de qualquer resíduo ou material estranho;</p> <p>2. Posicionar o provete tendo em consideração que a carga aplicada seja perpendicular á direção de moldagem;</p> <p>3. Selecionar uma velocidade constante de aplicação de carga dentro do intervalo 0,2 MPa/s a 1 MPa/s. Aplicar a carga sem choques e aumentá-la de forma contínua, à velocidade constante selecionada $\pm 10\%$, até que não possa ser possível aplicar uma carga maior e de seguida registar a carga máxima indicada.</p>
---------------------	--

Cálculo	$F_c = \frac{F}{A_c}$ <p>No qual:</p> <p>F_c – É a resistência à compressão, em MPa;</p> <p>F – É a carga máxima à rotura, em N;</p> <p>A_c – É a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, em mm².</p>
----------------	---

A figura 15 apresenta um provete antes e depois do ensaio, onde se podem verificar algumas fendas provocadas pelo respetivo ensaio, após atingir o modo de rotura. Os resultados dos ensaios são apresentados no quadro 43, obtendo uma visão global de todos os ensaios.



Figura 15 - Provete antes e depois do ensaio para determinação da classe de resistência à compressão

Quadro 43 - Resultados obtidos relativos aos ensaios de resistência à compressão

	Provetes						Tensão Média, fcm (MPa)
	1	2	3	4	5	6	
Betão I	C 25/30 (100% CEM)						
Peso (kg)	7,80	8,00	8,00	7,94	7,98	7,98	39,8
Carga Máxima (kN)	887	900	902	892	901	888	
Tensão de Rotura (MPa)	39,40	40,00	40,10	39,70	40,10	39,50	
Betão II	C 25/30 (60% CEM + 40% CV)						
Peso (kg)	7,50	7,54	7,60	7,54	7,56	7,48	29,1
Carga Máxima (kN)	648,0	654,6	670,6	663,9	663,0	632,9	
Tensão de Rotura (MPa)	28,80	29,10	29,80	29,50	29,50	28,10	
Betão III	C 25/30 (80% CEM + 20%CV)						
Peso (kg)	7,62	7,72	7,62	7,60	7,60	7,78	35,7
Carga Máxima (kN)	822	818	802	798	789	785	
Tensão de Rotura (MPa)	36,60	36,40	35,60	35,50	35,10	35,00	
Betão IV	C 30/37 (60% CEM + 40% CV)						
Peso (kg)	7,48	7,58	7,54	7,50	7,50	7,54	34,3
Carga Máxima (kN)	752	790	756	780	760	785	
Tensão de Rotura (MPa)	33,50	35,20	33,60	34,80	33,70	35,00	

6.6. Critérios de conformidade de resistência à compressão

Segundo a norma NP EN 206-1 [18] a conformidade da resistência à compressão do betão 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 44 tanto para a produção inicial como para a produção contínua, embora no âmbito da dissertação apenas tenha importância a produção inicial.

Quadro 44 - Critérios de conformidade para a resistência à compressão do betão

Produção	Número “n” de resultados de ensaios de resistência à compressão no grupo	Critério 1	Critério 2
		Média dos “n” resultados (fcm) N/mm ²	Qualquer resultado individual de ensaio (fci) N/mm ²
Inicial	3	$\geq fck + 4$	$\geq fck - 4$
Contínua	≥ 15	$\geq fck + 1.48\sigma$	$\geq fck - 4$

6.6.1. Verificação da conformidade

O quadro 45 apresenta os critérios de conformidade juntamente com os resultados obtidos no trabalho laboratorial já realizado. A conformidade é verificada após satisfazerem os dois critérios de conformidade.

Quadro 45 - Verificação dos critérios de conformidade

Designação da Composição	Valor Característico especificado, fck, cubo	Tensão de rotura, fci (MPa)	Tensão média, fcm (MPa)	Critério 1		Critério 2	
				Média dos “n” resultados (fcm) N/mm ²		Qualquer resultado individual de ensaio (fci) N/mm ²	
				$\geq fck + 4$		$\geq fck - 4$	
Betão I	30	39.40	39.80	39.8 \geq 34	OK	39.4 \geq 26	OK
Betão II	30	28.10	29.10	29.1 \geq 34	KO	28.1 \geq 26	OK
Betão III	30	35.00	35.70	35.7 \geq 34	OK	35.0 \geq 26	OK
Betão IV	37	33.50	34.30	34.3 \geq 41	KO	33.5 \geq 33	OK

6.6.2. Determinação da classe do betão

As composições estudadas apresentam resultados um pouco díspares. Enquanto a composição I apresenta um resultado bastante satisfatório, visto que inicialmente se pretendia um betão com classe C25/30 e quase alcançou resultados próximos da classe imediatamente superior, os restantes betões que continham cinzas volantes apresentaram resultados tangenciais ou mesmo insatisfatórios.

Estes resultados justificam-se facilmente com o método utilizado para o cálculo da composição, visto que, este não previa composições utilizando qualquer tipo de adições. Outra justificação é o facto de parte deste estudo ter como objetivo descobrir qual percentagem máxima de cinzas volantes que poderiam substituir o cimento sem que o betão diminuísse a sua classe de resistência.

No quadro 46, demonstra-se de forma resumida a classe alcançada por cada composição.

Quadro 46 - Classe de resistência à compressão do betão

Designação da composição	$f_{ck} \leq f_{cm} - 4$	$f_{ck} \leq f_{ci} + 4$	f_{ck} , cubo (N/mm ²)	Classe de resistência à compressão
Betão I	≤ 35.80	≤ 43.40	35.80	C 25/30
Betão II	≥ 25.10	≤ 32.10	25.10	C 20/25
Betão III	≤ 31.70	≤ 39.00	31.70	C 25/30
Betão IV	≥ 30.30	≤ 36.50	30.30	C 25/30

Com os resultados obtidos, poder-se-á afirmar que o método ACI 211.1-91 [2] é válido no que diz respeito ao cálculo de composições que só utilizam cimento como único material ligante do betão. Isso demonstra-se claramente através da composição I.

No que diz respeito as composições que continham cinzas volantes, chega-se à conclusão que utilizando o método ACI 211.1-91 [2] é possível alcançar resultados satisfatórios, desde que não ultrapasse 20% da quantidade total de ligante, caso contrário obtém-se um betão com classe de resistência à compressão inferior ao esperado.

7. Análise Económica

Concluído o trabalho experimental dá-se início à análise de benefícios que se pode alcançar ao substituir as cinzas volantes por cimento. Até este mesmo momento podemos aferir que ao utilizar o método ACI, para determinar as várias composições de betões, chega-se à conclusão que será possível substituir diretamente 20% do total de cimento por cinzas volantes, sem que altere a sua classe de resistência.

Sendo assim, pode-se comparar os betões I, III e IV, visto que, apresentam a mesma classe de resistência. Sendo que no caso dos betões I e III existirem mais semelhanças entre si por apresentarem aproximadamente os mesmos componentes e respetivas quantidades, diferindo apenas no ligante utilizado. Verifica-se então que no betão I foi calculada uma quantidade de cimento igual a 393.50 kg/m^3 , já no betão III utilizou-se exatamente a mesma quantidade de ligante mas repartida em 80% de cimento e 20% de cinzas volantes.

Se olharmos para uma análise sustentável onde se pode confrontar os três pilares que sustentam esta mesma ideologia, como já fora referido anteriormente, isto é, o pilar ambiental, social e económico, verifica-se que a nível ambiental e social poucas ou nenhuma dúvida restam do benefício que as cinzas volantes trazem em detrimento do cimento. Já a nível económico existem poucos estudos que demonstram, com clareza, o baixo custo das cinzas volantes quando comparadas com o cimento.

É importante recordar, que as cinzas volantes são subprodutos (lixo), de um outro processo produtivo, e que podem ser aproveitadas na incorporação do betão, reduzindo assim a quantidade de cimento e consequentemente a energia incorporada no processo de produção do betão. Mas com o passar do tempo verifica-se a criação de um novo nicho de mercado, isto é, as cinzas volantes que até então eram consideradas um material fútil e sem solução para o seu armazenamento começam por ser altamente valorizadas. Pois bem, com esta nova realidade pode-se questionar se as cinzas volantes ainda se consideram um subproduto ou um produto que se tem valorizado, devido à sua procura. Neste trabalho, considera-se que as cinzas continuam a ser encaradas como um subproduto, transportando consigo todos os benefícios ambientais e sociais quando comparadas com o cimento. Sendo assim, parte-

se de um princípio que as cinzas volantes a nível ambiental e social continuam a ter um melhor desempenho do que o cimento.

Já a nível económico poder-se-á afirmar que a grande diferença entre a utilização de um betão com ou sem cinzas volantes encontra-se no consumo dos componentes necessários para a obtenção desse mesmo betão, visto que, o custo de colocação e todo o resto do processo produtivo será exatamente igual para os betões.

Logo nos quadros 47 a 49 indicam-se sumariamente os custos associados para obter os betões referidos anteriormente numa obra em Guimarães.

Quadro 47 - Ficha de consumos para obter o betão I

Componentes	Rendimento (kg/m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)	Preço para obra de Guimarães	uni.	Custo unitário (€/kg)	Custo (€/m ³)
Cimento	393.50	-	100.00 ⁽¹⁾	€/ton	100*10 ⁻³	39.350
A. Grosso 6/12	809.69	2630	12.00 ⁽¹⁾	€/m ³	4.563*10 ⁻³	3.695
A. Fino 0/4	894.15	2660	10.00 ⁽¹⁾	€/m ³	3.759*10 ⁻³	3.361
Água	219.40	1000	1.55 ⁽²⁾	€/m ³	1.55*10 ⁻³	0.340
TOTAL						46.746

⁽¹⁾Valor médio obtido através orçamentos requeridos a fornecedores.

⁽²⁾Valor fornecido pela empresa Vimágua.

Quadro 48 - Ficha de consumos para obter o betão III

Componentes	Rendimento (kg/m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)	Preço para obra de Guimarães	uni.	Custo unitário (€/kg)	Custo (€/m ³)
Cimento	314.80	-	100.0 ⁽¹⁾	€/ton	100*10 ⁻³	31.480
Cinzas Volantes	78.10	-	25.0 ⁽¹⁾	€/ton	25*10 ⁻³	1.953
A. Grosso 6/12	809.69	2630	12.0 ⁽¹⁾	€/m ³	4.563*10 ⁻³	3.695
A. Fino 0/4	883.81	2660	10.0 ⁽¹⁾	€/m ³	3.759*10 ⁻³	3.322
Água	218.00	1000	1.55 ⁽²⁾	€/m ³	1.55*10 ⁻³	0.338
TOTAL						40.788

⁽¹⁾Valor médio obtido através orçamentos requeridos a fornecedores.

⁽²⁾Valor fornecido pela empresa Vimágua.

Quadro 49 – Ficha de consumos para obter o betão IV

Componentes	Rendimento (kg/m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)	Preço para obra de Guimarães	uni.	Custo unitário (€/kg)	Custo (€/m ³)
Cimento	270.25	-	100.0 ⁽¹⁾	€/ton	100*10 ⁻³	27.025
Cinzas Volantes	180.17	-	25.0 ⁽¹⁾	€/ton	25*10 ⁻³	4.504
A. Grosso 6/12	809.69	2630	12.0 ⁽¹⁾	€/m ³	4.563*10 ⁻³	3.695
A. Fino 0/4	826.90	2660	10.0 ⁽¹⁾	€/m ³	3.759*10 ⁻³	3.108
Água	218.00	1000	1.55 ⁽²⁾	€/m ³	1.55*10 ⁻³	0.338
TOTAL						38.670

⁽¹⁾Valor médio obtido através orçamentos requeridos a fornecedores.

⁽²⁾Valor fornecido pela empresa Vimágua.

Quadro 50 - Conclusão sumária entre os betões I, III, IV

Custo (€/m ³)		Comparação (€/m ³ ; %)					
		Betão I vs Betão III		Betão I vs Betão IV		Betão III vs Betão IV	
Betão I	46.746	5.96	-12.75%	8.08	-17.28%	2.12	-5.19%
Betão III	40.788						
Betão IV	38.670						

Então, conclui-se que o betão III pode alcançar uma poupança de aproximadamente 6 euros por cada metro cúbico de betão, o que equivale a uma redução de cerca de 12.75%, quando comparado com o betão I.

No caso do betão IV, pode atingir um benefício de aproximadamente 8 euros por metro cúbico de betão, reduzindo assim, 17.28%, quando comparado com o betão I.

Comparando os dois betões que contêm cinzas volantes, pode indicar-se que o betão IV apresenta uma maior poupança. Mas é conveniente lembrar que, este último apresenta uma resistência ligeiramente inferior, quando comparado com o betão III.

Por último, convém referir que as cinzas volantes, apesar de serem consideradas um subproduto, já apresentam um preço bastante elevado, principalmente se as comparamos com os preços de outros produtos, nomeadamente os agregados. Por conseguinte, os benefícios económicos alcançados, com a introdução das cinzas volantes em betões, não são assim tão satisfatórios.

8. Estudios Futuros

Face aos resultados obtidos após o desenvolvimento desta investigação, é possível identificar alguns estudos posteriores que por sua vez podem proporcionar uma maior fidelidade aos resultados já alcançados.

O primeiro estudo que sugiro passaria por comprovar com maior exatidão até que ponto se pode utilizar a metodologia ACI para obter betões que contenham cinzas volantes. Isto é, este estudo comprovou que é possível obter um betão com uma classe de resistência C 25/30 contendo no máximo 20% de cinzas volantes, a questão que se coloca neste momento será entender se é possível obter betões com classes de resistência superiores mantendo a mesma percentagem de cinzas volantes.

Além do mais comprovou-se que ao aumentar a percentagem de cinzas volantes a classe de resistência do betão baixa para a classe imediatamente inferior, mantendo-se nessa mesma classe se no máximo se substituir 40% de cinzas volantes por cimento. Na prática pode-se utilizar o método ACI para obter betões com uma percentagem entre 20% a 40% de cinzas volantes mas, inicialmente será necessário estudar uma composição que teria como objetivo alcançar uma classe de resistência imediatamente superior, no fundo se pretender obter um betão C25/30 com 40% de cinzas volantes, será necessário iniciar o estudo da composição tendo como objetivo alcançar um betão C30/37. Logo a questão mais pertinente será perceber o que acontecerá se aumentar ainda mais a percentagem de cinzas volantes, muito provavelmente a classe de resistência voltará a baixar, a questão principal passa por entender em que percentagem essa mesma classe volta a baixar.

Uma questão que pode surgir após os estudos recomendados anteriormente passa por saber qual o benefício económico que se pode alcançar ao aumentar a percentagem de cinzas volantes em detrimento do cimento.

É possível ainda sugerir que se faça um levantamento mais exaustivo do preço das cinzas volantes, saber se os 25 euros por tonelada se mantêm para todo o território nacional ou se existe uma variação muito acentuada, olhando mais concretamente para zonas do país mais recônditas, nomeadamente as ilhas da Madeira e dos Açores. Para além desta questão, também será interessante

prever que variação pode atingir o preço das cinzas volantes ao longo do tempo.

Por último, este estudo focalizou-se num só tipo de adição (cinzas volantes), a questão pertinente que se pode colocar passa por saber se é possível realizar um estudo que identifique uma percentagem ótima que substitua parte do cimento e seu benefício económico, mas agora escolhendo um outro tipo de adição, como por exemplo sílica de fumo, escória de alto-forno ou ainda cinzas de casca de arroz.

9. Conclusão

No início desta investigação surgiram algumas incógnitas sobre determinados assuntos relacionados com o tema. O facto do método de composição de betões proposto pelo American Concrete Institute não contemplar a introdução de adições na composição final do betão foi a primeira dessas questões de investigação a surgirem.

Isso deve-se ao facto do método ACI, à semelhança de qualquer outro método que estuda as composições de betões, terem sido desenvolvidos ainda numa fase em que betão era pouco mais do que a mistura de agregados, cimento e água. Por isso, a sua aplicação não é fácil ou direta quando na mistura são contemplados a introdução de adições ou adjuvantes. A verdade é que nesta investigação a metodologia ACI foi adaptada por forma a contemplar a inclusão de adições, neste caso cinzas volantes, no final pode-se concluir que essa adaptação foi positiva.

Outra questão de investigação era determinar qual a percentagem máxima de cimento que se pode substituir por cinzas volantes sem que a classe de resistência do betão se altere. Chega-se á conclusão que essa percentagem corresponde a 20% do cimento. Se aumentarmos esta percentagem a classe de resistência do betão baixa para a classe imediatamente inferior, permanecendo nesta se no máximo substituímos 40% do cimento por cinzas volantes.

No final a comparação económica foi realizada entre betões que alcançaram a mesma classe de resistência, chegando à conclusão que o betão com 20% de cinzas volantes pode trazer um benefício económico de cerca de 6 euros por metro cúbico, o que corresponde a uma redução igual a 12,75% quando comparado com o betão de referência (100% cimento). Já o betão que continha 40% de cinzas volantes, alcança um benefício igual a 8 euros por metro cúbico, o que corresponde a uma redução igual a 17,28% quando comparado com o betão de referência, o benefício só não é superior porque para substituir uma percentagem tão elevada de cimento mantendo a mesma classe de resistência será necessário aumentar à quantidade global de ligante.

Este trabalho conseguiu portanto responder às várias incógnitas que surgiram no desenrolar do mesmo, atingindo assim os objetivos inicialmente propostos.

10. Referências Bibliográficas

- [1] - Camões, A., Betões de elevado desempenho, Materiais de Construção Eco Eficientes, Guimarães, 2011
- [2] - ACI, 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, in ACI Committee 211 Report, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1991 reapproved in 2002
- [3] – EIA (International Energy Agency), The world energy outlook 2013, a view to 2040, Paris
- [4] - Roodman, D. M.; Lenssen N. – “A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns are Transforming Construction”. Worldwatch Paper 124, Worldwatch Institute, Washington, DC, March, 1995.
- [5] - DGE – “Balanço Energético Nacional de 2000”. Direcção Geral da Energia, Lisboa, 2000.
- [6] - Freitas, N. M. L. C, Estudos de composição de betões baseados em tabelas, Universidade do Minho, Guimarães, 2010
- [7] - Price, W.H., The practical qualities of cement, ACI journal, proceedings, 71, 436-444, 1974
- [8] - Tennis, P.D., Portland cement characteristics – Concrete technology today, Portland cement association, 20 (2), 1-3, 1998
- [9] - ACI, E3-01: Cementitious Materials for Concrete, in E-701 Committee Report, American Concrete Institute, Detroit, MI, 2001
- [10] - IPQ, NP EN 197-1: Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 2001
- [11] - ACI, 225R-99: Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements, in ACI 225 Committee Report, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1999 reapproved 2009
- [12] - IPQ, NP EN 196: Métodos de ensaio de cimentos. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2006
- [13] - Aguiar, J.B., Materiais de Construção I, Apontamentos, Guimarães, 2005

- [14] - IPQ, NP EN 12620: Agregados para betão. 2004, Instituto Português da Qualidade (IPQ), substituída pela EN 12620-2002+A1:2008
- [15] - ACI, E1-07: Aggregates for Concrete, in E-701 Committee Report, American Concrete Institute, Detroit, MI, 2007
- [16] - IPQ, NP EN 1008:Água de amassadura para betão. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003
- [17] - Gonçalves, R. P.L., Normalização do betão, Universidade do Minho, Guimarães, 2006
- [18] - IPQ, NP EN 206-1:Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2007
- [19] - LNEC, Especificação E 374 – Adjuvantes para argamassas e betões. Laboratório nacional de engenharia civil, Lisboa, 1993
- [20] - IPQ, NP EN 934-2: Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2:Adjuvantes para betão, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003
- [21] – IPQ, NP EN 13670-1: Execução de estruturas em betão – Parte 1: Regras gerais. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 2008
- [22] – Ferreira, R. M., Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Universidade do Minho, Guimarães, 2000
- [23] – Fernandes, P. A. L., Vigas de grande vão pré-fabricadas em betão de alta resistência pré-esforçado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2005
- [24] - Aguiar, B., Materiais de Construção II, Universidade do Minho, Guimarães, 2009
- [25] – Pereira, H. S. e Martins J. G., Materiais de construção I, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2011
- [26] – Cunha, P. J. P., Controlo da conformidade da resistência à compressão de betões, Universidade do Minho, Guimarães, 2001
- [27] – Coutinho, A.S. e Gonçalves, A., Fabrico e propriedades do betão, Laboratório nacional de engenharia civil, Lisboa, 1997

- [28] - Coutinho, J. S., Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem, Tese de doutoramento, FEUP, 1998
- [29] - ASTM, C136 - Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International, 2006
- [30] - ASTM, C29/C29M - Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. ASTM International, 2003
- [31] - ASTM C192/C192M - Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, 2007
- [32] – IPQ, NP EN 197-1: Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2001
- [33] – LNEC, NP EN 450-1: 2005+A1:2008. Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LENCC), 2013
- [34] – Coutinho, A. S., Fabrico e propriedades do betão, Volume I, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988
- [35] – IPQ, NP EN 1097: Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002
- [36] – LNEC, Especificação E 372 – Água de amassadura para betões. Laboratório nacional de engenharia civil, Lisboa, 1993
- [37] – LNEC, Especificação E 464 – Betões. Metodologia perspectiva para uma vida útil de projeto de 50 e 100 anos face às ações ambientais. Laboratório nacional de engenharia civil, Lisboa, 2005
- [38] – IPQ, NP EN 12390: Ensaios do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003
- [39] – IPQ, NP EN 12350: Ensaios do betão fresco – Parte 2: Ensaio de abaixamento. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002

11. Anexos

Fichas técnicas – cinzas volantes



Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. Brasil, 101
P - 1700 - 066 Lisboa
PORTUGAL

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE CE

0856 - CPD - 0402

De acordo com a Directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988 do Conselho das Comunidades Europeias relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos da construção (Directiva dos Produtos da Construção - CPD), alterada pela Directiva 93/68/CEE do Conselho das Comunidades Europeias de 22 de Julho de 1993, declara-se que o produto da construção

Cinza volante para betão

categoria de finura: N, valor declarado de finura: 18%, categoria de Perda ao fogo: B,
densidade das partículas: 2300 kg/m³

colocado no mercado por

EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A.
Av. José Malhoa, Lote A13, 1070-157 Lisboa

e produzido na fábrica

Centro de Produção de Sines

é submetido pelo fabricante a um controlo da produção na fábrica e a ensaios complementares de amostras colhidas na fábrica de acordo com um plano de ensaios pre-estabelecido, e que o organismo notificado Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) realizou os ensaios iniciais de tipo para as características relevantes do produto, uma auditoria inicial à fábrica e ao controlo da produção, e efectua o acompanhamento contínuo, a avaliação e a aprovação do controlo da produção na fábrica e o ensaio de amostras colhidas na fábrica, no mercado ou no local da obra.

Este certificado atesta que todas as provisões referentes à comprovação da conformidade e ao desempenho do produto descritas no Anexo ZA da Norma

NP EN 450-1:2006

foram consideradas e que o produto está conforme com os requisitos especificados.

Este certificado foi emitido pela primeira vez em 15 de Junho de 2007 e mantém-se válido desde que não se alterem significativamente as condições definidas na especificação técnica harmonizada ou as condições de fabrico e do controlo da produção na fábrica.

Lisboa, 15 de Junho de 2007

Artindo Gonçalves
Responsável técnico

Carlos Matias Ramos
Presidente do LNEC



DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE

Cinza volante para betão

Conforme com o Anexo ZA da Norma NP EN 450-1:2006

De acordo com a Directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988 do Conselho das Comunidades Europeias relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos de construção (Directiva dos Produtos de Construção - CPD), alterada pela Directiva 93/68/CEE do Conselho das Comunidades Europeias de 22 de Julho de 1993, o Centro de Produção Sines da EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A., Apartado 46 - São Torpes, 7520-089 Sines, declara que o produto de construção

cinza volante para betão

categoria de finura: N, valor declarado de finura: 16%, categoria de perda ao fogo: B,
massa volúmica: 2300Kg/m³

produzido no

Centro de Produção Sines

satisfaz as especificações da Norma NP EN 450-1:2006 e possui o certificado de conformidade CE

0856-CPD-0402

emitido pelo Organismo Notificado - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC),
Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa.

Sines, 27 de Junho de 2007

Jorge Firmino do Carmo

Director do Centro de Produção Sines

1. Objectivo

O objectivo desta especificação é enunciar os valores característicos de cinza e os valores alvo ou de alerta para os ensaios de controlo interno e de auto-controlo.

2. Valores Característicos e Critérios Aplicáveis

Características	Valor Característico	Limites para Valores Individuais	Valor Declarado	Critérios de Conformidade Aplicáveis	Obs.
Perda ao Fogo	2% - 7%	< 9%	-	1)	Nota 1,2
Finura	≤ 40% e VD ± 10%	< 45% e VD ± 15%	N, 20%	2)	
Óxido Cálcio Livre	≤ 2,5%	< 2,6%	-	3)	Nota 1
Óxido Cálcio Total	< 10%	-	-	4)	Nota 1,2
Cloretos	≤ 0,10%	< 0,10%	-	3)	Nota 1
Sulfatos	≤ 3%	< 3,5%	-	3)	Nota 1
Massa Volúmica	± 200Kg/m ³ do VD	± 225Kg/m ³ do VD	2300Kg/m ³	4)	Nota 2
Índice de Actividade:					
28 dias	> 75%	< 70%	-	5)	
90 dias	> 85%	< 80%	-		
Expansibilidade (se CaO livre > 1,0%)	< 10 mm	< 10 mm	-	3)	

Nota 1: A composição química em proporção da massa de cinza seca.

Nota 2: Os métodos de ensaio são os referidos no plano de auto-controlo – cinzas volantes.

Critérios de Conformidade Aplicáveis

- 1) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por variáveis, durante o período de referência. Por aplicação $X - K\alpha s \geq L$ e $X + K\alpha s \leq U$, $U = 7\%$ e $L = 2\%$ (ponto 8.2.2 da EN 450-1).
- 2) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por variáveis, durante o período de referência. Por aplicação $X - K\alpha s \leq U$ ($U = 40\%$ e $\pm 10\%$ VD).
- 3) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação $CD \leq CA$; $CD = N.º$ de resultados de ensaio com valores superiores ao característico; $CA = N.º$ aceitável de resultados acima do valor característico num determinado período de referência para um determinado número de resultados (ponto 8.2.3 da EN 450-1).
- 4) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação $CD \leq CA$ ($CD = N.º$ de resultados de ensaio com valores superiores ou inferiores a ± 200 Kg/m³ do valor declarado; $CA = N.º$ aceitável de resultados abaixo do limite inferior ou acima do limite superior num determinado período de referência para um determinado número de resultados (ponto 8.2.3 da EN 450-1).
- 5) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação $CD \leq CA$; $CD = N.º$ de resultados de ensaio com valores superiores ao característico (28 dias e 90 dias); $CA = N.º$ aceitável de resultados com valor superior ao característico num determinado período de referência para um determinado número de resultados).

Revisão	Data	Elaborado	Aprovado
A	2006-07-27	Maria José Vales	Jorge do Carmo (em documento SGD)

3. Valores Alvo e Acções a Desenvolver

Características	Valores Alvo Individuais (auto-controlo)	Acção	Valores Alvo Individuais (controlo interno)	Acção
Perda ao Fogo	0 % - 2 %	2)	Linha ou média das linhas < 6,5% Linha ou média das linhas > 6,5%	1) 4)
	2,5% - 6,5%	1)		
	6,5% - 8,5%	2)		
	> 9% *	3)		
Finura	10% - 40%	1)	/	
	35% - 40%	2)		
	> 45 % e VD ± 15% *	3)		
Óxido Cálcio Livre	< 2 %	1)	/	
	2 % - 2,5%	2)		
	> 2,6% *	3)		
Óxido Cálcio Total	< 9,5 %	1)	/	
	9,5% - 10%	2)		
	> 10%	3)		
Cloretos	< 0,9 %	1)	/	
	0,9% - 0,10%	2)		
	> 0,10% *	3)		
Sulfatos	< 2,5 %	1)	/	
	2,5% - 3%	2)		
	> 3,5% *	3)		
Massa Volúmica	2100 - 2525 Kg/m ³	1)	/	
	2450 - 2500 Kg/m ³	2)		
	VD ± 225 Kg/m ³ *	3)		
Índice de Actividade:	28 dias	> 75%	1)	/
		70% - 75%	2)	
		< 70 %*	3)	
	90 dias	> 85%	1)	
		80% - 85%	2)	
		< 80 %*	3)	
Expansibilidade (se CaO livre > 1,0%)	< 9,5 mm	1)	/	
	9,5 - mm	2)		
	> 10 mm *	3)		

* - limite imposto pela EN 450-1

Revisão

Data

A

2006-07-27

Acção:

- 1) Resultados individuais considerados sem reacção correctiva.
- 2) Resultados individuais que darão alerta para possível correcção ou acção correctiva. Deverá ser neste caso, avisado o Coordenador do Grupo de Actividades Carvões e Cinzas do respectivo resultado e emitida uma Nota de Desvio.
- 3) Resultados individuais que ultrapassam o valor da norma, que levarão à emissão de Nota de Desvio.
- 4) Resultados individuais que serão tratados de acordo com o Procedimento PL.35.0200.PTSN.

Revisão

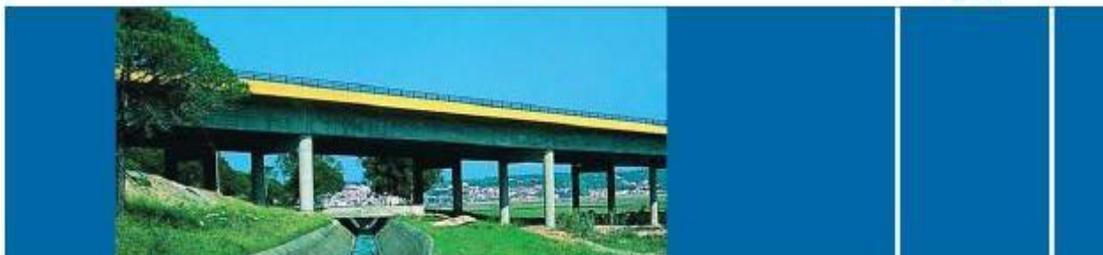
Data

A

2006-07-27

Fichas técnicas: cimento portland 42.5R

CEM I 42,5R
Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.

Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

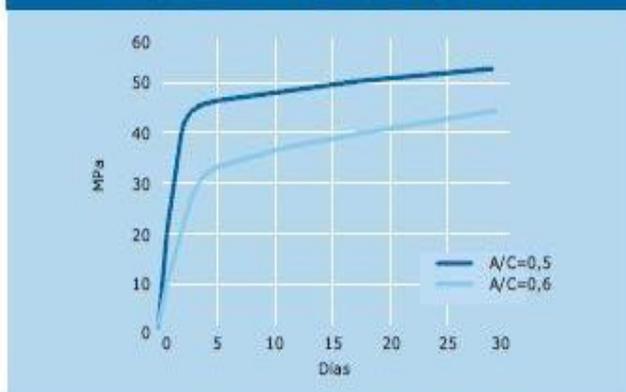
Características Mecânicas

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

Características Físicas

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

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2
Ponte de Alcácer do Sal



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 - Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 - Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 - Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 - Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 - Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 - Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt

Fichas técnicas – agregado grosso (6/12)



0866

Britaminho-Granitos e britas do Minho, Lda.
Rua 10 de Junho, 130
4800-435 Gonça-Guimarães

08

0866-CPD- 0088

PRODUTO: Agregado 6/12 **ORIGEM:** Pedreira "Sorte do Mato das Lagedas"

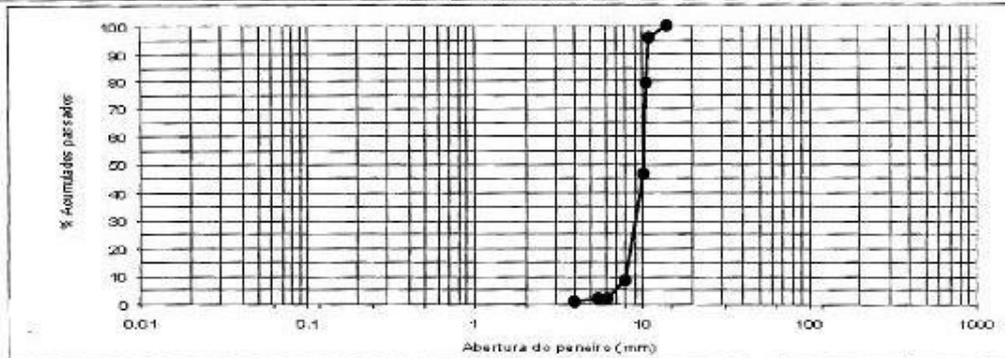
Utilização	NP EN 12620 - Agregados para betão
	NP EN 13043 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais em estradas, aeroportos e outras áreas sujeitas à acção de tráfego
	NP EN 13242 - Agregados para materiais granulares não tratados e para materiais com ligantes hidráulicos para utilização em trabalhos de engenharia civil e construção de estradas

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO			
NORMA	NP EN 12620	NP EN 13043	NP EN 13242
Dimensão nominal (d/D)	6/12		
Granulometria	Gr85/20	Gr90/10	Gr85-15
Índice de achatamento	FI15		
Índice de forma	SI20		
Teor de finos	f1,5	f0,5	f2
Resistência à fragmentação	IA35		
Resistência ao desgaste	MOE15		MOE20
Coefficiente de polimento acelerado	PSV56	PSV56	NA
Massa Volúmica:			
- Material impermeável	2,66 Mg/m ³		
- Partículas secas em estufa	2,63 Mg/m ³		
- Partículas saturadas	2,64 Mg/m ³		
- Absorção de água	W0,5		0,5 %
Afinidade entre agregado e betume	NA	6 %	NA
Teor de cloretos	0,0 %	NA	
Teor de húmus #	Mais clara	NA	Mais clara
Contaminantes orgânicos leves	LPC0,0	NA	
Descrição Petrográfica	<p>Estrutura: Compacta Textura: Holocristalina, fanerítica, de grão médio, com tendência porfiróide Alteração: S1 e pouco alterada (W1-2) Superfície: Aparente Porosidade: baixa Forma: anisotrópica Anisotropia: isotrópica Vesicularidade: Não presente Outras propriedades verificadas: Cor cinza claro. Predominância da feldite. Aparente fenocrístais de feldspato Minerais presentes e respectivas dimensões: Quartzo (1 a 5 mm), feldspatos (1,5 a 18 mm), micas (0,5 a 2 mm) e outros. As percentagens aproximadas são 45%, 45%, 9%, 1% respectivamente. Modo de jazida: Rochito e/ou leucito Idade geológica: Hercínica Classificação geológica: Rocha ígnea plutónica - Granito</p>		

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA			
Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
125			
80			
63			
50			
45			
40			
31,5			
25	100		
22,4			
20			
16	100	98	100
14	100		100
12,5	95	85	95
11,2	79		
10	46		
8	14		
6,3	6	0	10
5,6			
5			
4	1	0	2
2	1		
1	1		
0,5	1		
0,25	1		
0,125	1		
0,063	1		

NA - Não aplicável
 DND - Desempenho não determinado
 (a) Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus

CURVA GRANULOMÉTRICA



DATA : 24/11/2008

ASSINATURA: 

Fichas técnicas – agregado fino (0/4)



0866

Britaminho-Granitos e britas do Minho, Lda.
Rua 10 de Junho, 130
4800-435 Gonça-Gulmarães

08

0866-CPD- 0088

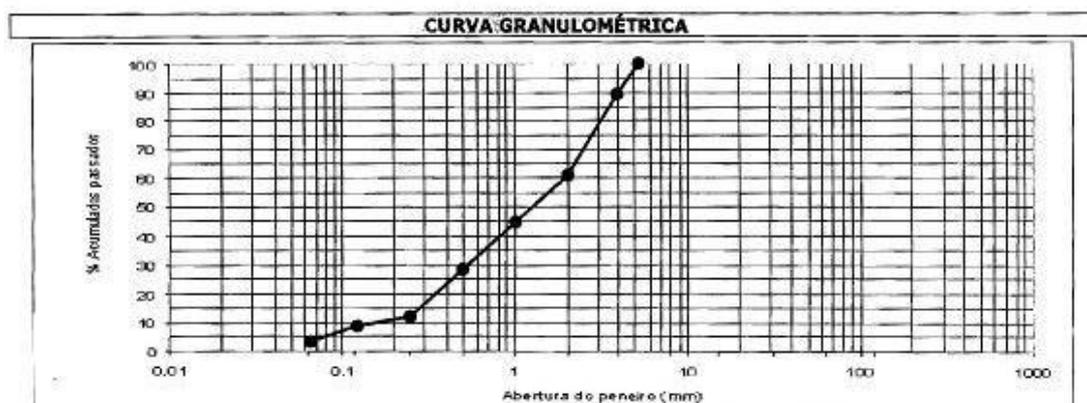
PRODUTO: Areia 0/4 **ORIGEM:** Pedreira "Sorte do Mato das Lagedas"

Utilização: NP EN 12620 - Agregados para betão
NP EN 13139 - Agregados para argamassa
NP EN 13043 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais em estradas, aeroportos e outras áreas sujeitas à ação de tráfego
NP EN 13242 - Agregados para materiais granulares não tratados e para materiais com ligantes hidráulicos para utilização em trabalhos de engenharia civil e construção de estradas

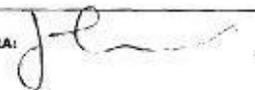
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO				
NORMA	NP EN 12620	NP EN 13139	NP EN 13043	NP EN 13242
Dimensão nominal (d/D)	0/4			
Granulometria	Gr85	0/4	GA85	Gr85
Teor de finos	f3	Categoria 1	NA	f3
Equivalente de Areia	SFaz		NA	SE82
Azul de Metileno	MB0.3		NA	MB0.3
Massa Volúmica:				
- Material impermeável	2,67			
- Partículas secas em estufa	2,66			
- Partículas saturadas	2,67			
- Absorção de água	W0.0	0.0 %	W0.0	0.0 %
Teor de cloretos	0.0 %		NA	
Teor de húmus ^a	Mais clara		NA	Mais clara
Contaminantes orgânicos leves	LPC0.0		MLPC0.1	NA
Descrição Petrográfica	<p>Estrutura: Compacta Textura: Holocristalina, fanerítica, de grão médio, com tendência porfiróide Alteração: S8 a pouco alterada (W1-2) Superfície: Áspera Porosidade: baixa Forma: angulosa Anisotropia: Isotrópica Vesicularidade: Não apresenta Outras propriedades verificadas: Cor cinza claro. Predominância da biotite. Apresenta fenocristais de feldspato Minerais presentes e respectivas dimensões: Quartzo (1 a 5 mm), feldspatos (1.5 a 18 mm), micas (0.5 a 2 mm) e outros. As percentagens aproximadas são 45%, 45%, 9%, 1% respectivamente. Modo de jazida: Batólito e/ou lacólito Idade geológica: Hercínica Classificação geológica: Rocha ígnea plutónica - Granito</p>			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA			
Peneira (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
125			
80			
63			
50			
45			
40			
31.5			
25			
2.4			
20			
16			
14			
12.5			
11.2			
10			
8	100	100	100
6.3			
5.6	99	98	100
5			
4	91	85	99
2	66		
1	48		
0.5	33		
0.25	20		
0.125	10		
0.063	3		

NA - Não aplicável
DND - Desempenho não determinado
(a) Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus



DATA : 24/11/2008

ASSINATURA: 

Ficha com tarifário fornecido pela empresa Vimágua.

clientes
empresa
qualidade
gestão
ambiente

Destaques



Parque de Resíduos
Vimágua

Portal dos contratos públicos



Horário de Atendimento

Guimarães
9.00h às 16.30h

Vizela
9.30h às 12.30h
13.30h às 16.00h

Tel.: 253 439 560
Fax: 253 410 444
Email: vimagua@vimagua.pt

Contratos Contadores Ramais Sistema Predial/Público **Tarifário** Faturação

Tarifários Especiais

Tarifário

A vigorar desde janeiro de 2013

I. Serviço de abastecimento de água

I.1 - TARIFA VARIÁVEL - POR M³

Utilizadores domésticos:

1.º Escalão: até 5 m ³	€0,4800
2.º Escalão: superior a 5 e até 15 m ³	€0,9120
3.º Escalão: superior a 15 e até 25 m ³	€1,4591
4.º Escalão: superior a 25 m ³	€2,1887

Utilizadores não domésticos:

€1,4591

Tarifário social ⁽¹⁾:

1.º Escalão: até 15 m ³	€0,4800
3.º Escalão: superior a 15 e até 25 m ³	€1,4591
4.º Escalão: superior a 25 m ³	€2,1887

Tarifário familiar ⁽¹⁾:

1.º Escalão: até 15 m ³	€0,4800
2.º Escalão: superior a 15 e até 35 m ³	€0,9120
3.º Escalão: superior a 35 m ³	€2,1887

A estes valores acresce o I.V.A. à taxa de 6%

I.2 - TARIFA FIXA – VALOR MENSAL (30 DIAS)

Utilizadores domésticos:

1.º Nível: <25 mm	€3,6197
2.º Nível: ≥25 mm	€5,4296

Utilizadores não domésticos:

1.º Nível: até 20 mm	€5,4296
2.º Nível: superior a 20 mm e até 30 mm	€8,1444
3.º Nível: superior a 30 mm e até 50 mm	€12,2166
4.º Nível: superior a 50 mm e até 100 mm	€18,3249
5.º Nível: superior a 100 mm e até 300 mm	€27,4873

Tarifário social ⁽¹⁾ (utilizadores domésticos):

1.º Nível: <25 mm	€2,8958
2.º Nível: ≥25 mm	€4,3437

A estes valores acresce o I.V.A. à taxa de 6%

pesquisar...

Reclamações/Sugestões

Perguntas
Frequentes

Regulamento
Ficheiro PDF

Balcão
Digital

Fatura
Eletrónica

Leitura
de Contadores
Linha Verde 800 200 646