

Betão de Elevada Resistência

Micael M. G. Inácio

RELATÓRIO 1

HiCon - Uso Racional de Betão de Elevada Resistência em Estruturas de Laje Fungiforme Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas

(EXPL/EC M-EST/1371/2013)

Julho de 2014

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA	2
2.1. O BETÃO	2
2.2. O BETÃO DE ELEVADA RESISTÊNCIA	4
3. DEFINIÇÃO DE BETÃO DE ELEVADA RESISTÊNCIA	6
4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS BERS	6
5. UTILIZAÇÃO DE BER NA CONSTRUÇÃO	8
6. COMPOSIÇÃO DE BETÕES	11
6.1. CONCEITOS GERAIS.....	12
6.1.1. <i>Expressão fundamental da composição do betão</i>	12
6.1.2. <i>Máxima dimensão dos agregados</i>	13
6.1.3. <i>Efeito de parede e efeito de peneiração</i>	14
6.1.4. <i>Trabalhabilidade ou consistência</i>	15
6.2. MATERIAIS CONSTITUINTES.....	16
6.2.1. <i>Cimento</i>	16
6.2.2. <i>Adições</i>	18
6.2.3. <i>Agregados</i>	20
6.2.4. <i>Água</i>	22
6.2.5. <i>Adjuvantes</i>	23
6.3. FORMULAÇÃO	23
6.3.1. <i>Compacidade</i>	24
6.3.2. <i>Quantificação da pasta ligante</i>	25
6.3.3. <i>Quantificação dos agregados</i>	26
6.3.4. <i>Formulação de BER</i>	29
7. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO DE ELEVADA RESISTÊNCIA	30
7.1. MATERIAIS SELECIONADOS	30
7.2. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	35
8. CONCLUSÃO	39
9. AGRADECIMENTOS	40
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – O barco de Lambot de 1848 [11].	3
Figura 2 – Mid-Continental Plaza (a) e Water Tower Place (b) são exemplos de edifícios construídos em BER.....	5
Figura 3 – Edifício T&C em Taiwan, considerado o mais alto da cidade, em 1997 [32].	9
Figura 4 – <i>Trump Tower</i> em Chicago, com 423 m de altura [33].....	9
Figura 5 – Burj Khalifa no Dubai é considerado edifício em betão armado mais alto do mundo [34].....	10
Figura 6 – Ponte Vasco da Gama [31].....	11
Figura 7 – Edifício do Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego do Porto de Lisboa	11
Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados grossos de basalto de Rio Maior (a) e Vialonga (b).	34
Figura 9 – Curvas granulométricas dos agregados grossos de granodiorito (a) e das areias (b).....	35
Figura 10 – Agregados introduzidos (a) e após mistura dos agregados (b).....	36
Figura 11 – Após introdução do superplastificante (a) e aspeto final do betão (b).	36
Figura 12 – Curvas granulométricas das composições C1 e C4 (a) e C2 (b).....	38
Figura 13 – Curvas granulométricas das composições C3 e C5.	38
Figura 14 – Equipamento utilizado na lavagem dos agregados grossos (a) e agregados de basalto depois de lavados e secos (b).....	39

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos componentes do clínquer Portland de acordo com a E378.	17
Quadro 2 – Valores de K para a utilização da expressão do índice de vazios [37].	25
Quadro 3 – Valores de K' para a utilização da expressão do índice de vazios [37].	25
Quadro 4 – Volume de vazios do betão compactado em função da dimensão máxima dos agregados [36].	26
Quadro 5 – Parâmetro A da curva granulométrica de Faury [37].	28
Quadro 6 – Parâmetro B da curva granulométrica de Faury [37].	28
Quadro 7 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.	31
Quadro 8 – Principais características da sílica de fumo Sikacrete HD.	32
Quadro 9 – Principais características do superplastificante Sika ViscoCrete 20 HE.	33
Quadro 10 – Propriedades físicas dos agregados selecionados.	33
Quadro 11 – Análise granulométrica dos agregados selecionados.	34
Quadro 12 – Composições experimentais estudadas.	36

1. INTRODUÇÃO

O betão pode ser definido como um material compósito, constituído por uma mistura proporcionada de agregados, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes e/ou adições, de forma a conferir as características nos estados fresco e endurecido, que lhe permita servir como material de construção [1].

Este material é amplamente usado em todo o mundo para a construção de estruturas para os mais variados fins, desde edifícios residenciais, comerciais ou de serviços a obras de arte, reservatórios e vias de comunicação. Estima-se que anualmente são produzidos cerca de 25 mil milhões de toneladas de betão. Em termos mundiais, a quantidade utilizada deste material na construção civil representa mais do dobro da quantidade de todos os outros materiais, incluindo a madeira, o aço, o plástico e o alumínio [2].

A extensa utilização de betão está relacionada com algumas das suas características, que se consideram mais vantajosas, comparativamente às dos outros materiais de construção. O custo de produção de betão é menor do que o dos outros materiais usados na construção. O facto dos seus três maiores componentes, que são a água, os agregados e o cimento, se encontrarem disponíveis em praticamente qualquer parte do mundo, faz do betão um material que pode ser produzido em qualquer lugar, com menores custos de transporte associados, resultando num material mais barato quando comparado ao aço e aos polímeros [3].

A facilidade de fabricar peças com diferentes formas e dimensões, associada à sua compatibilidade com o aço, devido aos coeficientes de dilatação térmica do betão e do aço serem similares (aproximadamente $1,0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ no betão e $1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ no aço), concede ao betão a versatilidade indispensável para a construção de estruturas destinadas a diferentes fins [3]. Além disso, devido à sua natureza alcalina, o aço envolvido por este material encontra-se protegido da corrosão. A elevada alcalinidade do betão promove a formação de uma camada passivante de óxidos de Fe_2O_3 sobre a superfície da armadura, fazendo que o aço preserve as suas propriedades originais indefinidamente, desde que o betão mantenha as suas características físicas e químicas inalteradas [4].

Outras características vantajosas são associadas à utilização de betão, tais como, a excelente resistência à água, a boa resistência ao fogo, a baixa necessidade de trabalhos de manutenção e o baixo consumo energético do processo de fabrico deste material [5]–[8]. O valor estimado para o consumo energético imputado à produção de betão simples é de cerca de 1,4 GJ/ton e de 2,5 GJ/ton no caso do betão armado, valores bastante inferiores ao consumo energético atribuído à produção do aço estrutural que é de cerca de 30 GJ/ton [9], [10].

A utilização de betão como material estrutural tem, contudo, algumas limitações, descrevendo-se de seguida as principais [3], [5], [6], [8]:

- o betão é um material frágil, com baixa resistência à tração, na ordem dos 10% da sua resistência à compressão, levando à necessidade de introduzir armaduras para resistir aos esforços de tração e aumentar a ductilidade;
- a necessidade de utilizar cofragens para moldar o betão e para suportar o seu peso próprio até este atingir endurecer o suficiente para conseguir suportar o seu peso próprio. O custo das cofragens pode ser relativamente elevado, sendo que nos Estados Unidos da América o custo da cofragem dos trabalhos associados é aproximadamente 50% do custo final da estrutura em betão armado;
- a baixa resistência por unidade de peso e volume contribuem para estruturas mais pesadas e volumosas. Estes fatores são mais importantes em estruturas de grande vão e/ou grande altura, onde o peso próprio tem uma grande contribuição para os esforços;
- as propriedades do betão podem variar muito em função da sua composição e técnicas de mistura. Além disso, o controlo de qualidade das operações de fabrico, de colocação e de cura do betão é de difícil realização.

2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

2.1. O betão

De acordo com Sousa Coutinho [1], a utilização mais antiga de betão data de 5600 a.C. e trata-se de um pavimento térreo de uma habitação nas margens do rio Danúbio, em Lepenski Vir, na Jugoslávia, em que foi usada cal parda como ligante.

O uso deste material constituído pela mistura de pedras, areia, cal e água estendeu-se a toda a zona mediterrânica, de tal forma que os romanos o empregaram com mestria na construção de grandes obras públicas, como aquedutos, pontes, cais, molhes, templos, grandes edifícios e outras grandes obras maciças que eram, geralmente, revestidas por alvenaria de tijolo ou de pedra [1]. Muitas das grandes obras construídas pelos romanos chegaram aos nossos dias, tais como o Panteão de Roma, o Aqueduto da Pont du Gard em Nimes, a Ponte de Vila Formosa na N369 e a Ponte de Trajano sobre o rio Tâmega em Chaves [11]. A cúpula do Panteão de Roma, cuja construção terminou em 127 d.C., tem um vão de 50 m, valor que não foi excedido até ao século XIX. Na parte mais baixa da cúpula foram usados tijolos partidos como agregado grosso enquanto na parte superior usaram pedra-pomes como agregado grosso de forma a baixar o peso próprio do betão e conseqüentemente os esforços de flexão devido às cargas permanentes [6].

Segundo Sousa Coutinho [1], Louis Vicat deu um grande contributo para a tecnologia da produção do cimento, quando iniciou em 1812 o estudo da hidraulicidade das cais. Cinco anos mais tarde, publicou um trabalho onde mostrou que a cozedura conjunta de calcário e argila conduzia à obtenção de cimento. Em 1824, foi aprovada a patente de fabricação do cimento artificial por um processo semelhante ao de Louis Vicat, mas com emprego de temperatura de cozedura mais elevada, o que permitiria a obtenção do silicato tricálcico e consequentemente resistências mais elevadas [1], [5], [10], [11]. A atribuição do nome Portland deveu-se à sua semelhança com as rochas da Ilha de Portland.

O uso do cimento Portland cresceu rapidamente por toda a Europa, devido sobretudo ao filho de Aspdin, William, e América do Norte [10]. No entanto, o impulso decisivo para a expansão do betão foi dado em 1848 por Joseph-Louis Lambot, ao construir um barco com a introdução de uma malha de armadura ortogonal, reconhecido como a obra mais antiga em betão armado ainda existente. Este barco foi posto a navegar em 1849 e apresentado na Exposição Universal de Paris de 1855 (Figura 1) [11]. Em 1855, Lambot submeteu uma patente que incluía a utilização de varões de aço na construção de vigas e pilares [10].

Em 1890, o betão armado iniciou uma enorme expansão impulsionada pelo surgimento das primeiras leis da resistência do betão armado, estabelecidas por Coignet, Considère, Rabut e Mesnager depois dos seus estudos experimentais e teóricos [1], [11]. A primeira disciplina de betão armado foi criada em 1897 na ENPC – École National des Ponts et Chaussées, Paris [11].

Segundo Coutinho [1], a produção de cimento Portland em Portugal iniciou-se em 1894, na fábrica de cimento situada em Alhandra. As primeiras obras de betão armado em Portugal têm início em 1986, na reconstrução da antiga Fábrica de Moagem de Trigo, no Caramujo. Em 1898 iniciou-se a construção do pavimento da sala dos atos da Escola Médica de Lisboa [1], [11].



Figura 1 – O barco de Lambot de 1848 [11].

2.2. O betão de elevada resistência

O interesse no estudo de betões de resistência à compressão mais elevada surge nos anos 60 do século XX, devido à necessidade de construir em altura, originada principalmente pela elevada ocupação e respetiva valorização de espaços para construir nas grandes cidades. O aumento da altura dos edifícios e consequente aumento das cargas aplicadas aos pilares levou à necessidade de aumentar a resistência à compressão dos mesmos. Até então as estruturas eram dimensionadas considerando um betão com resistência à compressão na ordem dos 15 a 20 MPa, sendo na altura considerado um material económico, seguro e bem conhecido [12], [13].

Foi em Chicago que se deu um importante impulso para o estudo de betões de resistência mais elevada, com vista à aplicação em edifícios altos, quando um engenheiro de estruturas e uma empresa de fabricação de betão começaram a trabalhar juntos. A ideia passou por pedir autorização aos proprietários de edifícios altos que viessem a ser construídos, para aplicar um betão experimental de resistência à compressão mais elevada em 1 ou 2 pilares, sem quaisquer custos adicionais para o proprietário. Usando este estratagema, foram incluídos pilares em vários edifícios com betão de resistência à compressão mais elevada do que estava prescrito em projeto, até chegar a betões com resistência à compressão superior em 20 a 30 MPa do valor previsto em projeto.

Em cerca de 10 anos, a resistência à compressão do betão usado na construção de edifícios altos em Chicago passou de 15 a 20 MPa para 45 a 60 MPa, o que significa que num curto período se passaram a usar betões com o triplo da resistência à compressão [12]. O Mid-Continental Plaza e o Water Tower Place (Figura 2), construídos em 1972 e 1974, respetivamente, são exemplos de edifícios em BER. O primeiro caso é um edifício de 52 pisos em que foi usado um betão de 52 MPa e o segundo caso foi um edifício com 74 pisos, considerado naquele tempo o edifício mais alto construído em betão armado, em que foi usado betão com 62 MPa de resistência à compressão.

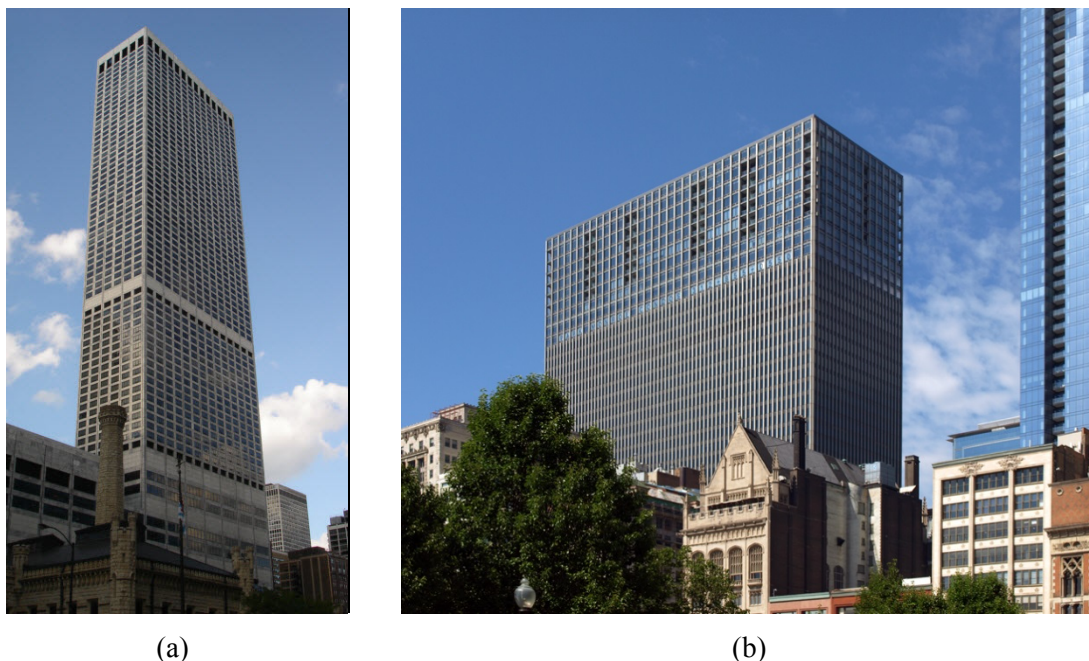


Figura 2 – Mid-Continental Plaza (a) e Water Tower Place (b) são exemplos de edifícios construídos em BER.

A aplicação dos BERs não se limitou a edifícios altos ou à zona de Chicago. Em 1960, o Departamento de Estradas do Estado do Washington prescreveu um betão com resistência à compressão de 41 MPa para umas vigas pré-esforçadas, conseguindo fazê-las com as menores dimensões de sempre. Em 1961, as vigas da linha do comboio de Seattle foram dimensionadas considerando um betão com 48 MPa de resistência à compressão e as estacas da fundação do porto de Seattle foram realizadas com um betão de 55 MPa [13].

A evolução da tecnologia de produção de betão associada ao uso de adjuvantes redutores de água (plastificantes) e adições minerais, possibilitou a obtenção de betões com resistência à compressão máxima na ordem dos 60 MPa [13], através da redução da razão A/L. Contudo, os plastificantes existentes não permitiam obter betões com resistência à compressão além dos 60 MPa, com a trabalhabilidade necessária para a sua correta aplicação em obra. Para isso, era essencial baixar a razão A/L para valores inferiores a 0,4, o que só viria a ser possível com a introdução dos superplastificantes [12].

Segundo Aïtcin [12], as primeiras utilizações de superplastificantes no betão remontam aos anos 60, quando foram usados quase simultaneamente no Japão e na Alemanha para melhorar a trabalhabilidade do betão sem risco de segregação ou de perda de resistência devido à adição de água antes da aplicação em obra. Até aos anos 80, a dosagem de superplastificante recomendada pelos fabricantes foi sendo aumentada, começando estes a serem vistos como uma gama elevados redutores de água, que permitiam que fosse atingida uma razão A/L inferior a 0,3 [12], [14].

3. DEFINIÇÃO DE BETÃO DE ELEVADA RESISTÊNCIA

Definir um BER de uma forma universal em função de um valor mínimo de resistência à compressão não é de todo possível. O termo “elevada resistência” é um termo relativo que é dependente de um conjunto de variáveis, tais como, a qualidade dos materiais disponíveis a usar no fabrico do betão e da tecnologia usada no seu fabrico [13]. Além disso, este tipo de classificação presume que seja definido um valor padrão de referência, que vai sendo atualizado ao longo do tempo [15], [16].

A definição para BER varia também em função da localização geográfica. Por exemplo, em regiões onde se produzem correntemente betões com resistência à compressão de 60 MPa não se pode considerar de elevada resistência um betão com menos de 70 a 80 MPa de resistência à compressão. Seguindo o mesmo raciocínio, em regiões onde estão comercialmente disponíveis betões com 30 MPa de resistência à compressão poderão ser considerados de elevada resistência os betões com resistência à compressão igual ou superior a 40 MPa [13].

Ao longo dos anos, com o aumento da capacidade de produzir betões com resistências superiores, o limite mínimo da resistência à compressão do betão para a qual se considerava como sendo um BER foi sendo aumentado. Nos anos 50 do século passado, um betão com resistência à compressão de 34 MPa ou superior era considerado pelo American Concrete Institute (ACI) um BER [15]. Neville [17] em 1973 definiu como 40 MPa o valor mínimo da resistência característica à compressão determinada em provetes cúbicos com 15 cm de aresta, para um betão ser considerado de elevada resistência. Mais tarde, em 1984, a resistência mínima de um betão para ser considerado um BER foi definido pelo ACI como 41 MPa, valor que se manteve até 1997 [18]. Desde então até ao presente, o ACI define como 55 MPa o valor mínimo da resistência à compressão para ser considerado um BER [13], [15], mas ressalva que este valor pode ser considerado diferente em função da região. Atualmente o MC2010 e o EC2 consideram que são de elevada resistência os betões cuja resistência característica à compressão (f_{ck}) seja maior ou igual a 50 MPa [19], [20]. Outros limites poderão ser encontrados na bibliografia [13], [21]–[23].

4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS BERS

A utilização de BERS oferece uma grande diversidade de vantagens em relação ao uso do betão convencional [2], [13], [24]–[29], que são descritas em seguida:

- a elevada resistência à compressão do betão pode ser usada em elementos estruturais em que os esforços são maioritariamente de compressão, como pilares ou estacas. Desta forma, pode-se conseguir um significativo aumento da área útil disponível, o

que pode representar uma economia considerável, especialmente em zonas metropolitanas onde a área edificada é mais onerosa;

- a redução de secções conseguida através do uso de um betão com resistência superior resulta na redução das cargas permanentes sobre a estrutura e fundações. Além disso, no caso de aplicação de BER em pontes, a redução da secção do tabuleiro e consequentemente do seu peso próprio, permite o aumento dos vãos;
- a produção de BER poderá ser considerada mais ecológica, na medida que são utilizadas adições que são subprodutos industriais, que de outra forma seriam colocados em depósitos podendo acarretar riscos de poluição do solo, da água e/ou do ar, para além das despesas de armazenamento associadas. Por outro lado, a possibilidade de fazer estruturas mais esbeltas leva ao menor consumo de betão e consequentemente a menores emissões de CO₂ originadas quer pela sua produção e transporte, quer pela exploração e transporte dos materiais necessários à produção de betão, resultando num menor impacto ambiental;
- o maior módulo de elasticidade favorece a redução de vibrações das estruturas e a deformação instantânea;
- para além da maior resistência à compressão estes betões apresentam outras características melhoradas. A maior resistência à tração e à abrasão, assim como, a reduzida permeabilidade e durabilidade substancialmente melhorada, fazem deste material uma opção mais vantajosa em algumas situações;
- a elevada resistência em idades iniciais fazem dos BERs um material aliciante para a indústria da pré-fabricação, pois torna possível uma produção em série mais económica. Também na aplicação direta em obra, a utilização de BER permite ganho de tempo no prazo de execução e economia nas cofragens, uma vez que possibilita maior reutilização das mesmas.

No entanto, a utilização de BER tem associados um conjunto de fatores que podem ser vistos como limitações ou desvantagens, que se descrevem de seguida [13], [24]–[29]:

- a produção de BER pode ou não requerer a utilização de materiais especiais mas exige que sejam selecionados materiais de boa qualidade, para evitar pôr em causa a qualidade final do betão. Os materiais de melhor qualidade, em geral, têm um custo mais elevado e podem não se encontrar com tanta abundância. A seleção dos agregados deve ser feita cuidadosamente, uma vez que não se consegue um BER usando agregados ordinários;
- a utilização de adições, tais como a sílica de fumo ou as cinzas volantes, podem encarecer a produção do BER, pois o seu custo varia em função das quantidades

disponíveis no mercado. Apesar da sílica de fumo ser um subproduto resultante da indústria, o seu transporte e armazenamento pode ser uma tarefa onerosa, devido à sua finura. Estima-se que o seu custo pode ser de até 10 vezes maior que o do cimento ou das cinzas volantes, principalmente devido aos custos de transporte e armazenamento;

- uma vez que as propriedades do BER podem variar significativamente em função de pequenas variações na quantidade dos seus constituintes, o fabrico de um BER implica custos iniciais elevados, devido ao investimento das empresas de produção de betão a otimizar o processo produtivo e sobretudo ao maior controlo de qualidade necessário;
- uma das limitações à maior utilização de BER é a reduzida informação sobre o comportamento estrutural deste material em alguns casos particulares, como por exemplo no punçoamento. Além disso, o uso deste material com propriedades melhoradas não é amplamente abordado nos regulamentos.

5. UTILIZAÇÃO DE BER NA CONSTRUÇÃO

Em todo o mundo existem casos de edifícios, pontes ou outras obras especiais em que foi utilizado um BER [12], [14], [21], [24], [29]–[31]. No entanto, devido às características dos BERs, a aplicação deste material em edifícios é mais comum em cidades onde se constrói em altura.

Em Taiwan foi construído em 1997 o maior edifício da cidade (*T&C Tower*) com mais de 347 m e 85 pisos acima do nível do solo (Figura 3). Este foi o segundo edifício da cidade em que foi usado um BER, mas neste caso com resistência à compressão superior, na ordem dos 55 MPa. O dimensionamento da estrutura foi conseguido através de uma estrutura metálica. No entanto, para aumentar a rigidez da estrutura e reduzir a quantidade de aço necessária, optou-se por usar uma secção oca em aço que seria preenchida por um BER, para os níveis abaixo do piso 60. Segundo a bibliografia [32], a utilização de BER diminuiu o período fundamental da estrutura e o deslocamento máximo no topo do edifício baixou de 1,30 m para 0,95 m. Com a utilização de BER conseguiu-se uma redução de 18% na quantidade de aço, o que representa cerca de 8000 toneladas em todo o edifício e uma diminuição muito significativa no custo final da estrutura.

O *Trump Tower* é um edifício residencial com 423 m de altura e 98 pisos, localizado em Chicago, construído em 2009 e que nessa data foi considerado o edifício residencial mais alto dos Estados Unidos da América (Figura 4). O betão foi o material estrutural escolhido para a construção da estrutura do edifício devido à sua capacidade de formar uma estrutura rígida e com elevado amortecimento. Além disso, foi possível fazer lajes fungiformes e usufruir das vantagens que estão associadas a este sistema estrutural, com 230 mm de espessura de laje para um vão máximo de 9,1 metros, o que permitiu ter um maior pé direito. Nas fundações do edifício foi

usado um BER com 69 MPa de resistência à compressão e na restante estrutura a resistência máxima foi de 110 MPa. Na totalidade, foram produzidos 137 620 m³ de betão para a construção deste edifício que se prolongou por cerca de 4 anos [33].



Figura 3 – Edifício T&C em Taiwan, considerado o mais alto da cidade, em 1997 [32].



Figura 4 – *Trump Tower* em Chicago, com 423 m de altura [33].

Atualmente, o Burj Khalifa no Dubai é considerado o edifício em betão armado mais alto do mundo, com mais 828 metros de altura e de 160 pisos (Figura 5). Segundo a página oficial do edifício [34], na sua construção foram empregues mais de 45 000 m³ de betão, sendo a sua resistência máxima à compressão de 80 MPa.



Figura 5 – Burj Khalifa no Dubai é considerado edifício em betão armado mais alto do mundo [34].

Em Portugal, os exemplos mais conhecidos de utilização de BER são a ponte Vasco da Gama (Figura 6) e o edifício do Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego do Porto de Lisboa (Figura 7). A ponte Vasco da Gama é considerada a maior ponte da Europa e uma das maiores do Mundo, com uma extensão total de 17,2 km e com 420 m de vão principal. Na construção desta ponte foi usado um betão com resistência média à compressão aos 28 dias entre os 61,9 e 77,3 MPa com o valor máximo a atingir 112 MPa [29], [31]. O edifício destinado ao Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego de Porto de Lisboa tem uma altura de 36 m acima do coroamento do molhe e desenvolve-se em altura com uma inclinação de um para quatro, o que representa um avanço de 9 metros do topo em relação à base. A construção deste edifício, localizado em ambiente marítimo, sujeito particularmente à ação dos cloretos, exigiu um betão de qualidade superior. A resistência média à compressão do betão utilizado foi de 89 MPa [31], [35].



Figura 6 – Ponte Vasco da Gama [31].



Figura 7 – Edifício do Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego do Porto de Lisboa

6. COMPOSIÇÃO DE BETÕES

Como muito cedo se compreendeu que a mistura dos agregados não podia ser arbitrária para que o betão apresentasse a maior compacidade e trabalhabilidade possível, foram definidas regras empíricas, independentes da natureza dos componentes, que asseguravam uma compacidade elevada, embora com utilização excessiva de ligante [36].

O primeiro método de cálculo da composição de betão e argamassa foi apresentado em 1881 por Préaudeau. Em 1888, Paul Alexandre introduz o conceito da água de molhagem dos agregados e definiu coeficientes para o seu cálculo em função da granulometria dos agregados. A descoberta que marcou o início do estudo da composição racional do betão foi feita em 1892 por

Feret, que relacionou a resistência à compressão da argamassa e a sua compacidade, como a razão entre o volume de cimento e a soma dos volumes de água e vazios. Em 1901, William Fuller fez um estudo experimental e conseguiu definir as curvas granulométricas da mistura de agregados que conduzia aos valores máximos da compacidade. Mais tarde, em 1907, num trabalho conjunto com Thompson, introduziram o cimento e propuseram uma curva granulométrica ótima da mistura dos agregados. Em 1925, Bolomey aperfeiçoou a curva granulométrica ótima proposta por Fuller e Thompson, através da introdução do conceito de módulo de finura e trabalhabilidade definido por Abrams em 1918. Em 1937 Caquot estabelece o conceito do efeito de parede, que foi introduzido por Faury em 1941 na curva granulométrica de Bolomey, obtendo assim uma curva granulométrica de referência que tem em conta a trabalhabilidade do betão e o efeito parede [36].

6.1. Conceitos gerais

O estudo da composição granulométrica dos agregados destinados à fabricação de betão engloba um conjunto de conceitos e definições que devem ser conhecidos e que são apresentados nas secções seguintes.

6.1.1. Expressão fundamental da composição do betão

Todas as formulações tomam como princípio a expressão fundamental da composição de betões, também designada por expressão dos volumes absolutos, onde se reconhece o volume de cada um dos seus constituintes e cuja soma resulta no volume aparente unitário de betão Eq. (1) [37]:

$$c + s + \text{adj} + \sum_{i=1}^n m_i + a + vv = 1 \quad (1)$$

Em que, por unidade de volume aparente de betão:

- c é o volume absoluto de cimento;
- s é o volume absoluto da adição;
- adj é o volume de adjuvante;
- $\sum m_i$ é a soma dos volumes absolutos dos agregados de classes granulométrica finas $\sum m_f$ ($d \leq 4,76$ mm, areias) e das classes granulométrica grossas $\sum m_g$ ($d > 4,76$ mm, britas ou godos);
- a é o volume de água;
- vv é o volume de ar, designado correntemente por volume de vazios.

Poderão ainda ser definidas outras expressões complementares [37]:

$$vps = c + s + adj + \sum_{i=1}^n m_i \quad (2)$$

$$vpf = a + adj + vv \quad (3)$$

$$vpl = c + s + adj + a + vv \quad (4)$$

$$va = c + s + adj + \sum_{i=1}^n mf_i + a + vv \quad (5)$$

Em que:

- vps é o volume dos constituintes sólidos do betão;
- vpf é o volume absoluto dos constituintes fluidos do betão;
- vpl é o volume absoluto da pasta ligante;
- va é o volume absoluto da argamassa.

6.1.2. Máxima dimensão dos agregados

O conhecimento da dimensão máxima dos agregados é fundamental para a definição da sua curva granulométrica. O valor máximo da dimensão máxima dos agregados a usar num determinado betão deve ser definido em função das dimensões da peça a betonar e da densidade de armaduras [38], [39]. O ACI recomenda que a máxima dimensão dos agregados não deverá exceder 1/5 da menor dimensão da peça a betonar, 1/3 da espessura de lajes e 3/4 da distância entre varões de armadura [40]. A APEB recomenda que para assegurar uma adequada colocação e compactação do betão, a máxima dimensão do agregado não deverá exceder 1/4 da menor dimensão do elementos estrutural a betonar, a distância entre varões diminuída de 5 mm e o recobrimento mínimo das armaduras [41].

A definição de máxima dimensão de agregado mais conhecida e utilizada comercialmente para caraterizar os agregados é a proposta pelas normas ASTM, que define a máxima dimensão de um agregado como a menor abertura do peneiro da série utilizada, através do qual passam pelo menos 90% da massa do agregado [1], [36], [39]. Em 1958, Faury propôs um critério empírico para definir a máxima dimensão do agregado, a partir das variações das percentagens de passados dos dois primeiros peneiros onde ficam material retido [36], [42]. Assim, a máxima dimensão dos agregados pode ser calculada, segundo Faury, pela Eq. (6):

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) \cdot \frac{x}{y} \quad (6)$$

Em que:

- d_1 é a maior abertura do peneiro onde ficam retidos agregados;
- d_2 é a abertura do peneiro de dimensão inferior a d_1 na série de peneiros usada;
- x é a percentagem em peso de agregados retidos em d_1 ;
- y é a percentagem em peso dos agregados que passaram em d_1 e ficaram retidos em d_2 .

6.1.3. Efeito de parede e efeito de peneiração

O efeito de parede, evidenciado por Caquot em 1937, caracteriza o fenómeno de alteração da compacidade do betão e conseqüente diminuição da resistência mecânica, devido à migração das partículas mais finas (argamassa) para ocupar os espaços vazios entre as partículas maiores do agregado e as armaduras ou face dos moldes. Assim, de forma a permitir o preenchimento do espaço entre as partículas maiores dos agregados e a superfície dos moldes ou armaduras, pode ser necessária a utilização de um betão mais rico em finos. Esta necessidade de aumentar o volume de argamassa no betão é tanto maior quanto maior for a relação entre a superfície da peça e o seu volume [36].

O volume de espaços a preencher, provocado pelo efeito de parede, pode ser expresso em função da área da superfície em contacto com o betão e da dimensão máximo do agregado. A área da superfície em contacto com o betão pode ser representada pelo raio médio do molde ou raio hidráulico, R , que se define pelo quociente entre o volume a encher e a superfície das faces do molde e das armaduras nele contido [36]. Faury estabeleceu um limite máximo para dimensão máxima dos agregados do betão de forma a evitar o efeito de parede, de acordo com a expressão seguinte [42]:

$$D_{\max} < \frac{4}{3} \cdot R \quad (7)$$

O conceito de efeito de peneiração refere-se à existência de malhas de armaduras, que por serem tão apertadas causam impedimento ao livre escoamento do betão e conseqüentemente perda de homogeneidade pela sua segregação. O efeito de peneiração do betão é tanto maior quanto maiores forem a máxima dimensão do agregado, a percentagem de agregado grosso, a consistência e o atrito interno das partículas de maiores dimensões, e quanto menos potentes forem os meios de compactação. As características geométricas de uma malha de armadura podem ser representadas pelo seu raio médio, ρ , que se define como o quociente entre a área

aberta à penetração do betão e o perímetro respetivo. Desta forma, o raio médio de uma malha retangular é dado por [36]:

$$\rho = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} \quad (8)$$

Em que:

- a e b são as dimensões da malha.

A possibilidade de ocorrer o efeito de peneiração varia em função da relação D_{\max}/ρ , e Faury propôs um valor máximo para essa relação de forma a garantir que não há segregação (Eqs. (9) e (10)) [42]. Dreux afirma que as relações propostas por Faury são demasiado limitadoras e que estas podem ir até 2 [36], [37].

$$D_{\max} < 1,4 \cdot \rho \quad \text{para agregados rolados;} \quad (9)$$

$$D_{\max} < 1,2 \cdot \rho \quad \text{para agregados britados.} \quad (10)$$

6.1.4. *Trabalhabilidade ou consistência*

A resistência à compressão do betão endurecido está fortemente relacionado com o seu grau de compactação, no entanto, tem de ser garantido que não existe segregação da mistura. A definição de trabalhabilidade ou consistência de um betão está associada à facilidade e homogeneidade que este apresenta, em estado fresco, ao ser misturado, colocado nos moldes, compactado e acabado. O termo consistência é habitualmente usado em normas. A noção de trabalhabilidade é bastante vaga e está relacionada com um grande número de propriedades físicas [17], [26], [36].

A NP EN 206-1 [43], que define os aspetos relacionados com a especificação, desempenho, produção e conformidade do betão, recomenda quatro métodos para a determinação da consistência do betão: ensaio de abaixamento (NP EN 12350-2 [44]), ensaio VêBê (NP EN 12350-3 [45]), grau de compactabilidade (NP EN 12350-4 [46]) e ensaio da mesa de espalhamento (NP EN 12350-5 [47]). A amostragem deve ser feita de acordo com a NP EN 12350-1 [48].

O ensaio de abaixamento, também conhecido por ensaio do cone de Abrams, é o mais generalizado devido à sua simplicidade de execução e do equipamento necessário. Este ensaio é muito útil em obra para verificar se houve alguma variação acidental da composição da mistura. Apesar de este ensaio ser muito popular, alguns estudos experimentais mostraram que os resultados obtidos apresentam grande dispersão [36].

6.2. Materiais constituintes

As características dos materiais constituintes do betão têm grande influência nas suas propriedades. Desta forma, a seleção dos materiais a usar na composição de um betão deve ser criteriosa, com base nas propriedades de cada constituinte e da sua contribuição para as propriedades do betão, quer em estado fresco quer endurecido. Outros fatores deverão também ser tidos em conta, tais como, a disponibilidade, o custo, a conformidade com as normas e a conformidade de acordo com a especificação do betão pretendido (por exemplo, a máxima dimensão do agregado ou a dosagem mínima de cimento).

A produção de um BER não exige, na maioria dos casos, a utilização de materiais ou de técnicas de fabrico especiais mas serão necessários materiais com propriedades mais específicas do que os utilizados para a produção de betão convencional. Quanto maior for o valor da resistência requerida para o BER maior é o efeito da variabilidade das características dos materiais e processos utilizados.

No caso de betões com resistência à compressão superior a 80 MPa, a seleção dos materiais terá de ser mais criteriosa, sendo necessário a utilização de agregados com maior resistência mecânica, adições com características pozolânicas e superplastificantes de 3ª geração, de forma a conseguir betões com a consistência adequada para a sua aplicação [38].

6.2.1. Cimento

O cimento é um ligante hidráulico artificial que resulta da mistura do clínquer com sulfato de cálcio (CaSO_4), que tem como principal objetivo controlar o tempo de presa do material, para que este possa ser utilizado durante um intervalo de tempo sem perda de trabalhabilidade. O clínquer é obtido pela moagem e posterior cozedura, a uma temperatura da ordem de 1450 °C, de carbonato de cálcio (calcário), silicatos de alumínio e ferro (argila ou xisto argiloso) e outros materiais que contêm sílica, alumina ou ferro [12]–[14], [26], [38], [49], [50].

Os principais componentes do clínquer e consequentemente do cimento Portland, apresentados na sua designação abreviada, são o silicato tricálcico (C_3S), o silicato bicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). A variação do teor de cada um destes principais componentes afeta o desenvolvimento da resistência. O silicato tricálcico hidrata e endurece rapidamente e é o maior responsável pela resistência do cimento em idades muito jovens, o silicato bicálcico hidrata e endurece lentamente, contribuindo muito para o incremento da resistência para idades superiores a uma semana, o aluminato tricálcico tem um ligeiro contributo para a resistência nos primeiros dias de endurecimento e o aluminoferrato tetracálcico tem pouca influência no desenvolvimento de resistência [1], [13]. As proporções

médias dos principais componentes do clínquer Portland e as suas principais características são indicadas pelo LNEC através da E378 [51] e são apresentadas no Quadro 1 [14].

Quadro 1 – Características dos componentes do clínquer Portland de acordo com a E378.

Componentes do clínquer		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Proporções médias		60 %	20 %	8 %	12 %
Velocidade de hidratação		Elevada	Moderada	Muito elevada	Elevada
Calor de hidratação	Quantidade	Elevada	Pequena	Muito elevada	Moderada
	Desenvolvimento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Desenvolvimento da resistência mecânica		Rápido e prolongado	Lento e muito prolongado	Muito rápido e curto	Lento e pouco significativo
Resistência a ataque químico		Pequena	Moderada	Muito Pequena	Grande

C₃S – Silicato tricálcico;

C₂S – Silicato bicálcico;

C₃A – Aluminato tricálcico;

C₄AF – Aluminoferrato tetracálcico.

A avaliação da conformidade dos cimentos em Portugal é feita de acordo com as normas NP EN 197-1 [52] e NP EN 196 [53]. A primeira indica a composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes enquanto a segunda define os métodos de ensaios a usar na caracterização dos vários cimentos.

A importância da seleção do cimento para a produção de um BER é evidenciada por vários autores da bibliografia ([12], [14], [16], [26], [38], [50], [54]), sendo a sua composição química e a finura das partículas as principais características. Newman e Choo [26], Aïtcin [12], Mehta e Monteiro [50] afirmam que utilizando um cimento correntemente disponível no mercado, é possível obter um betão com resistência à compressão entre 50 MPa a 75 MPa.

Para a produção de BER são indicados os cimentos que apresentem simultaneamente elevados teores de C₂S e C₃S, e reduzidas percentagens de C₃A, pois estas características químicas conduzem à obtenção de resistências elevadas. O requisito de baixo teor em C₃A está relacionado com o aumento da trabalhabilidade e com a adequada compatibilidade entre o cimento e os superplastificantes [12]–[14], [26], [50], [54]. De acordo com o ACI 363-R10 [15], de forma a manter a uniformidade da resistência à compressão, o teor de C₃S não deve variar mais do que 4%.

No que diz respeito à finura ideal do cimento para utilização em BER, não existe um valor ótimo. Do ponto de vista da resistência, quanto mais pequenas forem as partículas melhor, pois a sua maior superfície específica aumenta a velocidade do processo de hidratação, o que conduz a maior resistência inicial. No entanto, a maior finura do cimento pode resultar no aparecimento de

problemas reológicos, nomeadamente à rápida perda de trabalhabilidade, devido à aceleração das reações químicas nas idades iniciais [50].

Gutiérrez e Cánovas [54] indicam que os cimentos mais indicados para a produção de BER são os do tipo I e classe 42,5 ou 52,5. Através de um estudo experimental, onde realizaram 69 amassaduras, estes autores concluíram que a utilização de cimento da classe 52,5 permite um incremento de resistência do betão na ordem de 10% a 15%, em relação à utilização de cimento da classe 42,5. Este ganho de resistência, segundo os autores, é devido, principalmente, à maior finura do cimento de classe 52,5. Em termos de consistência, verificou-se que as misturas com cimento da classe 52,5 apresentaram menor abaixamento. A maior superfície específica do cimento da classe 52,5 leva à perda de eficácia do superplastificante, uma vez que este envolve as partículas do cimento, sendo no caso de utilização deste tipo de cimento aumentar a dosagem de adjuvante.

Outros fatores, segundo Azevedo [14], podem condicionar a escolha do cimento entre as classes 42,5 e 52,5. Para além dos fatores referidos, há que ter em conta a sua disponibilidade e a resistência à compressão do betão que se pretende produzir. O cimento de classe 52,5, devido à sua utilização para fins especiais, não tem produção em contínuo e geralmente é mais difícil de obter. A resistência do betão pode condicionar a escolha do cimento uma vez que, para resistências mais elevadas pode ser necessária a utilização de sílica de fumo e usando um cimento de classe de resistência mais baixa pode significar um aumento da quantidade necessária deste material, que é bastante dispendioso, sendo o custo final superior à solução com a adoção de um cimento de maior resistência e menor quantidade de sílica de fumo.

6.2.2. Adições

As adições são definidas pela NP EN 206-1 [43] como materiais inorgânicos finamente divididos, que podem ser utilizados no betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou adquirir propriedades especiais. As adições são divididas em dois tipos (tipo I e tipo II) em função das suas propriedades pozolânicas. As adições quase inertes são designadas de tipo I e as adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, de tipo II. O filer calcário é um exemplo de adição do tipo I e a cinza volante, a sílica de fumo e as escórias granuladas de alto forno são exemplos de adições do tipo II.

A utilização de adições na produção do betão, para além de melhorar as propriedades do material, leva a benefícios de ordem económica, de consumo de energia, de proteção ambiental e de conservação dos recursos naturais, visto que a grande maioria das adições são subprodutos industriais, que se não forem utilizados são depositados em aterros [14].

A produção de betões com resistência à compressão até cerca de 100 MPa pode ser conseguida utilizando apenas o cimento como ligante [12], [13], [29], [55]. No entanto, segundo Aïtcin [12], do ponto de vista económico e do comportamento reológico do betão, a utilização de cinzas volantes ou escórias de alto-forno deve ser seriamente considerada. Estas adições têm um custo de produção muito mais baixo que o cimento e a sua utilização leva, geralmente, à redução da quantidade de superplastificante necessária.

Para a produção de um BER com resistências acima de 100 MPa é quase indispensável a utilização de adições, sendo a sílica de fumo considerada a mais apropriada e por isso a mais utilizada [12], [13], [15], [38], [56]. Esta poderá ainda ser usada em conjunto com outras adições de forma a melhorar determinadas características. Ding e Li [57] afirmam que a utilização de metacaulino em conjunto com sílica de fumo reduz a retração do betão, sem decréscimo das suas características mecânicas.

A sílica de fumo resulta, segundo a NP EN 197-1 [52], da redução de quartzo de alta pureza com carvão em fornos de arco elétrico, durante a produção de ligas de silício e de ferro-silício, a temperaturas da ordem dos 2000°C. As reações químicas originam a formação de pequenas esferas de sílica amorfa que são arrastadas nos gases de escape e capturadas em filtros, evitando-se a sua saída para a atmosfera. A sílica de fumo é constituída fundamentalmente por uma elevada percentagem de partículas esféricas de sílica (SiO₂), óxidos de ferro (Fe₂O₃), cálcio (CaO), magnésio (MgO), sódio (Na₂O) e potássio (K₂O). As partículas de sílica de fumo são cerca de 100 vezes inferiores às do cimento Portland, variando o seu diâmetro entre 0,01 µm e 0,5 µm, com diâmetro média de 0,1 µm [1], [14], [38]. As partículas de sílica de fumo preenchem os espaços vazios entre as partículas dos agregados e do cimento, contribuindo para uma mistura mais densa [58]. Os requisitos e critérios de conformidade para a utilização de sílica de fumo no betão estão regulamentados pelas NP EN 13263-1 [59] e NP EN 13263-2 [60].

A dosagem recomendada de sílica de fumo para a produção de BER varia em função das propriedades que se pretendem. Aïtcin [12] refere que há casos pontuais em que se fabricou BER com dosagem de sílica de fumo na ordem dos 25% a 30% do peso do cimento, mas nestes casos existe uma grande necessidade de superplastificante. Este autor refere ainda que existe um aumento significativo de resistência do betão quando aumenta a dosagem de sílica de fumo de 5% para 10%, mas os incrementos de resistência não são proporcionais para dosagens desta adição em quantidades superiores a 10%. Assim e como com o aumento da percentagem de sílica de fumo existe necessidade de aumentar a dosagem de superplastificante, geralmente, não é economicamente viável a utilização de dosagens de sílica de fumo superiores a 10%.

O ACI 363R-97 [16] recomenda dosagens de sílica de fumo entre os 5% e os 10% do peso do cimento. Ismeik [61] fez um estudo experimental onde variou a quantidade de sílica de fumo e obteve a maior resistência à compressão para uma dosagem de 10% do peso do cimento.

6.2.3. Agregados

Os agregados são definidos pela NP EN 12620 [62] como materiais granulares que podem ser classificados como naturais, artificiais ou reciclados. Os agregados naturais e artificiais são de origem mineral, com a diferença que os naturais são sujeitos apenas a processamento mecânico enquanto os artificiais resultam de um processo industrial, que pode incluir modificações térmicas ou outras. Os agregados reciclados artificiais advêm do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.

Anteriormente, os agregados eram comumente designados por inertes devido ao facto destes não contribuírem significativamente nas reações químicas de endurecimento do betão. No entanto, percebeu-se mais tarde que alguns agregados apresentam reatividade química, que podem levar à deterioração do betão, como é o caso da reação álcalis-sílica, levando ao desuso da designação de inertes.

Os agregados ocupam 70% a 90% do volume do betão e por isso é compreensível que as suas características afetem profundamente as propriedades do betão, quer em estado fresco quer em endurecido [1], [10], [13], [55], [63].

Coutinho [1] considera que as principais propriedades dos agregados são:

- forma e dimensões;
- resistência mecânica;
- propriedades térmicas;
- propriedades químicas;
- isenção de substâncias prejudiciais.

Os agregados podem ser classificados, em função das suas dimensões, como areias ou agregados grossos. Os agregados com máxima dimensão inferior a 5 mm são geralmente designados como areias, podendo ser roladas quando são de origem sedimentar ou britadas, se forem obtidas por fratura artificial. Os agregados grossos, com dimensões superiores a 5mm, designam-se por pedregulhos quando são de origem sedimentar e por britas quando são obtidos por fratura artificial [1], [64].

A geometria e a textura da superfície dos agregados afetam as características do betão, no entanto, consideravelmente mais em estado fresco do que endurecido. A utilização de agregados lisos e arredondados contribui para aumentar a trabalhabilidade do betão em relação ao uso de

agregados angulares ou achatados. Os agregados britados tendem a aumentar a resistência à tração do betão devido à melhoria das condições de aderência entre os agregados e a pasta ligante [17]. Coutinho [1] indica que a regra mais simples de definir uma geometria adequada para os agregados é impor uma quantidade de partículas alongadas e achatadas inferior a 50%. Este autor define partículas achatadas como as que apresentem uma relação entre a espessura e largura menor que 0,5 e partículas alongadas as quais em que a relação entre comprimento e largura é superior a 1,5.

A resistência mecânica dos agregados a utilizar em betões correntes não costuma ser condicionante, uma vez que a resistência das rochas habitualmente utilizadas como agregados é superior a valores da ordem dos 60 MPa a 70 MPa. A verificar-se esta condição, a resistência do betão depende da resistência da pasta ligante.

O coeficiente de dilatação térmica dos agregados pode condicionar a sua adequabilidade para o fabrico de betão. Não deverão ser usados agregados obtidos a partir de rochas com coeficiente de dilatação térmica inferior a $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [1].

Do ponto de vista petrográfico, as rochas metamórficas xistosas não são adequadas para a produção de agregados devido à sua heterogeneidade. As propriedades químicas dos agregados estão relacionadas com os minerais presentes na rocha originária. As rochas que sejam predominantemente constituídas por calcite, minerais siliciosos não alterados, calcário, dolomites, ortose e quartzo são geralmente adequadas para a produção de betão [1], [26], [38].

As matérias prejudiciais que se podem encontrar nos agregados e interferem química e fisicamente nas propriedades do betão classificam-se como: partículas que dão origem a reações químicas com o cimento; impurezas de origem orgânica; impurezas de origem mineral; partículas muito pequenas que interferem na estrutura da pasta ligante; partículas com baixa resistência e partículas suscetíveis de mudança de volume devido à alteração das condições de humidade [1].

Para a produção de BER, para além do rigoroso cumprimento das características apresentadas para o betão convencional, é necessário ter em conta um conjunto de características, de forma a atingir resistências superiores a cerca de 80 MPa [12], [13], [16], [26], [54], [55], [63], [65], [66].

Os agregados mais adequados para o fabrico de BER são os finos rolados, com forma o mais próxima possível da esférica, e os grossos britados com forma o mais cúbica possível, pois conduzem à maior compacidade da mistura. A rocha originária dos agregados grossos deve ter resistência máxima à compressão entre os 150 MPa e 200 MPa. O índice de desgaste do ensaio de Los Angeles deve ser inferior a 15%, o que indica a elevada resistência mecânica dos agregados. No entanto, a elevada resistência dos agregados pode não ser condição suficiente para conseguir um BER pois a ligação agregado-pasta ligante pode comprometer o comportamento do betão.

Para melhorar a ligação agregado-pasta ligante, pode ser necessário proceder à lavagem dos agregados.

No que diz respeito à granulometria dos agregados, o valor máximo recomendado para a maior dimensão do agregado é de 14 mm. Apesar da quantidade de água necessária aumentar com a diminuição da máxima dimensão dos agregados usados, devido ao aumento da superfície específica, os agregados grossos devem ser tanto mais pequenos quanto maior for o valor de resistência pretendido. Quanto maior for a máxima dimensão dos agregados, maior será a quantidade permitida de agregados grossos. Da mesma forma, quanto maior for o módulo de finura dos agregados finos, menor será a quantidade permitida de agregados grossos. O valor recomendado para o módulo de finura dos agregados finos é próximo de 3, favorecendo o aumento da trabalhabilidade e da resistência do BER.

A superfície dos agregados grossos deve apresentar alguma rugosidade, favorecendo o desenvolvimento de um mecanismo de aderência com a superfície angular, o que contribui para o aumento da resistência do betão. É de evitar a utilização de agregados muito irregulares porque provoca a redução da trabalhabilidade obrigando ao aumento da quantidade de água. Também são de evitar os agregados grossos com coeficiente de absorção superior a 1%.

6.2.4. Água

A água de amassadura do betão tem como principal função promover as reações de hidratação do ligante, que lhe vão conferir a resistência em estado endurecido. São ainda atribuídas à água de amassadura do betão as funções de molhagem dos agregados, favorecer a mistura homogénea dos constituintes e fornecer as propriedades reológicas necessárias à sua aplicação.

A qualidade da água de amassadura influi nas propriedades do betão e deve assegurar-se que a água utilizada não contém matérias prejudiciais. Para que a água seja adequada ao fabrico de betão, esta não deve apresentar sabor ou cheiro, substâncias dissolvidas ou em suspensão. As substâncias dissolvidas podem afetar a resistência mecânica e química do betão e das armaduras, enquanto as substâncias em suspensão podem prejudicar a ligação da pasta ligante aos agregados [1]. Os procedimentos para ensaio e avaliação da qualidade da água a usar na produção de betões são definidos pela norma NP EN 1008 [67].

A água a utilizar na produção de BER não apresenta requisitos de qualidade adicionais, uma vez que qualquer água considerada própria para consumo é apropriada para o fabrico de BER [16]. No entanto, Fernandes [38] refere que os critérios de conformidade da NP EN1008 [67] devem ser rigorosamente respeitados e não recomenda a utilização de águas provenientes de processos de lavagem de centrais de betonagem.

6.2.5. Adjuvantes

Os adjuvantes são definidos pelas NP EN 934-2 [68] e NP EN 206-1 [43] como materiais adicionados, durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão em estado fresco e endurecido. Coutinho [1] define o valor de 5% da massa do cimento como o máximo de adjuvante que pode ser adicionado ao betão para que este seja designado como tal. A norma NP EN 934-2 [68] define os requisitos e critérios de conformidade dos adjuvantes a utilizar na composição de betões.

A utilização de adjuvantes tem como principais objetivos reduzir os custos de produção do betão, fornecer propriedades específicas ao betão em função da sua utilização e contribuir para a qualidade do betão desde a fase de produção até à cura. Os adjuvantes são classificados, geralmente, de acordo com a função principal que lhes é atribuída, embora existam adjuvantes que possam melhorar em simultâneo mais do que uma característica do betão. Desta forma os principais adjuvantes existentes são:

- plastificantes e superplastificantes;
- redutores de água;
- introdutores de ar;
- aceleradores ou retardadores de presa;
- inibidores de corrosão;
- agentes expansivos;
- hidrófugos.

A seleção do adjuvante deve ser feita em função da propriedade que se pretende melhorar e das características técnicas apresentadas pelos fabricantes. O comportamento dos adjuvantes é muito influenciado pela sua dosagem e características químicas e físicas, devendo ser avaliada a sua compatibilidade com o cimento.

A utilização de um adjuvante, nomeadamente de um superplastificante, é requisito obrigatório para se conseguir produzir um BER, devido principalmente à baixa relação água/ligante que está associada à formulação destes betões. São muitos os estudos e as considerações existentes sobre a utilização de superplastificantes e a sua influência nas propriedades do betão [13], [38], [54], [55], [63], [69]–[71]. Os superplastificantes que parecem ser os mais apropriados para a produção de BER são os vulgarmente designados de terceira geração, pois são os que permitem maior redução da água, podendo atingir valores da ordem dos 40%. Estes superplastificantes são à base de acrílicos modificados, policarboxilatos modificados e éteres carboxílicos.

6.3. Formulação

A formulação do betão baseia-se principalmente num conjunto de conceitos e de procedimentos empíricos, ajustados em função de trabalhos experimentais. Deste modo, após definir teoricamente a composição do betão pretendido é necessário verificar se as suas propriedades correspondem às desejadas, através da realização de amassaduras experimentais.

6.3.1. Compacidade

A compacidade (σ) de um betão varia em função da máxima dimensão dos agregados, da consistência do betão e dos meios de compactação utilizados. Esta grandeza é definida por Lourenço *et al* [37] como o volume total dos seus componentes sólidos por unidade de volume aparente de betão:

$$\sigma = \frac{vps}{1} \quad (11)$$

O índice de vazios relaciona o volume total dos constituintes fluidos por unidade de volume aparente de betão:

$$I = \frac{vpl}{1} \quad (12)$$

A compacidade e o índice de vazios são complementares para o volume unitário, vindo que:

$$\sigma + I = 1 \quad (13)$$

Faury propôs uma expressão geral para o índice de vazios do betão:

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} + \frac{K'}{\frac{R}{D_{\max}} - 0,75} \quad (14)$$

Em que:

- K é um parâmetro que depende da consistência do betão pretendido, da natureza dos agregados e da utilização de adjuvantes que alterem a reologia do betão em estado fresco (Quadro 2);
- D_{\max} é a máxima dimensão dos agregados;
- R é o raio médio do molde;
- K' é um parâmetro que depende da potência de compactação (Quadro 3).

Quadro 2 – Valores de K para a utilização da expressão do índice de vazios [37].

Meios de compactação	Betão sem adjuvante	Betão com dosagem intermédia de plastificante	Betão com dosagem intermédia de superplastificante	Betão com forte dosagem de superplastificante
Meios especiais de compactação	0,280	0,260	0,250	0,240
Vibração potente	0,310	0,290	0,270	0,245
Vibração corrente	0,340	0,320	0,290	0,270
Vibração fraca	0,370	0,345	0,310	0,295
Sem compactação	0,400	0,375	0,340	0,315

Quadro 3 – Valores de K' para a utilização da expressão do índice de vazios [37].

Meios de compactação	Vibração muito potente	Vibração corrente	Sem vibração
Coefficiente K'	0,002	0,003	0,004

6.3.2. Quantificação da pasta ligante

A compacidade da pasta ligante pode ser definida por:

$$\gamma = \frac{vl}{vpl} = \frac{c + s}{c + s + a + adj + vv} \quad (15)$$

Em que:

- vl é o volume absoluto do ligante;
- vpl é o volume absoluto da pasta ligante;
- c é o volume absoluto de cimento;
- s é o volume absoluto da adição;
- a é o volume de água;
- adj é o volume de adjuvante;
- vv é o volume vazios.

A compacidade da pasta ligante foi relacionada por Feret com a resistência à compressão [37] através da expressão (16), a partir da qual é possível determinar a dosagem de ligante por unidade de volume aparente de betão, usando a expressão (17).

$$f_{c,j} = k_{1,j} \times \gamma^2 \quad (16)$$

$$v_l = \frac{\gamma \times I}{1 - \gamma} \quad (17)$$

Em que:

- $f_{c,j}$ é o valor da tensão de rotura à compressão, em MPa, j dias após a amassadura;
- $k_{1,j}$ é um parâmetro empírico, caracterizador da mistura ligante.

Na bibliografia [37], [72] podem ser encontrados valores de $k_{1,j}$ para diferentes classes de cimentos e de adições. Mechling *et al* [73] apresentam uma expressão similar à de Feret que permite estimar a dosagem de cimento para vários tipos de cimento, aplicando-a nomeadamente a cimentos produzidos em diferentes países.

Para quantificar totalmente os constituintes da pasta ligante, falta conhecer a quantidade de água. Esta pode ser estimada em função do volume de vazios e da quantidade de adjuvante, de acordo com a seguinte expressão:

$$a = I - \text{adj} - v_v \quad (18)$$

Em que:

- v_v é o volume de vazios, que pode ser estimado segundo os valores médios apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Volume de vazios do betão compactado em função da dimensão máxima dos agregados [36].

Máxima dimensão dos agregados (mm)	9,5	12,7	19,1	25,4
Volume de vazios (l/m ³)	30	25	20	15

6.3.3. Quantificação dos agregados

A quantificação dos agregados é a fase em que se pretende definir o volume de cada agregado de forma que a mistura conduza à máxima compacidade, garantindo a sua trabalhabilidade. O volume destinado aos agregados pode ser calculado substituindo (4) em (1), e é dado pela seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1 - v_{pl} \quad (19)$$

Em que:

- $\sum m_i$ é a soma dos volumes absolutos dos agregados;
- v_{pl} é o volume absoluto da pasta ligante.

Os procedimentos mais comuns para definir a composição granulométrica do betão podem ser agrupados em três fundamentais [36]:

- determinação experimental dos componentes, partindo dos materiais disponíveis, de modo a obter um betão que satisfaça os requisitos pretendidos. O método de Vallete é um exemplo deste processo;
- utilização de curvas de referência estabelecidas experimentalmente. Este método consiste no ajuste das curvas da mistura real dos agregados e cimento com a curva granulométrica de referência. As curvas granulométricas de referência mais importantes são as de Faury, Bolomey e de Joisel sendo a de Faury a mais utilizada;
- utilização de composições pré-estabelecidas. Esta metodologia só é aplicável em países em que os agregados se encontram normalizados em classes de granulometria.

O método mais utilizado é o das curvas de referência, adotando a curva de Faury como referência. A curva granulométrica de Faury, apresentada em 1941, é constituída por dois segmentos de reta. As ordenadas, que representam a percentagem de material que passa, têm uma escala linear. As abcissas, que correspondem à abertura da malha dos peneiros, têm uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas. O primeiro segmento diz respeito ao conjunto constituído por elementos granulares finos (com cimento e eventualmente adições) e médios, cujas dimensões estão entre 0,0065 mm e $D_{max}/2$, com uma percentagem em volume absoluto dada por:

$$y = A + 17 \times \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{max}} - 0,75} \quad (20)$$

Em que:

- A e B são coeficientes que dependem da natureza dos agregados e da potência de compactação, sendo apresentados no Quadro 5 e Quadro 6.

A lei granulométrica de referência de Faury pode ser definida no intervalo de 0,0065 mm a $D_{\max}/2$ como:

$$p(d) = y \times \frac{\sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{d}}{\sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{D_{\max} / 2}} \quad (21)$$

O segundo segmento, correspondente ao conjunto de agregados granulares grossos, pertencente ao domínio das dimensões entre $D_{\max}/2$ e D_{\max} , é definido pela função:

$$p(d) = \frac{(100 - y) \times \sqrt[5]{d} + y \times \sqrt[5]{D_{\max}} - 100 \times \sqrt[5]{D_{\max} / 2}}{\sqrt[5]{D_{\max}} - \sqrt[5]{D_{\max} / 2}} \quad (22)$$

Quadro 5 – Parâmetro A da curva granulométrica de Faury [37].

Areia roladas e agregados grossos britados	Areias e agregados grossos rolados
20 + valor do abaixamento pretendido, em cm	18 + valor do abaixamento pretendido, em cm

Quadro 6 – Parâmetro B da curva granulométrica de Faury [37].

Compactação potente	Compactação média	Compactação fraca
1,0	1,5	2,0

Para mais fácil aplicação e uma vez que se conhecem as dosagens de cimento e eventuais adições, uma curva granulométrica pode ser transformada através da expressão (23) numa curva que considera apenas os agregados. Fazendo a transformação à curva granulométrica de Faury, o primeiro e segundo segmentos são definidos pelas equações (24) e (25), respetivamente [1], [37], [38].

$$p'(d) = (p(d) - p_{c+s}) \times \frac{100}{100 - p_{c+s}} \quad (23)$$

$$p'(d) = \left\{ \left[y \times \frac{\sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{d}}{\sqrt[5]{0,0065} - \sqrt[5]{D_{\max} / 2}} \right] - p_{c+s} \right\} \times \frac{100}{100 - p_{c+s}} \quad (24)$$

$$p'(d) = \left\{ \left[\frac{(100 - y) \times \sqrt[5]{d} + y \times \sqrt[5]{D_{\max}} - 100 \times \sqrt[5]{D_{\max} / 2}}{\sqrt[5]{D_{\max}} - \sqrt[5]{D_{\max} / 2}} \right] - p_{c+s} \right\} \times \frac{100}{100 - p_{c+s}} \quad (25)$$

Em que:

- $p'(d)$ é a percentagem de passados no peneiro de malha e abertura d , em volume absoluto do conjunto de agregados;
- p_{c+s} é a percentagem em volume absoluto de ligante em relação à totalidade do material sólido. Pode calcular-se pela expressão:

$$p_{c+s} = \frac{c+s}{1-I} \times 100 \quad (26)$$

A curva granulométrica de uma mistura é definida, em função da série de peneiros utilizada, pela expressão:

$$p_{\text{mistura}}(d_j) = \sum_{i=1}^n p_i \times p_i(d_j) \quad (27)$$

Em que:

- $p_{\text{mistura}}(d_j)$ é a percentagem da mistura, das n classes de agregados utilizados, que passa através do peneiro e malha d_j ;
- p_i é a proporção, em volume absoluto, com que o agregado i entra na mistura;
- $p_i(d_j)$ é a percentagem do agregado da classe i que passa através do peneiro de malha d_j .

As curvas granulométricas da mistura e de referência devem ser ajustadas de forma a minimizar o erro Δ_j , para todos os valores de d_j , definido como:

$$\Delta_j = p_{\text{mistura}}(d_j) - p'(d) \quad (28)$$

O ajustamento das curvas granulométricas da mistura e de referência pode ser realizado utilizando um método gráfico ou um método analítico [36], [37].

6.3.4. Formulação de BER

A complexidade da formulação de BER levou ao desenvolvimento de vários métodos onde são apresentadas expressões e metodologias para definir uma apropriada combinação de constituintes de forma a garantir as propriedades requeridas para o BER [12], [16], [54], [74]–[77]. A composição obtida através dos métodos existentes deve ser comprovada através da realização de amassaduras experimentais e ensaios de caracterização.

O ACI 363R-97 [16] apresenta um método de formular BER com um conjunto de procedimentos e valores tabelados para os vários parâmetros envolvidos. Mehta e Aïtcin [12]

propuseram um método simplificado, onde são apresentadas as quantidades recomendadas dos vários constituintes e as etapas a seguir, para a formulação de betões com valores de resistência à compressão até 120 MPa.

De Larrard [12] apresentou uma expressão, aplicável para BER que tenham sílica de fumo como adição, baseada na fórmula de Feret que relaciona a resistência à compressão do betão aos 28 dias com a constituição da pasta ligante e o tipo de agregados (Eq. 29). Outra expressão, que relaciona os mesmos parâmetros, foi sugerida por Gutiérrez e Cánovas [54]. Fernandes [38] validou a expressão de De Larrard no seu trabalho experimental e refere que os resultados obtidos pela expressão sugerida por Gutiérrez e Cánovas não se mostraram tão adequados.

$$f_c = \frac{k_g \times R_c}{\left[1 + \frac{3,1 \times A / C}{1,4 - 0,4 \exp(-11 \times S / C)} \right]} \quad (29)$$

Em que:

- f_c é a resistência à compressão do betão em cilindros, aos 28 dias;
- A/C é a relação água/cimento em massa, por unidade de volume de betão;
- S/C é a relação sílica de fumo/cimento em massa, por unidade de volume de betão;
- k_g é um parâmetro que depende do tipo de agregados;
- R_c é a resistência do cimento aos 28 dias.

No que respeita ao método a usar para quantificar as proporções dos agregados para fabricar um BER, Fernandes [38] afirma que não existe consenso, existindo trabalhos onde foram usadas diferentes leis granulométricas de referência, alguns procedimentos experimentais empíricos ou a adoção de composições experimentais anteriormente validadas.

7. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO DE ELEVADA RESISTÊNCIA

Nesta secção são apresentados os materiais seleccionados e os procedimentos realizados para o desenvolvimento de um BER destinado à execução de modelos de laje fungiforme, para posterior ensaio ao punçoamento.

Pretende-se produzir um betão com resistência à compressão na ordem dos 130 MPa e classe de abaixamento S4 ou superior, de acordo com a NP EN 206-1 [43] e com a recomendação do Guia para a utilização da NP EN 206-1 [41].

7.1. Materiais seleccionados

A seleção dos materiais foi realizada considerando apenas os correntemente disponibilizados no mercado, de forma a evitar o aumento do custo de produção do betão devido à inclusão de um material de comercialização reduzida.

O cimento selecionado para o estudo de um BER foi o Portland do tipo I e da classe 52,5R, fabricado pela Cimpor – Cimentos de Portugal, S.A. no seu Centro de Produção de Alhandra. O cimento foi fornecido a granel e foi armazenado em recipientes estanques com capacidade de cerca 60 litros. A quantidade total de cimento utilizada em toda a campanha experimental foi recolhida do mesmo lote de produção.

Os ensaios de caracterização da composição química e das propriedades físicas e mecânicas do lote de cimento usado neste estudo foram realizados no Laboratório de Controlo de Qualidade do Grupo Cimpor (Quadro 7).

Quadro 7 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.

	Parâmetro analisado	Resultado
Ensaio químicos	Perda ao fogo (%)	1,46
	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	19,36
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	5,68
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	3,70
	Óxido de cálcio total – CaO (%)	63,32
	Óxido de magnésio – MgO (%)	1,89
	Sulfatos – SO ₃ (%)	2,99
	Óxido de potássio – K ₂ O (%)	1,01
	Óxido de sódio – Na ₂ O (%)	0,13
	Cloretos – Cl ⁻ (%)	0,02
	Cal livre (%)	1,12
	Resíduo insolúvel (%)	1,03
Ensaio físicos	Massa volúmica (kg/dm ³)	3,14
	Superfície de Blaine (cm ² /g)	4070
	Resíduos ≤ 45 µm (%)	5,9
	Água de pasta (%)	31,0
	Início de presa (min.)	120
	Fim presa (min.)	170
Ensaio mecânicos	Expansibilidade (mm)	0,5
	Resistência à compressão – 2 dias (MPa)	40,6
	Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	52,3
	Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	62,2

Como adição foi usado um produto à base de sílica de fumo com a designação Sikacrete HD fornecido pela Sika Portugal S.A.. A ficha técnica do produto, fornecida pelo fabricante, indica a produção de BER como uma das utilizações recomendadas para este material, sendo as principais características apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Principais características da sílica de fumo Sikacrete HD.

	Parâmetro analisado	Resultado
Ensaio químicos	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	93,2
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	0,17
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	0,15
	Óxido de cálcio total – CaO (%)	0,41
	Óxido de magnésio – MgO (%)	0,12
	Sulfatos – SO ₃ (%)	0,18
	Óxido de potássio – K ₂ O (%)	0,25
	Óxido de sódio – Na ₂ O (%)	0,07
	Cloretos – Cl ⁻ (%)	0,007
	Carbono – C (%)	3,5
Análise granulométrica	<0,2 µm (%)	30,62
	0,2 – 0,5 µm (%)	35,93
	0,5 – 1,0 µm (%)	13,41
	1,0 – 2,0 µm (%)	4,05
	2,0 – 5,0 µm (%)	5,95
	5,0 – 10,0 µm (%)	5,24
	10,0 – 20,0 µm (%)	3,94
20,0 - 1000 µm (%)	0,86	

Como foi referido na secção 6.2.5, a seleção do superplastificante a utilizar tem de ser feita de forma criteriosa, tendo em atenção a sua compatibilidade com os restantes materiais constituintes da pasta ligante. Fernandes [38] estudou a influência de cinco superplastificantes, existentes no mercado em Portugal, na resistência à compressão do betão e no seu comportamento em estado fresco. Os resultados obtidos com o superplastificante Sika ViscoCrete 20 HE mostram a sua compatibilidade com o cimento e adição selecionados, assim como a contribuição para a elevada resistência à compressão e consistência adequada. Deste modo, foi selecionado o superplastificante Sika ViscoCrete 20 HE, cujas principais características são apresentadas no Quadro 9. A dosagem recomendada pelo fabricante varia entre 0,2% e 2,0% sobre o peso do cimento.

Devido à elevada importância atribuída às características dos agregados para o sucesso na produção de um BER, numa fase inicial do estudo foram selecionados agregados grossos provenientes de diferentes centros de produção e com diferentes origens pétreas. Foram analisadas as principais características de agregados grossos de basalto originários do centro de produção de Rio Maior da Lena Agregados S.A. e do centro de produção de Vialonga da Alves Ribeiro, S.A. e agregados grossos de granodiorito do centro de produção de Montemor-o-Novo da Mota-Engil, Engenharia e Construção S.A.. Foram selecionadas duas areias da região, lavadas e de boa qualidade, usadas correntemente na produção de betão convencional.

Quadro 9 – Principais características do superplastificante Sika ViscoCrete 20 HE.

Parâmetro analisado	Resultado
Aspeto	Líquido castanho claro (turvo)
Base química	Base aquosa de polímeros acrílicos modificados
Massa volúmica (kg/dm ³)	1,08 ± 0,02
pH	4,3 ± 1,0
Teor de sólidos (%)	40,0 ± 2,0
Teor em cloretos (%)	≤ 0,1

As principais características físicas e a análise granulométrica dos agregados selecionados são apresentados no Quadro 10 e Quadro 11, respetivamente. As curvas granulométricas dos agregados selecionados são apresentadas na Figura 8 e Figura 9. A caracterização dos agregados foi realizada de acordo com os métodos e procedimentos apresentados nas NP EN 12620 [62], NP EN 1097 [78] e NP EN 933 [79].

Quadro 10 – Propriedades físicas dos agregados selecionados.

Parâmetro	Brita Basalto Rio Maior		Brita Basalto Vialonga		Brita Granodiorito Montemor-o-Novo		Areia lavada da região	
	8/12,5	10/16	4/12	10/16	4/6	6/14	0/2	0/4
Máxima dimensão do agregado (mm)	12,8	13,9	12,9	16,6	5,2	13,3	-	-
Módulo de finura	5,95	6,99	6,39	6,99	5,10	6,53	1,75	3,56
Massa volúmica (kg/dm ³)	2,94	2,97	3,02	3,01	2,82	2,79	2,61	2,62
Índice de forma	SI ₁₅	SI ₁₅	-	-	SI ₃₀	SI ₃₀	-	-
Índice de achatamento	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₃₀	FI ₁₅	FI ₂₀	FI ₂₀	-	-
Absorção de água (%)	1,1	0,9	1,0	0,8	0,7	0,7	-	-
Coefficiente de Los Angeles	LA ₁₅	LA ₁₅	LA ₁₅	LA ₁₅	LA ₂₅	LA ₂₅	-	-

Quadro 11 – Análise granulométrica dos agregados selecionados.

Dimensão dos peneiros (mm)	Brita Basalto Rio Maior		Brita Basalto Vialonga		Brita Granodiorito Montemor-o-Novo		Areia lavada	
	8/12,5	10/16	4/12	10/16	4/6	6/14	0/2	0/4
19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,7	100,0	72,8	97,4	45,8	100,0	91,34	100,0	100,0
9,51	80,0	1,35	55,2	1,3	100,0	44,75	100,0	100,0
4,76	23,0	0,0	5,1	0,1	85,2	1,51	100,0	98,9
2,38	1,5	0,0	0,2	0,0	3,72	0,0	100,0	87,9
1,19	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	99,6	39,9
0,595	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	87,0	11,5
0,297	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,1	4,2
0,149	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,2

O valor da máxima dimensão dos agregados é inferior ao valor máximo recomendado de 14 mm, com exceção dos agregados 10/16 de basalto de Rio Maior. Os valores dos índices de forma e de achatamento indicam que os agregados de Vialonga e os agregados 10/16 de Vialonga têm forma mais próxima da cúbica, contribuindo para o aumento da compacidade da mistura. O coeficiente de desgaste do ensaio de Los Angeles dos agregados de basalto, que pode ser relacionado com a sua resistência mecânica, cumpre os requisitos apresentados na secção 6.2.3, sugerindo que a rocha originária apresenta características mecânicas adequadas para a utilização em BER. Em termos de absorção de água, os agregados de granodiorito são os de melhor qualidade, pois apresentam menores coeficientes de absorção, o que favorece o aumento da trabalhabilidade do betão.

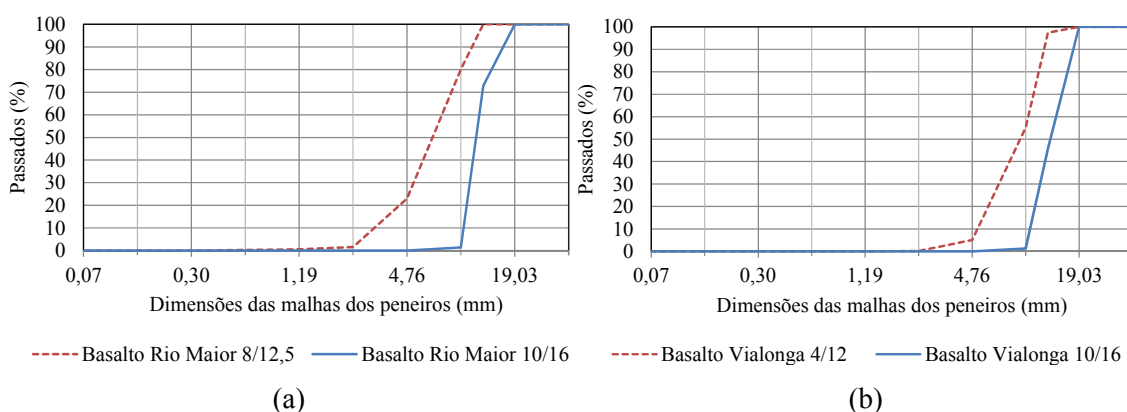


Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados grossos de basalto de Rio Maior (a) e Vialonga (b).

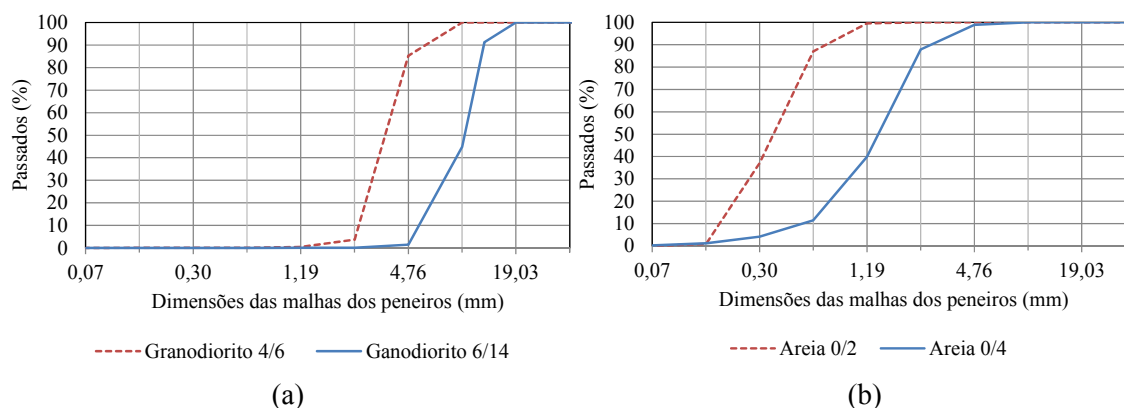


Figura 9 – Curvas granulométricas dos agregados grossos de granodiorito (a) e das areias (b).

7.2. Composições estudadas

Selecionados e caracterizados os materiais a usar no estudo da composição de um BER foi necessário estudar as quantidades que conferem à mistura as propriedades pretendidas. Para todas as composições foi adotado uma dosagem de cimento de 500 kg/m^3 e uma dosagem de sílica de fumo de 10% do peso do cimento, de acordo com os estudos apresentados em 6.2.2. Adotou-se a dosagem máxima de adjuvante recomendada pelo fabricante que é igual a 2% do peso do cimento e da sílica de fumo. A gradação dos agregados foi realizada utilizando a curva granulométrica de referência de Faury, com os parâmetros $A_F=36$ e $B_F=1,5$, de acordo com o Quadro 5 e Quadro 6, respetivamente.

Foram realizadas várias amassaduras experimentais, cujas principais características são apresentadas no Quadro 12. De cada amassadura experimental foram produzidos seis cubos com 150 mm de lado e 12 cubos com 100 mm de lado, com exceção da composição C1, em que apenas se fizeram os cubos com 150 mm de lado. Os moldes foram cobertos com uma manta de serapilheira durante as primeiras 24 horas e foram de seguida colocados num tanque, de acordo com as condições prescritas pela NP EN 12390-2 [80]. Os provetes foram mantidos em cura húmida até ao dia anterior dos ensaios, que foram realizados aos 7 e 28 dias no caso dos provetes cúbicos com 150 mm de lado e 7, 28 e 60 dias nos provetes cúbicos de 100 mm de lado, de acordo com a NP EN 12390-3 [81].

Os procedimentos tomados nas amassaduras foram os seguintes:

- Introdução dos agregados (Figura 10 (a));
- Mistura dos agregados (Figura 10 (b));
- Introdução do cimento e da sílica de fumo;
- Mistura dos componentes já introduzidos;
- Introdução da água;

- Mistura durante 1 minuto;
- Introdução do superplastificante (Figura 11 (a));
- Mistura durante 5 minutos (Figura 11, (b)).



Figura 10 – Agregados introduzidos (a) e após mistura dos agregados (b).



Figura 11 – Após introdução do superplastificante (a) e aspeto final do betão (b).

Quadro 12 – Composições experimentais estudadas.

Material	Composição							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
Cimento (kg/m^3)	500							
Sílica de fumo (kg/m^3)	50							
Superplastificante (kg/m^3)	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02	8,43	
Água (l/m^3)	146,4	144,7	147,9	146,4	147,9	139,1	139,1	
Relação Água/Cimento	0,293	0,289	0,296	0,293	0,296	0,278	0,278	
Relação Água/(Cimento + Adição)	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,25	0,25	
Basalto Rio	8/12,5	829	-	-	830	-	837	839

Maior (kg/m ³)	10/16	246	-	-	250	-	248	249
Basalto	4/12	-	914	-	-	-	-	-
Vialonga (kg/m ³)	10/16	-	109	-	-	-	-	-
Granodiorito	4/6	-	-	302	-	302	-	-
(kg/m ³)	6/14	-	-	731	-	731	-	-
Areia	0/2	235	69	255	238	255	243	245
(kg/m ³)	0/4	486	729	454	486	454	489	489
Δ_{total} (Equação 28)		0,686	2,407	1,367	0,686	1,367	0,675	0,673
Abaixamento (cm)		23	22	24	24	24	22	19
$f_{cc,150}$ (MPa)	7 dias	101,2	92,7	97,4	108,2	100,7	111,8	113,6
	28 dias	113,7	105,4	111,8	119,6	113,9	125,6	133,3*
$f_{cc,100}$ (MPa)	7 dias	-	94,0	95,6	106,2	102,1	109,2	115,0
	28 dias	-	107,6	109,0	116,7	110,3	123,1	131,7
	60 dias	-	109,0	110,5	118,2	113,8	127,3	135,2

$f_{cc,150}$ - Resistência média à compressão do betão em cubos 150x150x150;

$f_{cc,100}$ - Resistência média à compressão do betão em cubos 100x100x100;

* Os provetes não atingiram a rotura por falta de capacidade da prensa de ensaio.

Inicialmente foram definidas três composições (C1, C2 e C3) utilizando os vários agregados selecionados, tendo o cuidado de alterar os parâmetros que variam em função da máxima dimensão dos agregados. As curvas granulométricas das composições C1, C2 e C3 estão representadas na Figura 12 e Figura 13. Verifica-se que das três composições inicialmente estudadas, a composição C1, em que foram usados agregados de basalto de Rio Maior, é a que melhor ajusta a curva da mistura com a curva de referência utilizada. A composição C2, com agregados de basalto de Vialonga, é a que apresenta maior afastamento entre as curvas de referência e real. Os resultados dos ensaios à compressão dos cubos da composição C2 obtiveram valores ligeiramente inferiores optando-se por excluir os agregados de Vialonga do estudo para obter a composição final de BER. A consistência das várias composições foi da mesma ordem de valores, dentro dos requisitos pretendidos.

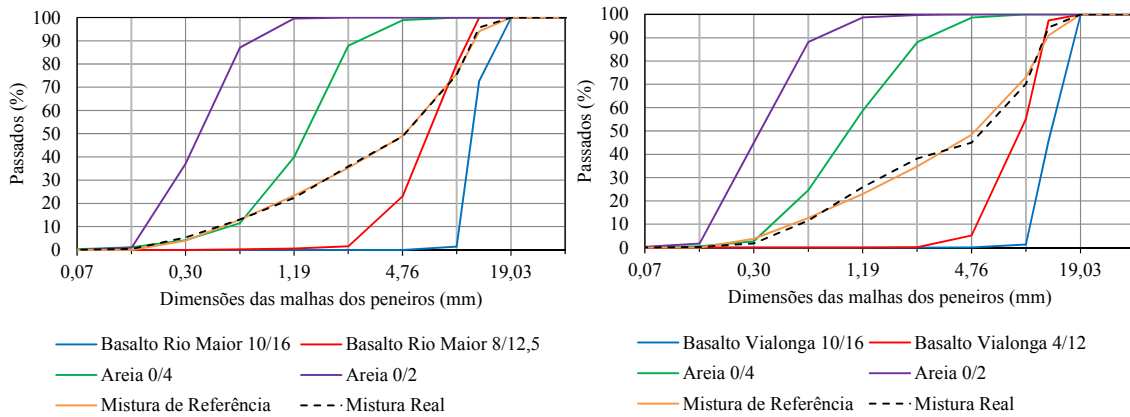


Figura 12 – Curvas granulométricas das composições C1 e C4 (a) e C2 (b).

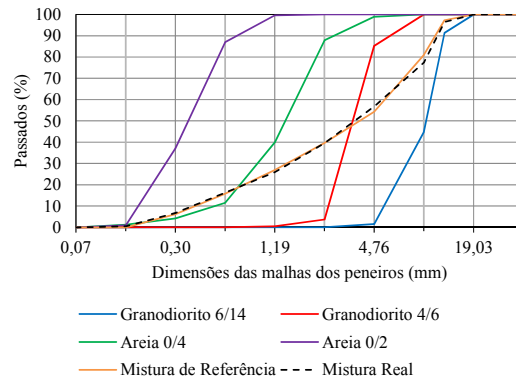


Figura 13 – Curvas granulométricas das composições C3 e C5.

De forma a melhorar a ligação agregado-pasta ligante, e conseqüentemente a resistência à compressão da mistura, optou-se por proceder à lavagem dos agregados, conforme referido em 6.2.3. A Figura 14 apresenta o equipamento utilizado na lavagem dos agregados grossos e aspeto dos agregados de basalto de Rio Maior depois de lavados e secos. As composições C4 e C5, cujos agregados foram lavados, são iguais às C1 e C3, respetivamente.

Os resultados das composições C4 e C5 mostram que a utilização de agregados grossos lavados levou ao aumento da resistência à compressão do betão, no entanto no caso da composição com agregados de granodiorito o incremento de resistência foi insignificante. Em termos de consistência ambas as composições apresentaram valores semelhantes. Como a resistência do betão obtido com a composição C4 é ligeiramente superior à da composição C5, optou-se por tentar otimizar a composição C4 de forma a conseguir um BER com os requisitos propostos.



Figura 14 – Equipamento utilizado na lavagem dos agregados grossos (a) e agregados de basalto depois de lavados e secos (b).

De forma otimizar a composição C4 reduziu-se a relação água/cimento para 0,28 na composição C6 e na composição C7 reduziu-se ainda a dosagem de superplastificante para 1,5 % do peso do cimento e da sílica de fumo. Uma vez que as quantidades de agregados não alteram significativamente, conforme se pode observar pelo Quadro 12, as curvas granulométricas das composições C6 e C7 são muito semelhantes às da composição C1, representada na Figura 12, pelo que se considera desnecessária a sua apresentação.

A composição C6 apresentou 22 cm de abaixamento, sendo enquadrada na classe de consistência S5. A resistência à compressão do BER obtida pela composição C6, com relação água/cimento de 0,278, foi de 125,6 MPa aos 28 dias em provetes cúbicos com 150 mm de aresta, registando um aumento em cerca de 10% em relação à composição C5 em que a relação água/cimento era de 0,293.

Os resultados dos ensaios à compressão dos provetes da composição C7, em que se manteve a relação água/cimento da composição C6 e baixou a dosagem de superplastificante para 1,5 % dos pesos do cimento e da sílica de fumo, foram ligeiramente superiores aos da composição C6. Não foi possível levar à rotura os provetes cúbicos com 150 mm de aresta da composição C7 devido à capacidade da prensa de ensaio estar limitada a 3000 kN, correspondendo a uma tensão de 133,3 MPa. Os cubos com 100 mm de aresta registaram uma tensão média à compressão de 135,2 MPa. A redução da dosagem e superplastificante levou à redução do abaixamento para 19 cm, continuando a cumprir o requisito desejado da classe de consistência S4 ou superior.

8. CONCLUSÃO

No estudo de uma composição de BER com resistência à compressão da ordem de 130 MPa e classe de consistência S4 ou superior, foram inicialmente selecionados agregados grossos de basalto e granodiorito, provenientes de três centros de produção. Foram também selecionadas

duas areias lavadas e de boa qualidade. Os constituintes da pasta ligante foram, para além da água da rede de abastecimento público, o cimento CEM I 52,5R da Cimpor, uma adição à base de sílica de fumo designada de Sikacrete HD e um adjuvante de terceira geração em base aquosa de polímeros acrílicos modificados designado de Sika ViscoCrete 20 HE.

Para fazer a quantificação dos agregados de forma garantir a maior compacidade possível da mistura, foi usada a curva granulométrica de referência de Faury que mostrou ser apropriada para a composição de BER. Os agregados de basalto de Rio Maior mostraram ser os mais adequados para a produção de um BER, devido às suas propriedades mecânicas e principalmente à distribuição granulométrica das suas partículas que favorece a compacidade da mistura. A lavagem dos agregados grossos revelou-se um fator importante para conseguir obter valores mais elevados de resistência à compressão do betão.

A composição do BER que atingiu as características propostas para este estudo obteve aos 28 dias uma tensão de rotura à compressão, em provetes cúbicos com 150 mm de aresta, superior a 133,3 MPa, não sendo possível determinar o valor máximo devido a ter sido atingida a capacidade de carga da prensa de ensaio. A relação água/cimento da composição final é de 0,278 com uma dosagem de 10% de sílica de fumo e 1,5% de superplastificante.

9. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado no âmbito do projeto HiCon - Uso Racional de Betão de Alta Resistência em Estruturas de Laje Fungiforme Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas (EXPL/EC M-EST/1371/2013), com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

Este projeto sobre o comportamento de lajes fungiformes com a utilização racional de betão de elevada resistência sob a ação de cargas gravíticas e sísmicas deu já origem a várias publicações [82-118], servindo estas de meio de divulgação da investigação realizada.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coutinho, S., *Fabrico e Propriedades do Betão (Volume 1)*, 3rd ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.
- [2] World Business Council For Sustainable Development, “The Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete.” 2010.
- [3] McCromac, J. C. and Brown, R. H., *Design of Reinforced Concrete*, 9th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [4] ACI Committee 222, “Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01).” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, p. 41.
- [5] Hassoun, M. N. and Al-Manaseer, A., *Structural Concrete: Theory and Design*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [6] Wight, J. K. and MacGregor, J. G., *Reinforced Concrete. Mechanics & Design*. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2012.
- [7] Nawy, E. G., *Prestressed Concrete. A Fundamental Approach*, 5th ed. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2010.
- [8] Ghoneim, M. and El-Mihilmy, M., *Design of Reinforced Concrete Structures. (Volume 1)*, 2nd ed. Cairo: Cairo University, 2008.
- [9] Penttala, V., “Concrete and Sustainable Development,” *ACI Mater. J.*, vol. 94, no. 5, pp. 409–416, 1998.
- [10] Sidney Mindess, Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete*, Pearson Ed. New Jersey, 2003.
- [11] Appleton, J., *Estruturas de Betão (volume 1)*. Amadora: Edições Orion, 2013.
- [12] Aïtcin, P., *High Performance Concrete: modern concrete technology 5*. New York: Taylor&Francis, 2004.
- [13] Caldarone, M. A., *High-strength concrete: a practical guide*, 1st ed. New York: Taylor & Francis, 2008.
- [14] Azevedo, A. F. F. L. C. de, “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes,” Universidade do Minho, 2002.
- [15] ACI Committee 363, “Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10).” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- [16] ACI Committee 363, “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-97),” vol. 92, no. Reapproved. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, p. 55, 1997.
- [17] Neville, A. M., *Properties of concrete*, 2nd ed. New york: Wiley, 1994.

- [18] Ghosh, S. K., “High-Strength Concrete in U.S. Codes and Standards,” in XIV Congresso Nacional de Ingeniería Estructural, 2004, no. 847, pp. 1–16.
- [19] fib (Federation International du Beton), “Model Code 2010. Final Draft.” Lausanne, Switzerland, p. 653, 2011.
- [20] IPQ, “NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 259, 2010.
- [21] Kawai, T., “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete in Japan - Recent Developments and Applications,” in Joint Seminar on Concrete Engineering in Vietnam and Workshop, 2005, pp. 87–107.
- [22] Japan Society of Civil Engineers, “Standard Specifications for Concrete Structures - 2002, Materials and Construction.” 2002.
- [23] Laogan, B. T. and Elnashai, A. S., “Structural Performance and Economics of Tall High Strength RC Buildings in Seismic Regions,” *Struct. Des. Tall Build*, vol. 204, no. November 1998, pp. 171–204, 1999.
- [24] Amaro, D. and Fernandes, F., “A aplicação estrutural de betões de elevado desempenho (HPC e UHPC),” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [25] Commbier, L. A., “Diffusion of Innovation in the Construction Industry: High Strength Concretes,” Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [26] Newman, J. and Choo, B. S., *Advanced Concrete Technology: Processes*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [27] Silva, R. do N., “Um estudo sobre o concreto de alto desempenho,” Universidade Estadual de Feira de Santana, 2010.
- [28] Rashid, M. A. and Mansur, M. A., “Considerations in producing high strength concrete,” vol. 37, no. 1, pp. 53–63, 2009.
- [29] Teixeira, S. B., “Betões de Elevada Resistência,” Instituto Superior Técnico, 2007.
- [30] Concrete Bridge Development Group, *High Strength Concrete in Bridge Construction: A State-of-the-Art Report*. Camberley, 2005.
- [31] Azevedo, A. F. F. L. C. de, “Betões de Elevado Desempenho,” in *Inovação em Betões: Nova Normalização e Produção de Betões Especiais*, 2006, p. 112.
- [32] Guo, S.-J. and Tsai, T.-H., “Application of High Performance Concrete on a 85-story High Rise Building in Taiwan,” in *13th Symposium of International Association for Automation and Robotics in Construction*, 1997, pp. 933–940.
- [33] Baker, W. F., James, P., Tomlinson, R. F., and Weiss, A., “Case Study: Trump International Hotel & Tower,” *CTBUH J.*, no. III, pp. 16–22, 2009.

- [34] “Burj Khalifa.” [Online]. Available: <http://www.burjkhalifa.ae/en/>.
- [35] Appleton, J., Travassos, N., and Appleton, J., “Edifício do Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego do Porto de Lisboa,” in Encontro nacional Betão Estrutural, 2000, no. Figura 2, pp. 1–10.
- [36] Coutinho, S., *Fabrico e Propriedades do Betão (Volume 2)*, 3rd ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.
- [37] Lourenço, J., Júlio, E., and Miranda, P., *Betões de Agregados Leves de Argila Expandida. Guia para a sua utilização*. Lisboa: APEB, 2004.
- [38] Fernandes, P. A. L., “Vigas de Grande Vão Prefabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado,” Universidade de Coimbra, 2005.
- [39] ASTM Committee C09, “C33-03 Standard Specification for Concrete Aggregates,” vol. 04. p. 11, 2003.
- [40] ACI Committee 211, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal , Heavyweight , and Mass Concrete (ACI 211 . 1-91).” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
- [41] APEB, *A Especificação do Betão. Guia para a utilização da norma NP EN 206-1*. Lisboa, 2008.
- [42] Faury, J., *Le Béton*. Dunod, Paris, 1958.
- [43] IPQ, “NP EN 206-1: Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 84, 2007.
- [44] IPQ, “NP EN 12350-2: Ensaio do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 11, 2002.
- [45] IPQ, “NP EN 12350-3: Ensaio do betão fresco - Parte 3: Ensaio Vêbê.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 11, 2002.
- [46] IPQ, “NP EN 12350-4: Ensaio do betão fresco - Parte 4: Grau de compactabilidade.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 10, 2002.
- [47] IPQ, “NP EN 12350-5: Ensaio do betão fresco - Parte 5: Ensaio da mesa de espalhamento.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 12, 2002.
- [48] IPQ, “NP EN 12350-1: Ensaio do betão fresco - Parte 1: Amostragem.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 7, 2002.
- [49] Popovics, S., *Concrete Materials*, 2nd ed. New Jersey: Noyes Publications, 1992.
- [50] Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete. Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [51] LNEC, “E378: Betões - guia para a utilização de ligantes hidráulicos.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, p. 11, 1996.

- [52] IPQ, “NP EN 197-1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, 2012.
- [53] IPQ, “NP EN 196: Métodos de ensaio de cimentos.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, 2006.
- [54] Gutiérrez, A. and Cánovas, M. F., “High-Performance Concrete : Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning,” no. 93, 1996.
- [55] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Teutbecher, T., and Fröhlich, S., *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples*. Berlin: Ernest & Sohn, 2014.
- [56] Kwan, a. K. H., Chen, J. J., Fung, W. W. S., and Ng, P. L., “Effects of silica fume on heat generation of curing concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 108, no. 6, pp. 655–663, 2011.
- [57] Ding, J. T. and Li, Z., “Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 99, no. 4, pp. 393–398, 2002.
- [58] Magnusson, J., “Structural Concrete Elements Subjected to Air Blast Loading,” KTH Royal Institute of Technology, 2007.
- [59] IPQ, NP EN 13263-1: Sílica de fumo para betão - Parte 1: Definições, requisitos e critérios de qualidade. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2005.
- [60] IPQ, “NP EN 13263-2: Sílica de fumo para betão - Parte 2: Avaliação da conformidade.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, 2005.
- [61] Ismeik, M., “Effect of Mineral Admixtures on Mechanical Properties of High Strength Concrete Made with Locally Available Materials,” *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 78–90, 2009.
- [62] IPQ, “NP EN 12620: Agregados para betão.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 61, 2010.
- [63] Xincheng, P., *Super-High-Strength High Performance Concrete*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013.
- [64] Costa, A. and Appleton, J., “Estruturas de Betão I: Parte 2 - Materiais.” Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, p. 66, 2002.
- [65] Su, N. and Chang, T.-P., “Estimation of Coarse Aggregate Strength in High-Strength,” *ACI Mater. J.*, vol. 93, no. 1, p. 9, 1996.
- [66] Aïtcin, P.-C. and Mehta, P. K., “Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 87, no. 2, pp. 103–107, 1990.
- [67] IPQ, “NP EN 1008: Água de amassadura para betão. Especificações para amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, 2003.

- [68] IPQ, “NP EN 934-2: Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção - Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, 2009.
- [69] Baroninsh, J., Lagzdina, S., Krage, L., and Shahmenko, G., “Influence of the dosage of super plasticizer on properties of high performance concrete,” in 5th Batlic Conference on Silicate Materials - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2011, vol. 25, p. 6.
- [70] Zeng, C. S., Gong, M. Z., Gui, M. M., Guo, X. Q., Liu, J. X., and Lin, T. X., “Influence of Superplasticizer on Anti-Carbonation Property of Concrete,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 204–208, no. 3, pp. 3790–3794, 2012.
- [71] Plank, J., Schroeﬂ, C., Gruber, M., Lesti, M., and Sieber, R., “Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 5–12, 2009.
- [72] Júlio, E., Dias, N., Lourenço, J., and Silva, J., “Ferret coefficients for white self-compacting concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 39, pp. 585–591, 2005.
- [73] Mechling, J. M., Lecomte, A., and Diliberto, C., “Relation between cement composition and compressive strength of pure pastes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 4, pp. 255–262, 2009.
- [74] De Larrard, F. and Sedran, T., “Mixture-proportioning of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 1699–1704, 2002.
- [75] Sobolev, K., “The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 901–907, 2004.
- [76] Alves, M. F., Cremonini, R. a., and Dal Molin, D. C. C., “A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 613–621, 2004.
- [77] Bharatkumar, B. H., Narayanan, R., Raghuprasad, B. K., and Ramachandramurthy, D. S., “Mix proportioning of high performance concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, pp. 71–80, 2001.
- [78] IPQ, “NP EN 1097 - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 33, 2003.
- [79] IPQ, “NP EN 933 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 16, 2000.
- [80] IPQ, “NP EN 12390-2: Ensaios do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, p. 11, 2003.
- [81] IPQ, “NP EN 12390-3: Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 21, 2003.

- [82] RAMOS, A. M. P. e LÚCIO, V. - Post-Punching Behaviour of Prestressed Concrete Flat Slabs. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, 60, no. 4, Maio, 2008.
- [83] FARIA, D., BISCAIA, H., LÚCIO, V. e RAMOS, A – *Punching of reinforced concrete slabs and experimental analysis and comparison with codes*. Proceedings of IABSE-Fib Codes in Structural Engineering – Developments and Needs for International Practice, Cavtat, Dubrovnik, Croácia, Maio 2010.
- [84] GOMES, J. e RAMOS, A. *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes Reforçadas com Armadura Transversal Aderente Pós-Instalada*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.
- [85] PAIAS, J. e RAMOS, A. - *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes de Betão Reforçado com Fibras de Aço*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.
- [86] RAMOS, A. P., LÚCIO, V e REGAN, P.E. - *Punching of flat slabs with in-plane forces*, Engineering Structures, Volume 33, Issue 3 , Março, 2011.
- [87] FARIA, D.; LÚCIO, V.; RAMOS, A. – *Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding*. Engineering and Structures, Volume 33, Junho 2011, págs. 2025-2043.
- [88] FARIA, D., BISCAIA, H., LÚCIO, V. e RAMOS, A - *Material and geometrical parameters affecting punching of reinforced concrete flat slabs with orthogonal reinforcement*. Short Paper, fib Symposium PRAGUE 2011 – Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, Praga, República Checa, Junho 2011.
- [89] RAMOS, A., LÚCIO, V., FARIA, D. e INÁCIO, M. - *Punching Research at Universidade Nova de Lisboa*. Design Of Concrete Structures and Bridges Using Eurocodes, Bratislava, Eslováquia, Setembro 2011.
- [90] FARIA, D., LÚCIO, V., e RAMOS, A. - *Pull-out and push-in tests of bonded steel strands*. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, Volume 63, Issue 9, pp 689-705, September, 2011.

- [91] FARIA, D., INÁCIO, M., LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Punching of Strengthened Concrete Slabs – Experimental Analysis and Comparison with Codes*, IABSE, Structural Engineering International, No. 2 – “Codes of Practice in Structural Engineering”, Maio 2012.
- [92] GOMES, J. e RAMOS, A. P. - *Punçoamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 1)*. Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 23-33.
- [93] GOMES, J. e RAMOS, A. P. - *Punçoamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 2)*. Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 34-43
- [94] FARIA, D., LÚCIO, V., e RAMOS, A., *Post-Punching Behaviour of Flat Slabs Strengthened with a New Technique using Post-Tensioning*, Engineering Structures, Volume 40, Julho 2012, pp 382-397.
- [95] MAMEDE, N., RAMOS, A. e FARIA, D. - *Análise do efeito de características mecânicas e geométricas que afetam o comportamento ao Punçoamento de lajes fungiformes*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.
- [96] FARIA, D.; LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Reforço de lajes com recurso a pós-tensão com ancoragens por aderência*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.
- [97] INÁCIO, M.; RAMOS, A.; LÚCIO, V. e FARIA, D. - *Punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos – efeito da área e posicionamento da ancoragem*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.
- [98] INÁCIO, M.; RAMOS, A.; FARIA, D. – *Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches*. Engineering and Structures, Volume 44, Novembro 2012, págs. 63-77.
- [99] CLÉMENT, T., RAMOS, A. P., FERNÁNDEZ RUIZ, M. e MUTTONI, A. - *Design for punching of prestressed concrete slabs*. Structural Concrete, 14: 157–167. 2013.

- [100] MAMEDE, N.; RAMOS, A., FARIA, D. – *Experimental and parametric 3D nonlinear finite element analysis on punching of flat slabs with orthogonal reinforcement*. Engineering and Structures, Volume 48, Março 2013, p. 442-457.
- [101] INÁCIO, M.; RAMOS, A., LÚCIO, V. e FARIA, D. - *Punching of High Strength Concrete Flat Slabs - Experimental Investigation*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, 4p, Tel Aviv, Abril de 2013.
- [102] FARIA, D.; LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Development of a Design Proposal for a Slab Strengthening System using Prestress with Anchorages by Bonding*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril 2013.
- [103] GOUVEIA, N.; FERNANDES, N., FARIA, D.; RAMOS A. e LÚCIO, V. - *Punching of Steel Fibre Reinforcement Concrete Flat Slabs*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril, 2013.
- [104] SILVA, R.; FARIA, D.; RAMOS, A.; INÁCIO, M. - *A physical approach for considering the anchorage head size influence in the punching capacity of slabs strengthened with vertical steel bolts*, Structural Concrete, Junho, 2013.
- [105] Nuno D. Gouveia, Nelson A.G. Fernandes, Duarte M.V. Faria, António M.P. Ramos, Válder J.G. Lúcio, *SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research*, Composites Part B: Engineering, Volume 63, July 2014, Pages 161-171, ISSN 1359-8368, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.005>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814001486>)
- [106] Thibault Clément, António Pinho Ramos, Miguel Fernández Ruiz, Aurelio Muttoni, *Influence of prestressing on the punching strength of post-tensioned slabs*, Engineering Structures, Volume 72, 1 August 2014, Pages 56-69, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.034>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614002478>)
- [107] A. Pinho Ramos, Válder J.G. Lúcio, Duarte M.V. Faria, *The effect of the vertical component of prestress forces on the punching strength of flat slabs*, Engineering Structures, Volume 76, 1 October 2014, Pages 90-98, ISSN 0141-0296,

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.039>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614003952>)
- [108] Duarte M. V. Faria, Jürgen Einpaul, António M. P. Ramos, Miguel Fernández Ruiz, Aurelio Muttoni, *On the efficiency of flat slabs strengthening against punching using externally bonded fibre reinforced polymers*, Construction and Building Materials, Volume 73, 30 December 2014, Pages 366-377, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.084>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011003>)
- [109] Micael M.G. Inácio, André F.O. Almeida, Duarte M.V. Faria, Válter J.G. Lúcio, António Pinho Ramos, *Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement*, Engineering Structures, Volume 103, 15 November 2015, Pages 275-284, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.010>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615005738>)
- [110] Gouveia, N.D., Faria, D.M.V. e Ramos, A. M. P. *Punçoamento em lajes de betão com fibras de aço*. Revista Internacional tech ITT, Nº 34, Outubro de 2013, Vol. 11, 22-31.
- [111] Válter Lúcio, Duarte Faria, António Ramos e João Ferreira, *Reabilitação Estrutural de Edifícios com Pós-Tensão*, REHABEND 2014, Santander, Espanha, April 2014, pp 1591-1599, DOI: 10.13140/2.1.2334.0807.
- [112] Nuno Gouveia, Ana Luísa Custódio, Duarte Faria, António Ramos, *A Minimization Procedure for the Determination of SFRC Tensile Behaviour*, EngOpt 2014, 4th International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, September 2014, DOI: 10.13140/2.1.1416.5767.
- [113] André Almeida, Micael Inácio, Válter Lúcio and António Ramos, *Flat Slab Punching Behaviour under Cyclic Horizontal Loading*, Short Paper, Proceedings of fib symposium Copenhagen 2015, Concrete – Innovation and Design, 2p, Copenhagen, Denmark, May 2015.
- [114] Gouveia, N.D., Custódia, A.L., Faria, D.M., Ramos, A.P. *Determinação de Relações Tensão-Abertura de Fendas de BRFA através de Análise Inversa*, 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, Outubro de 2014.

- [115] André Almeida, Micael Inácio, Válder Lúcio e António Ramos. *Punçoamento em Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas horizontais – Estudo Experimental*, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9^o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [116] Elaine Albuquerque, Guilherme Melo, António Ramos e Válder Lúcio. *Estudo Teórico-Experimental da Resistência ao Punçoamento de Lajes Fungiformes de Betão Aramado com Pilar de Canto Reentrante sem Armadura de Punçoamento*, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9^o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [117] Nuno Mamede, Duarte Faria e António Ramos. *Análise Numérica do Punçoamento em Lajes Fungiformes Pré-Esforçadas*, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9^o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [118] Micael Inácio, Duarte Faria, Válder Lúcio e António Ramos. *Punçoamento em Lajes Fungiformes de Betão de Elevada Resistência – Estudo Experimental*, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9^o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.