

**ESTUDO DE UM BETÃO COMPACTADO COM CILINDROS
APLICADO A BARRAGENS**

Tiago Alexandre Silva Marques

(Licenciado em Ciências de Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa,

Orientador: Doutora Teresa Santana

Júri

Presidente: Doutor Válder Lúcio

Vogais: Doutora Teresa Santana

Doutor Pedro Guedes de Melo

Dezembro de 2008

2008 – DEC/FCT/JNL

ESTUDO DE UM BETÃO COMPACTADO COM CILINDROS APLICADO A BARRAGENS

TIAGO MARQUES

Índice

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Índice de Figuras

Índice de Gráficos

Índice de Tabelas

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Apresentação e Enquadramento	1.1
1.2 Evolução Histórica do BCC em Barragens	1.3
1.3 Vantagens e Desvantagens associadas ao uso do BCC em Barragens	1.10
1.4 Tendências Actuais de Projecto.....	1.11
1.5 Experiencia Portuguesa – Caso Pedrógão	1.12

Capítulo 2 – Formulação de um BCC

2.1 Generalidades	2.1
2.2 Materiais Constituintes	2.2
2.2.1 Agregados	2.2
2.2.2 Ligantes.....	2.6
2.2.3 Água.....	2.8
2.2.4 Adjuvantes	2.9
2.3 Metodologias de Formulação de um BCC	2.10
2.3.1 Métodos Análogos aos do Betão Convencional	2.10

2.3.2 Metodologia Baseada nos Conhecimentos da Compactação da Mecânica dos Solos.....	2.14
2.4 Experiencia Portuguesa – Caso Pedrógão	2.16
Capitulo 3 – Construção em BCC	
3.1 Generalidades	3.1
3.2 Organização e Localização do Estaleiro.....	3.2
3.3 Fabrico da Mistura.....	3.5
3.4 Propriedades da Mistura	3.7
3.4.1 Massa Volúmica	3.8
3.4.2 Quantidade de Água na Mistura à Saída da Misturadora	3.8
3.4.3 Trabalhabilidade e Consistência	3.9
3.4.4 Calor Gerado.....	3.10
3.5 Preparo da Fundação	3.10
3.6 Transporte da Mistura.....	3.11
3.7 Colocação e Espalhamento	3.14
3.8 Compactação	3.18
3.8.1 Compactação em Zona Corrente	3.18
3.8.2 Compactação em Zona de Cofragens, Paramentos e Galerias	3.19
3.8.3 Plataforma Experimental	3.21
3.9 Cura	3.22
3.10 Juntas	3.23
3.10.1 Juntas Horizontais de Construção.....	3.23
3.10.2 Juntas Verticais de Contracção.....	3.25

3.11 Paramentos	3.26
3.12 Órgãos Incorporados	3.28
3.13 Instrumentação	3.29
3.14 Controlo de Qualidade e de Execução.....	3.30

Capítulo 4 - Propriedades do Betão Endurecido

4.1 Generalidades	4.1
4.2 Características Mecânicas.....	4.1
4.2.1 Resistência à Compressão.....	4.1
4.2.2 Resistência à Tracção	4.5
4.2.3 Resistência ao Corte	4.6
4.3 Deformabilidade	4.7
4.3.1 Módulo de Elasticidade	4.7
4.3.2 Coeficiente de Poisson.....	4.8
4.4 Fluência e Capacidade de Deformação	4.8
4.5 Retracção	4.8
4.6 Propriedades Térmicas	4.9
4.7 Permeabilidade	4.9
4.8 Durabilidade	4.10

Capítulo 5 – Formulação de um BCC em Laboratório

5.1 Generalidades	5.1
5.2 Aplicação da Metodologia Geotécnica.....	5.2
5.2.1 Descrição	5.2
5.2.2 Selecção dos Materiais Constituintes	5.3

5.2.3	Preparação dos Provetes e Ensaios de Compactação.....	5.3
5.2.4	Estabelecimento de Dosagens.....	5.7
5.3	Programa de Ensaios	5.8
5.3.1	Propriedades dos Materiais Constituintes.....	5.8
5.3.2	Preparação dos Provetes	5.12
5.4	Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais	5.15
5.5	Conclusões.....	5.19

Capítulo 6 – Considerações Finais

6.1	Considerações Finais	6.1
-----	----------------------------	-----

Bibliografia

Anexos

Anexo I – Folhas Excel de Combinação de Agregados;

Anexo II – Resultados Obtidos nos Ensaios de Compactação;

Anexo III – Protocolo Experimental para Efectuar um BCC em Laboratório;

Índice de Figuras

Figura 1.1. Construção da barragem Alpe Gera	1.4
Figura 1.2. Barragem de Ohkawa no Japão	1.5
Figura 1.3. Barragem de Shimajigawa	1.6
Figura 1.4. Barragem de Tamagawa.....	1.6
Figura 1.5. Barragem de Willow Creek.....	1.7
Figura 1.6. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 1985	1.7
Figura 1.7. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 1995	1.8
Figura 1.8. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano em 1996	1.8
Figura 1.9. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano em 2002	1.8
Figura 1.10. Localização da barragem em relação a Alqueva.....	1.13
Figura 1.11. Secção transversal da barragem do Pedrógão	1.14
Figura 1.12. Desenvolvimento em planta da barragem do Pedrógão	1.14
Figura 1.13. Aspecto da barragem do Pedrógão em funcionamento.....	1.15
Figura 2.1. Esquema de montagem do ensaio vêbê.....	2.11
Figura 2.2. Relação entre resistência à compressão e relação água ligante.....	2.11
Figura 2.3. Fuso granulométrico proposto por Reeves and Yeats (1985)	2.15
Figura 2.4. Fuso granulométrico dos agregados utilizados na barragem do Pedrógão	2.18
Figura 2.5. Optimização da compactação dos agregados finos para um mínimo de vazios.....	2.19
Figura 3.1. Lavagem dos rodados à entrada em obra	3.4
Figura 3.2. Zona de produção do BCC na barragem do Pedrógão.....	3.5
Figura 3.3. Misturadora contínua “Pugmill”	3.6
Figura 3.4. Esquema de misturadora Continua Australiana	3.7

Figura 3.5. Misturadora de Tambor.....	3.7
Figura 3.6. Relação entre porosidade e a quantidade de água numa mistura de BCC ...	3.9
Figura 3.7. Preparação de fundação para barragem em BCC.....	3.11
Figura 3.8. Transporte da mistura através de tapetes rolantes na barragem de Berña Espanha.....	3.12
Figura 3.9. Transporte da mistura por camiões	3.13
Figura 3.10. Transporte da mistura por um sistema misto	3.13
Figura 3.11. Comparação entre espalhamento de um betão convencional e um BCC.	3.14
Figura 3.12. Etapas da colocação do BCC em obra pelo método comum de colocação em camadas horizontais.....	3.16
Figura 3.13. Etapas da colocação do BCC em obra pelo método rampado	3.16
Figura 3.14. Espalhamento da mistura de BCC na barragem de Wadi Dayqah.....	3.17
Figura 3.15. Compactação de uma camada de BCC	3.18
Figura 3.16. Aspecto do BCC depois de compactado na barragem de Koudiat Acerdoune.....	3.19
Figura 3.17. Compactação junto à rocha com equipamento manual	3.20
Figura 3.18. Preenchimento com Betão convencional junto à cofragem	3.20
Figura 3.19. Cura do BCC através de nebulizadores.....	3.22
Figura 3.20. Esquema de formação de uma junta fria	3.23
Figura 3.21. Mistura de ligação entre camadas	3.24
Figura 3.22. Colocação da mistura de ligação em obra.....	3.24
Figura 3.23. Materialização de uma junta de contracção na barragem do Pedrógão ...	3.25
Figura 3.24. Construção do paramento jusante na barragem de Pedrógão.....	3.27
Figura 3.25. Galeria de visita.....	3.29

Figura 3.26. Colocação de termómetros embutidos no BCC	3.30
Figura 4.1. Curvas de resistência à compressão associadas a um BCC formulado com agregados de boa qualidade	4.2
Figura 4.2. Curvas de resistência à compressão associadas a um BCC formulado com agregados de menor qualidade	4.3
Figura 4.3. Relação consumo de cimento (kg/m^3) e resistência à compressão	4.3
Figura 4.4. Relação consumo de cimento com pozolanas (kg/m^3) e resistência à compressão	4.4
Figura 4.5. Comparação entre as resistências à tracção obtidas em laboratório e obtidas em campo	4.3
Figura 4.6. Comparação entre o módulo de elasticidade de um BCC formulado em laboratório e um BCC formulado em obra	4.3
Figura 5.1. Equipamento de ensaio do DEC	5.5
Figura 5.2. Curva de compactação de uma mistura	5.6
Figura 5.3. Curva granulométrica dos agregados utilizados na formulação de um BCC em laboratório	5.9
Figura 5.4. Curva granulométrica das misturas de agregados doseadas	5.11
Figura 5.5. Aspecto de mistura de BCC	5.13
Figura 5.6. Compactação das camadas no molde Proctor Pesado	5.14
Figura 5.7. Descofragem de um Provelte compactado com auxílio de macaco hidráulico.....	5.15
Figura 5.8. Sobreposição das curvas granulométricas obtidas nos ensaios de laboratório.....	5.17
Figura 5.9. Variação do peso volúmico seco em função da quantidade de filer utilizada na formulação da mistura	5.19

Índice de Gráficos

Gráfico 1.1. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 2005.....	1.9
Gráfico 1.2. Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 2008.....	1.10
Gráfico 2.1. Número de dimensões de agregados usados na formulação de misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 1996	2.3
Gráfico 2.2. Número de dimensões de agregados usados na formulação de misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 2002	2.4
Gráfico 2.3. Material ligante utilizado nas misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 1996	2.6
Gráfico 2.4. Material ligante utilizado nas misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 2002	2.7
Gráfico 2.5. Calor de hidratação resultante do uso de pozolanas.....	2.8

Índice de Tabelas

Tabela 1.1. Estudos efectuados em Portugal para construção de barragens em BCC..	1.13
Tabela 2.1. – Dosagens estimadas nas composições de BCC	2.13
Tabela 2.2. - Propriedades dos agregados utilizados em Pedrógão	2.17
Tabela 2.3. - Propriedades do cimento e das cinzas utilizadas em Pedrógão	2.17
Tabela 3.1. Massas específicas de algumas barragens no Mundo	3.8
Tabela 4.1. Valores característicos da resistência à compressão e características de deformabilidade determinados em cilindros de grandes barragens Mundiais.....	4.12
Tabela 4.2. Valores característicos da resistência ao corte determinados em cilindros em grandes barragens Mundiais	4.13
Tabela. 5.1. Características do equipamento Utilizado	5.4
Tabela. 5.2. Características granulometricas dos agregados utilizados na formulação de um BCC em laboratório.....	5.9
Tabela. 5.3. Percentagens das classes de agregados no total dos agregados.....	5.10
Tabela. 5.4. Percentagens de passados acumulados das misturas de agregados estudadas	5.9
Tabela 5.5. Quantidades dos agregados em (kg) nas misturas função do peso seco da mistura de agregados necessária para efectuar um provete 6kg.....	5.12
Tabela 5.6. Quantidades de água a adicionar nas amassaduras.....	5.13
Tabela 5.7. Condições dos ensaios de compactação realizados	5.14
Tabela 5.8. Valores obtidos nos ensaios de compactação	5.16
Tabela 5.9. Resumo dos ensaios de compactação realizados	5.18

AGRADECIMENTOS

O estudo a que me propus não estaria concluído sem expressar os meus profundos agradecimentos a todos aqueles que, de uma ou outra forma, contribuíram para que este importante passo na minha formação académica pudesse ser dado.

Um especial agradecimento, por isso, à Professora Maria Teresa Santana, cuja orientação, dedicação e estímulo foram fundamentais para o desenvolvimento dos trabalhos.

Agradeço também ao Professor António Lopes Baptista do Departamento de Barragens do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e ao Professor Fernando Pinho docente na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por toda a vontade, disponibilidade, e pelo número de elementos fornecidos.

Não poderia também deixar de agradecer ao Professor Rocha de Almeida que durante todo o percurso académico se revelou acima de professor um grande amigo.

O meu muito obrigado, a José Gaspar e Jorge Silvério, funcionários do DEC- FCT pelo tempo dispensado e por toda a ajuda fornecida durante os ensaios experimentais.

Agradeço ainda à minha família, principalmente pais e irmã por toda a paciência, apoio e disponibilidade, mas sobretudo por todo o amor e carinho nos momentos mais difíceis.

Por fim agradeço a todos os meus colegas e amigos da FCT que dedicaram tempo para me apoiarem.

RESUMO

A presente dissertação tem como objectivo contribuir para o conhecimento, no país, desta nova técnica de construção de barragens, de Betão Compactado com Cilindros (BCC), que surge no início dos anos 70. No entanto, em Portugal, apenas se aplicou pela primeira vez no ano de 2004, na Barragem do Pedrógão (a jusante da barragem de Alqueva), aparecendo assim, aquela barragem, como referência prática, citada ao longo do trabalho.

Deste modo, é apresentado o material BCC e a sua evolução histórica, seguindo-se a descrição das principais etapas envolvidas quer durante a formulação do material, quer durante o processo construtivo de barragens que utilizam esta técnica.

Após referência a algumas propriedades necessárias a um bom desempenho, é apresentada a metodologia geotécnica, para a formulação de um BCC, como a mais próxima da realidade de aplicação deste betão. Uma aplicação desta metodologia constitui a base do estudo experimental desenvolvido, tendo-se feito uma selecção prévia de materiais disponíveis e estudado o procedimento de ensaio a adoptar. Compararam-se assim as características de compactação de cinco misturas doseadas com diferentes quantidades de filler, mantendo as quantidades de agregados grosseiros e a quantidade de cimento. As dosagens e propriedades físicas obtidas estão de acordo com valores habituais neste tipo de barragens, sendo a mistura com maior dosagem de filler aquela que apresentou maior densidade e, conseqüentemente, menor índice de vazios.

ABSTRACT

The present dissertation aims to contribute to the knowledge of this new technique of construction of dams, Roller Compacted Concrete (RCC), which appeared at the beginning of the 70's. Nevertheless, in Portugal, its application for the first time was in the year of 2004, with the construction of Pedrógão dam, downstream of Alqueva dam. So, that dam appears as a practical reference, all over the text.

The RCC material is presented, as well as its historical evolution, following by a description of the main stages of mixture proportioning and of some special construction features.

After referring some properties that are necessary to accomplish a good performance, the geotechnical methodology for mixture proportioning RCC is presented as the one as better simulates RCC dam's placement. An application of this methodology is the basis of the experimental study, having itself made a previous select of available materials and studied the assay procedure to adopt. Compared compaction parameters of five mixtures with different quantities of filer, keeping amounts of coarse aggregates and cement. The grading and physical properties obtained are similar to usual values encountered in this kind of dams, with the mixture with higher percentage of filer presenting higher density and, therefore, smaller void ratio.

1 Introdução

1.1 Apresentação e Enquadramento

A escolha do tema desta dissertação teve origem na reduzida informação existente em Portugal sobre barragens de betão compactado com cilindros (BCC). Este estudo pretende, assim, contribuir para o conhecimento, no país, sobre esta nova técnica de construir barragens, que surge no início dos anos 70, mas apenas no ano de 2004 se aplica pela primeira vez em Portugal, na Barragem do Pedrógão, a jusante de Alqueva. Esta barragem torna-se, ao longo da dissertação o elemento chave do estudo, aparecendo muitas vezes como elemento de referência prática, pois é a única experiência da aplicação deste betão em barragens portuguesas.

Para elaborar o trabalho, que abrange aspectos de índole teórica, índole experimental e índole construtiva, foram estudados elementos bibliográficos a nível mundial essenciais para apresentar, caracterizar e compreender este betão. Os elementos mais recentes datam de Setembro de 2008: não foram, no entanto, os mais marcantes ao nível dos desenvolvimentos que este betão tem sofrido ao longo do tempo.

Embora na literatura se possam encontrar várias definições para o betão compactado com cilindros, a mais adequada parece ser a atribuída pelo American Concrete Institute (ACI) 1999, que o define como um betão seco consolidado por vibração externa forte, constituído por agregados com diferentes granulometrias, ligantes, água e eventualmente adjuvantes, diferindo do betão convencional pelo método de colocação e pela sua consistência que permite a circulação de equipamentos pesados como camiões, bulldozers e cilindros de compactação sobre as sucessivas camadas colocadas.

A sua aplicação na construção de barragens pressupõe uma colocação rápida e contínua de material, que obriga a elevadas taxas de produção, compatíveis com as velocidades construtivas definidas. Estas taxas que à semelhança do método de colocação, são responsáveis pela maior velocidade de construção possibilitada por este betão (US Army Corps of Engineers (USACE), 2000). A experiência mostra que, numa mesma obra (no caso de barragens), o tempo construtivo pode ser reduzido em meses, ou mesmo anos,

caso seja possível a sua construção em BCC em substituição do tradicional betão convencional (ACI, 1999).

Como consequência desta maior velocidade de construção, têm sido observados inúmeros benefícios, como sejam, a redução de custos de administração, a utilização antecipada do projecto, uma possível desocupação antecipada do estaleiro, entre outros, que, além dos benefícios enumerados, são importantes ao nível dos custos de construção, dependendo assim inúmeros factores a escolha do betão compactado com cilindros para a construção de uma barragem.

Os factores decisivos na escolha deste betão são os que se relacionam com as condições de fundação, viabilidade e custo dos ligantes, condições sísmicas locais, condições envolventes à obra, velocidade construtiva possibilitada, e extensão do vale (ICOLD, 2003).

Até à data, este material aparece ligado essencialmente à construção de barragens e pavimentos rodoviários. No entanto, e dadas as suas características, começa a ter aplicações diversificadas no mundo da engenharia, como sejam o alargamento de barragens de aterro ou a restauração de barragens (Andriolo, 2008).

Uma vez apresentado o betão compactado com cilindros, descrevem-se seguidamente, de forma sumariada, os conteúdos dos capítulos que constituem esta dissertação, que pretende caracterizar e justificar a utilização deste betão na construção de barragens.

O presente primeiro capítulo apresenta ainda os desenvolvimentos do BCC desde a sua primeira aplicação, as vantagens que este novo material traz ao mundo das barragens e algumas das principais tendências de projecto existentes. Refere ainda os estudos existentes em Portugal para a construção de barragens deste tipo e algumas características, de carácter geral, da barragem de Pedrógão construída no país.

No segundo capítulo são descritas as principais considerações a ter em conta na formulação de um BCC, nomeadamente a selecção dos materiais constituintes, as metodologias de formulação existentes bem como as suas principais características. Este capítulo refere ainda algumas das propriedades da mistura e o modo como estas poderão

influenciar as propriedades do produto final. São apresentados exemplos de barragens construídas com as diversas metodologias existentes, incluindo o exemplo da barragem do Pedrógão, associado ao respectivo método de formulação.

O terceiro capítulo é o capítulo desta dissertação onde são descritos os métodos envolvidos na construção de uma barragem com este material, os cuidados de organização do estaleiro e manutenção de equipamentos, as fases mais críticas do processo construtivo, os órgãos incorporados no corpo da estrutura, as questões de fiscalização entre outros aspectos, não menos importantes, ligados ao processo de execução da obra. Este capítulo é ainda o responsável por apresentar as normas existentes no país quanto à execução de barragens deste tipo, apresentando-se ainda a experiência portuguesa ao nível da construção e dos equipamentos utilizados.

O quarto capítulo refere as principais propriedades deste betão, quando endurecido, fazendo a comparação entre as suas propriedades e as propriedades de um betão convencional. São descritas as principais propriedades ao nível de resistências mecânicas, deformabilidade, propriedades térmicas e de permeabilidade no corpo da estrutura.

No quinto capítulo, é apresentado um estudo experimental sobre a formulação de um BCC em laboratório com o objectivo de perceber o comportamento deste quando sujeito a variações do seu material fino, no presente estudo o filler. Para tal, foram efectuados ensaios de compactação baseados na mecânica dos solos, pelo facto de se aproximarem da realidade de aplicação deste betão.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as principais considerações que se podem retirar da consulta bibliográfica e dos resultados experimentais conseguidos.

1.2 Evolução Histórica do BCC em Barragens

Na bibliografia consultada, o primeiro material semelhante ao BCC aparece em 1960-1970 na constituição de alguns componentes de barragens. O componente mais marcante terá sido o núcleo impermeável da ensecadeira da barragem de aterro de Shihmen, construído nos anos de 1960-1961, na Tailândia (Sagrado, 2008). Este núcleo terá sido totalmente construído com um betão semelhante ao que actualmente designamos por BCC.

Seguindo a tendência, nos anos de 1961-1965 foi construída aquela que poderia ter sido a primeira barragem de BCC do Mundo, a barragem de Alpe Gera em Itália, com 172 metros de altura, projectada pelo engenheiro Giulio Gentile. Esta foi construída com um betão pobre, espalhado em camadas com 70 centímetros de altura ao longo de todo o vale. No entanto, o betão foi compactado através de vibração interna, razão pela qual esta não é considerada a primeira barragem totalmente construída em BCC, podendo ser considerada como pioneira da aplicação do BCC em barragens. Na figura 1.1 pode observar-se a construção da mesma.



Figura 1.1 – Construção da barragem Alpe Gera (Sagrado, 2008).

Em 1970, no X congresso da CIGB em Montreal, Paton sugere algumas vantagens em aplicar betão pobre no interior das barragens de gravidade, que seria idêntico ao actual BCC. No mesmo ano, Raphael, no artigo intitulado “The Optimum Gravity Dam” (Raphael, J.M., 1970), idealiza a colocação e compactação de um aterro constituído por agregados enriquecidos com cimento, utilizando os equipamentos de movimentação de terras, realçando-se a maior resistência ao corte relativamente aos aterros tradicionais, o que permitia aumentar consideravelmente a inclinação dos paramentos.

Na mesma década (1972-1974), Cannon realiza ensaios experimentais usando um betão pobre com granulometria controlada, transportado em camiões, espalhado com

bulldozer e compactado com cilindros vibradores para a barragem de Tims Ford (USA) (ACI, 1999).

Em 1977, foram realizados por Price no Reino Unido estudos sobre as características do betão pobre aplicado nas barragens de gravidade da época. Estes estudos conduziram à construção de uma plataforma experimental na barragem de Wimblehall, em 1978. Decorria o ano de 1981, quando, um extenso programa de ensaios experimentais “in situ” foi realizado por Dunstan, sobre um betão pobre contendo cinzas volantes.

Enquanto a maioria dos países efectuava estudos sobre as potenciais características de betões pobres, que viriam a resultar no BCC, o Japão formava uma comissão designada “Comissão Japonesa da Construção Racionalizada de Barragens de Betão”.

A primeira aplicação dos trabalhos desta comissão teve lugar no ano de 1976 na construção da ensecadeira da barragem de Ohkawa (Nagataki, et al, 2008), apresentada na figura 1.2. Esses estudos e esse ensaio em grande escala permitiram iniciar, em 1978, a construção da primeira barragem do mundo em BCC, a barragem de gravidade de Shimajigawa no Japão (figura 1.3), com 89 m de altura e um volume de betão de cerca de $1.70 \times 10^5 \text{ m}^3$, completada em 1981, ficando pioneira das barragens deste tipo de betão construídas no Japão.



Figura 1.2 – Barragem de Ohkawa no Japão (Nagataki et al, 2008).



Figura 1.3 - Barragem de Shimajigawa (Nagayama, et al, 2003).

Seguidamente várias barragens foram construídas com este betão, realçando-se a barragem de Tamagawa, apresentada na figura 1.4, com 100 metros de altura e um volume de betão de cerca de $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$. Tratou-se da segunda barragem de BCC no Mundo, tendo sido terminada no ano de 1987.



Figura 1.4 - Barragem de Tamagawa (Nagataki, et al, 2008).

Com base em todos os estudos que haviam sido desenvolvidos, termina em menos de 5 meses, no ano de 1982, a construção, nos Estados Unidos, daquela que viria a ser considerada a primeira barragem mundial, toda em BCC: a barragem de Willow Creek, apresentada na figura 1.5 (Sagrado, 2008).



Figura 1.5 - Barragem de Willow Creek (Sagrado, 2008).

Nos anos que se seguiram, outras barragens foram construídas. Nas figuras 1.6 e 1.7 apresentam-se duas imagens onde se apresenta o aumento exponencial da construção de barragens com este betão. Como se pode observar, no espaço de dez anos (1985-1995), passou-se de uma mancha quase insignificante de barragens construídas em BCC, para uma mancha mundial significativa ao nível da construção de barragens deste tipo.

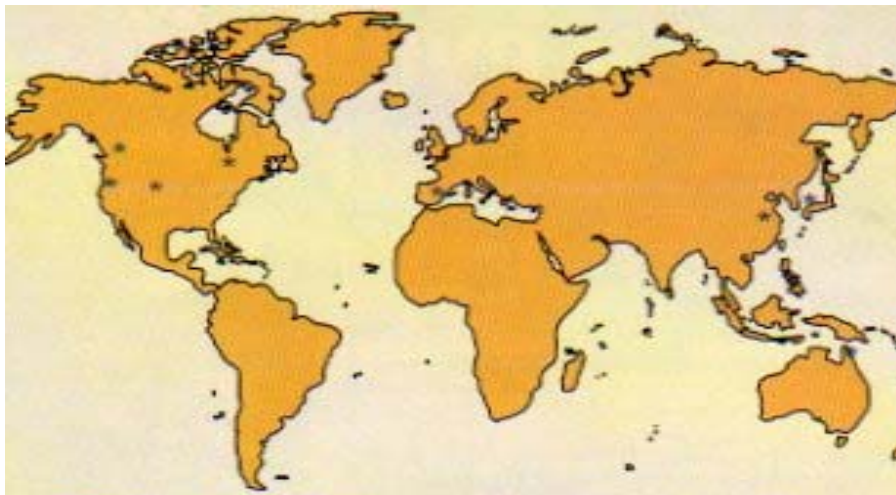


Figura 1.6 - Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 1985 (Dunstan, 1995)

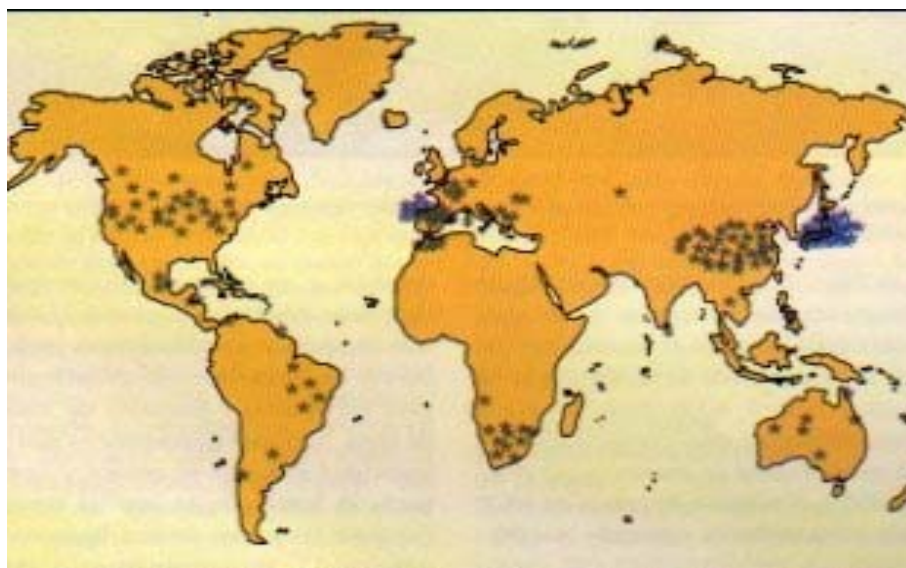


Figura 1.7 - Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 1995 (Dunstan, 1995)

Segundo Dunstan, 2003, desde 1996, quando existiam 157 barragens (figura 1.8) espalhadas por 20 países no Mundo, foram construídas até 2002 mais 94 barragens, existindo cerca de 251 barragens (figura 1.9) espalhadas por 35 países no Mundo no final do ano de 2002, ou seja, um aumento construtivo na ordem dos 40%, no espaço de 6 anos.

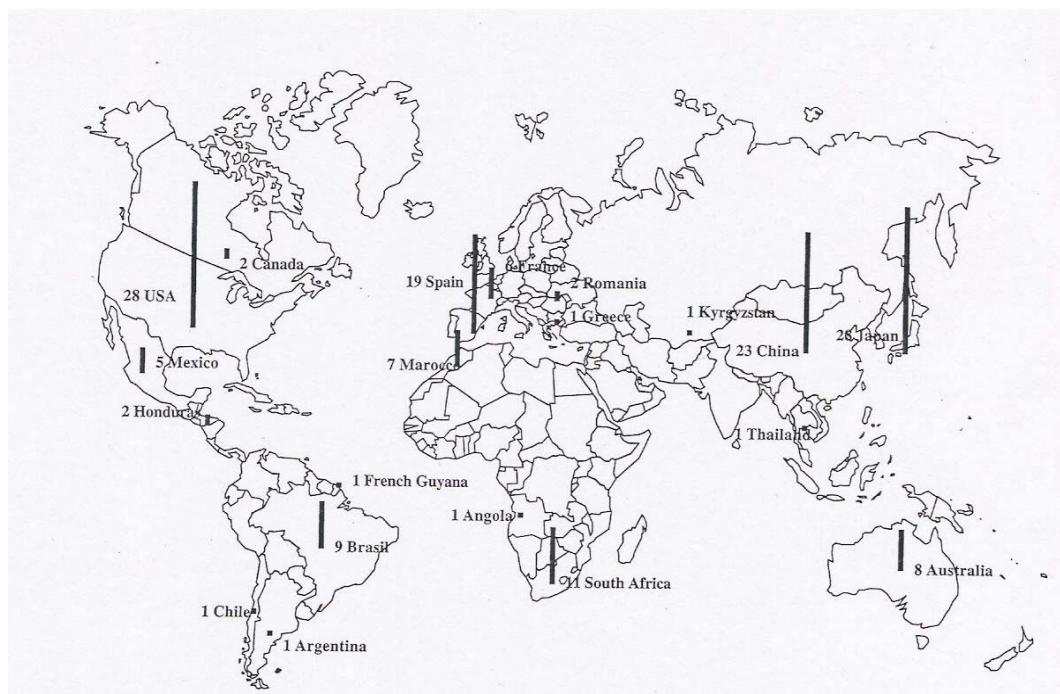


Figura 1.8 – Distribuição das barragens de BCC no mundo em 1996 (Dunstan, 2003)



Figura 1.9 – Distribuição das barragens de BCC no mundo em 2002 (Dunstan, 2003)

Como os dados indicam a utilização deste betão na construção de barragens tem sido cada vez maior, quer pelos menores custos associados, quer pela maior velocidade construtiva. Nos últimos anos, o crescimento na construção de barragens tem-se verificado, e o BCC tem sido uma das soluções vantajosas para a construção das barragens como mostram os gráficos 1.1 e 1.2, pode observar-se que no espaço de 3 anos (2005-2008) foram construídas cerca de 80 barragens utilizando esta metodologia.

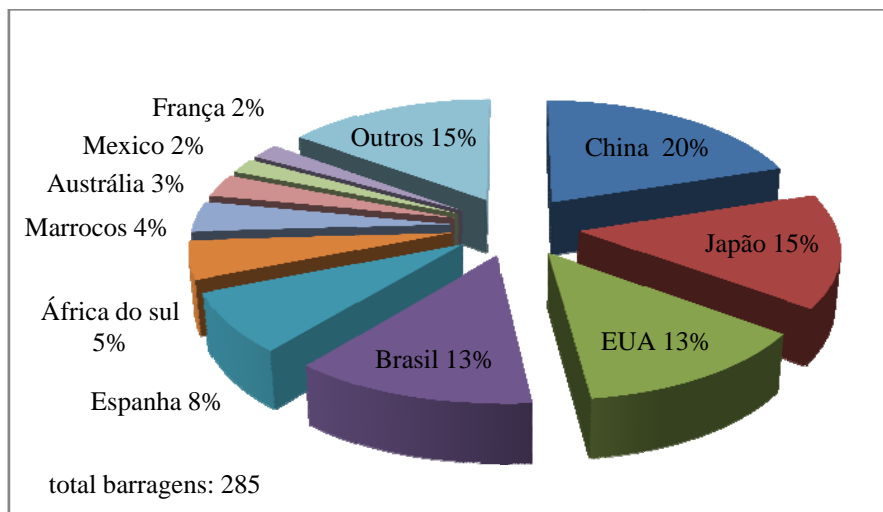


Gráfico 1.1 - Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 2005 (Castro, A.T., 2006)

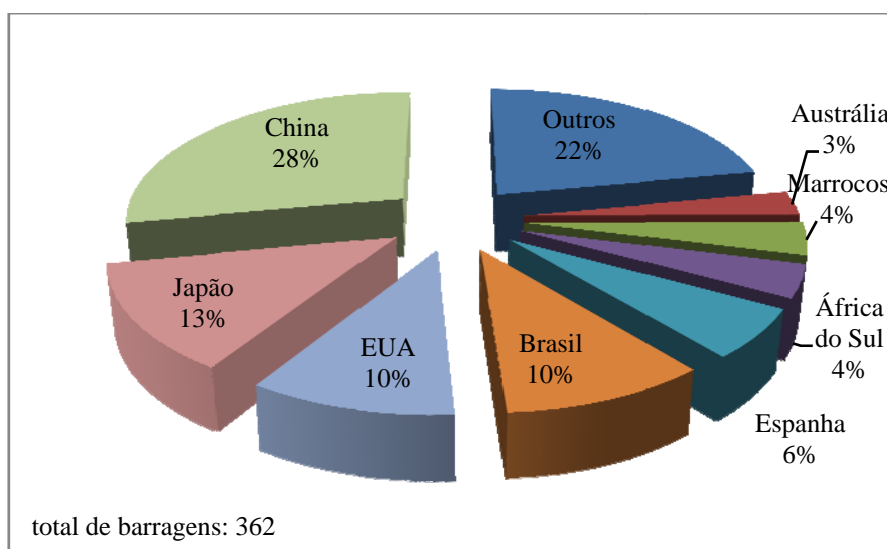


Gráfico 1.2 - Distribuição das barragens em BCC no mundo no ano de 2008 (Castro, A.T., 2008)

1.3 Vantagens e Desvantagens Associadas ao Uso do BCC em Barragens

As vantagens da construção de barragens em BCC estão associadas, principalmente, ao tipo de mistura, aos desígnios estruturais, aos métodos de produção e principalmente à maior velocidade de fabrico e colocação, aspectos que serão abordados posteriormente no presente trabalho. Outros factores vantajosos neste betão são os baixos custos de construção associados, à sua velocidade construtiva, à possibilidade de incorporar, à semelhança do betão convencional, órgãos hidráulicos (descarregadores de cheias e galerias), no corpo da barragem, assim como a minimização das cofragens a utilizar comparativamente com as utilizadas no betão convencional.

A nível de custos uma barragem construída em BCC pode ter custos de 25 a 50% menores comparativamente com a construção da mesma em betão convencional (USACE, 2000). Esta diferença de custos depende normalmente do custo dos agregados e dos ligantes utilizados, da complexidade de colocação do betão em obra e das quantidades colocadas, mas a poupança está directamente relacionada com a fácil e rápida colocação deste betão em períodos de tempo menores que o betão convencional. Quando este betão possibilita a utilização de agregados existentes na zona, sempre que estes possuam uma qualidade adequada, reduz-se ainda, em grande parte, os custos de transporte.

Em Portugal, foi publicado, no ano de 1996, o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 1996), onde são estabelecidas vantagens essenciais do BCC relativamente às barragens de aterro e às barragens de betão convencional. Segundo o documento, as barragens construídas com este betão, em comparação com as barragens de aterro, implicam menor volume de material e a possibilidade de incluírem o descarregador de cheias no corpo da barragem.

Relativamente às barragens de betão convencional, destacam-se, no mesmo documento, os prazos de construção bastante mais reduzidos, as menores quantidades de cimento, a possibilidade de reduzir ou eliminar as juntas de contracção, a disponibilidade de maior área de trabalho durante a construção e diminuição do risco de fendilhação associado à retracção do betão. Este tipo de barragens é competitivo, especialmente quando a qualidade da fundação é boa, isto é, quando a rocha se encontra próxima da superfície de fundação e quando os agregados disponíveis no local têm boas qualidades.

As desvantagens do BCC aparecem associadas, na maioria dos casos, a constrangimentos das vantagens enumeradas, devidos a avarias de equipamentos de produção nas instalações de fabrico, ou ao nível dos equipamentos de transporte e compactação. As desvantagens podem ainda estar associadas a um planeamento deficiente das operações construtivas, por falta de componentes para o fabrico da mistura, ou por condições atmosféricas adversas (INAG, 2002), por outras palavras as desvantagens do BCC aparecem sempre que não é possível executar a construção de uma forma rápida e eficaz, ou seja, sempre que a vantagem de maior facilidade e rapidez construtiva é condicionada.

Este método construtivo pressupõe, a existência de um maior número de juntas durante a construção, o que torna a estrutura mais susceptível à ocorrência de percolação que em, casos extremos, pode afectar a estabilidade da estrutura e prejudicar a durabilidade da obra.

1.4 Tendências Actuais de Projecto

No que se refere ao projecto, distinguem-se essencialmente duas tendências (INAG, 2002). A primeira procura adoptar soluções que optimizem o projecto e a construção tendo

em conta as características do local que se referem ao maciço de fundação e aos materiais, e aos equipamentos disponíveis para que a solução escolhida seja a melhor do ponto de vista técnico-económico. Segundo esta tendência, o saneamento da fundação deve ser o menos extenso possível, reduzindo os esforços transmitidos ao maciço, e as juntas de contracção devem ser no menor número possível, pois perturbam as operações de construção. Devem minimizar-se também as juntas frias de construção, garantindo assim uma ligação adequada entre camadas sucessivas, bem como o número de condutas e galerias no corpo da barragem que possam perturbar as operações construtivas.

Esta tendência valoriza ainda a impermeabilização de algumas zonas mais especiais, quer por inclusão de uma membrana impermeável, quer por uma faixa de betão mais rica em ligante.

A segunda tendência nas barragens de BCC, adopta soluções que não se afastem das soluções análogas em betão convencional, nas quais se faz intervir, otimizadamente, a possibilidade de usar, na maior extensão possível betões secos colocados com eficiência na obra e compactados com cilindros vibradores. Esta tendência permite a construção de formas mais esbeltas, externamente semelhantes às das barragens de betão convencional, apresentando, a barragem, na sua constituição dispositivos de impermeabilização e drenagem a montante e a jusante. Neste caso, as juntas transversais incluídas no corpo da estrutura são efectuadas com espaçamentos iguais ou pouco superiores aos das barragens de betão convencional.

Durante a obra, é ainda incluído um conjunto de circuitos destinados à injeção das juntas de contracção em fase posterior à conclusão da obra. As restrições quanto à incorporação de condutas ou galerias nesta tendência é menor, embora se recorra a métodos que minimizem as interferências no processo construtivo. São ainda usadas cofragens nos paramentos de montante e jusante típicas das barragens de betão convencional.

1.5 Experiência Portuguesa – Caso do Pedrógão

No caso particular português, apesar de vários estudos já terem sido efectuados para a construção de barragens utilizando este betão (Castro, 2008), como se mostra na tabela 1.12

1.1, até ao momento apenas o caso da barragem de BCC do Pedrógão foi concretizado. Esta barragem situa-se no rio Guadiana, em Pedrógão, a aproximadamente 24 km a jusante da barragem do Alqueva (figura 1.10). Apresentando uma albufeira com capacidade útil de 54 milhões de metros cúbicos, visa essencialmente a exploração, em bombagem, da central de Alqueva, situada a montante, e a alimentação de alguns subsistemas de rega integrados no aproveitamento de Alqueva.

Tabela 1.1- Estudos efectuados em Portugal para construção de barragens em BCC (Castro, 2006)

Barragem	Altura (m)	Comprimento (m)	Ano de Estudo	Tempo de execução (meses)
Odeleite	65	385	1990/91	36
Sabugal	60	800-1005	1993/94	30
Pinhosão	85	405-420	1994	-
Odelouca	80	450	1995/96	36
Veiguinhas	35	285	1995/96	12
Feiticeiro	39	300	1995	-
Quinta das Laranjeiras	100-150	-	-	-
Ribeiradio	73	-	-	-
Pedrógão	43	448	2002/2003	-



Figura 1.10 - Localização da barragem em relação a Alqueva (Castro, 2006)

A barragem de Pedrógão é, então, constituída por uma estrutura de gravidade, em betão, com uma altura máxima acima das fundações de 43 metros e com a secção apresentada na figura 1.11. Desenvolve-se em planta segundo um eixo rectilíneo, com um comprimento total de 448 metros, dos quais 323 metros correspondem a um betão compactado com cilindros, como se pode observar na figura 1.12. Na maior parte do seu desenvolvimento, a barragem encontra-se fundada em granitos de razoável a boa qualidade, típicos das costas alentejanas.

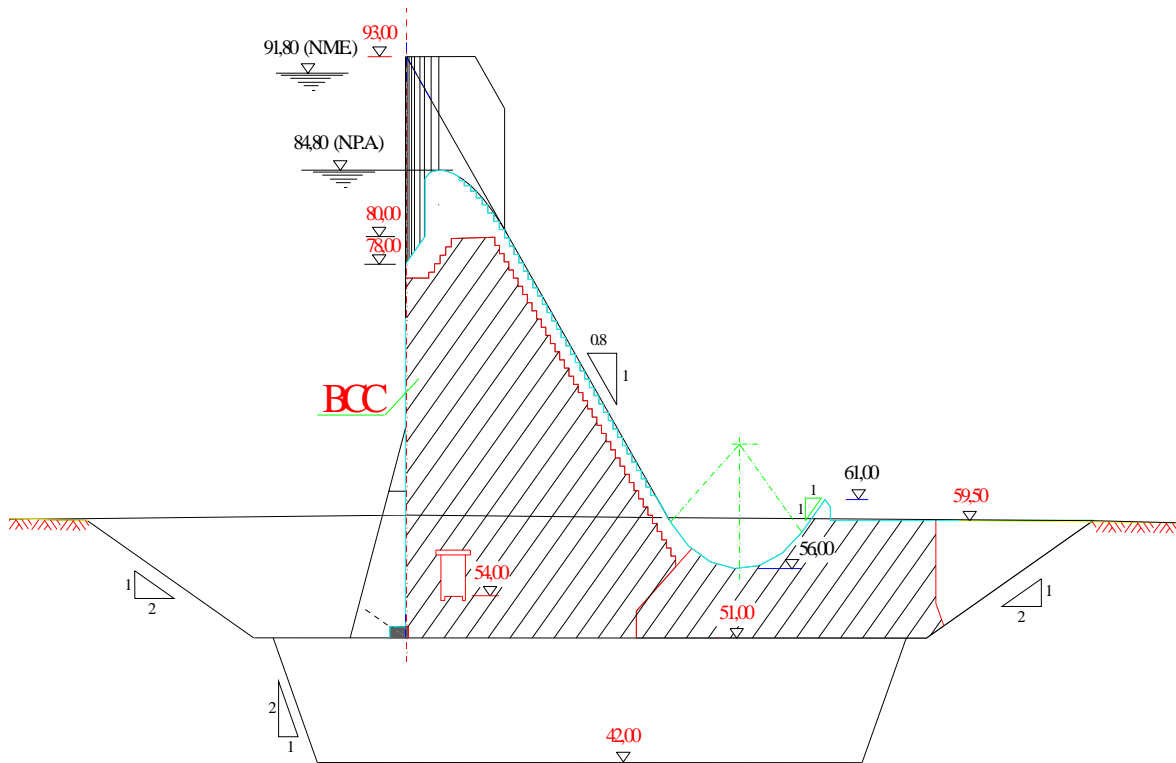


Figura 1.11 - Secção transversal da barragem do Pedrógão (Castro A. T., 2006)

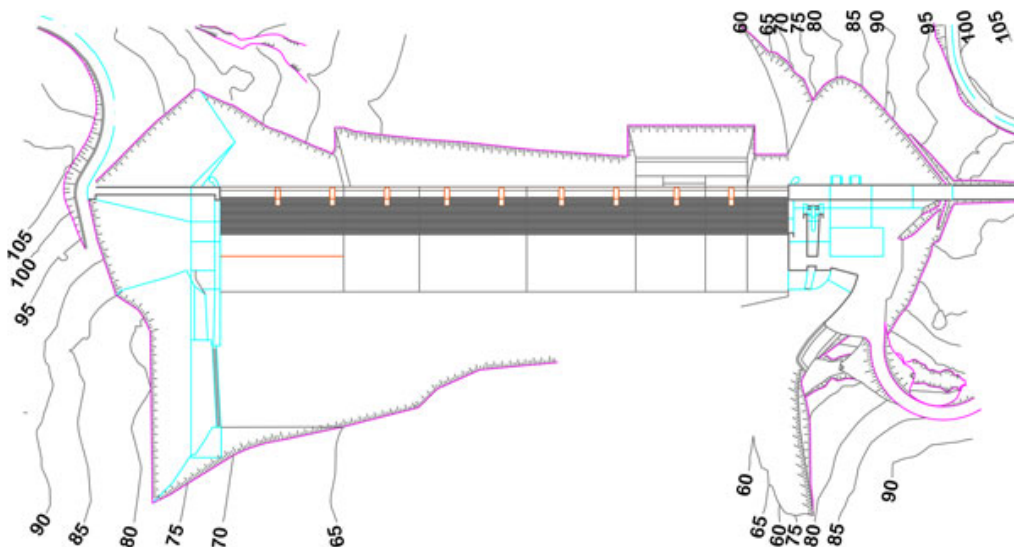


Figura 1.12 – Desenvolvimento em planta da barragem do Pedrógão (INAG, 2008)

A execução do trecho em BCC começou no início de Abril de 2004, terminando no fim do mês de Agosto do mesmo ano. A colocação do betão foi realizada em camadas de 30 centímetros de espessura cada, sendo executadas consecutivamente com intervalos de 15 horas.

O dono da obra foi a EDIA (Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva), o projecto esteve a cargo da EDP (Electricidade de Portugal), e o empreiteiro envolvido na construção foi a Mota Engil, ficando no final construída a barragem apresentada na figura 1.13



Figura 1.13 - Aspecto da barragem do Pedrógão em funcionamento (PERI, 2006)

2 Formulação de um BCC

2.1 Generalidades

À semelhança do que acontece nos outros betões, a formulação do betão compactado com cilindros (BCC) consiste na selecção e no doseamento dos materiais que constituem a mistura betão, tendo como fim dosear um betão económico, que cumpra as especificações técnicas, e permita a construção de uma estrutura durável, impermeável e resistente (Sagrado, 2008).

O presente capítulo descreve, deste modo, o processo de selecção dos materiais que constituem a mistura do BCC e os métodos de formulação existentes. Descreve ainda, a experiência portuguesa ao nível da formulação de uma mistura de BCC, particularmente o único caso existente, a barragem do Pedrógão.

De um modo geral, a política de selecção dos materiais passa pela avaliação da disponibilidade e pela conveniência de materiais essenciais ao fabrico do BCC. Sobre esta selecção, está patente a condição de qualidade e durabilidade da mistura formulada. Na prática, é desenvolvido um estudo em fase de projecto, que avalia a disponibilidade dos agregados locais e as distâncias de transporte de ligantes e eventuais adjuvantes, seleccionando os materiais economicamente mais viáveis à constituição da mistura.

Quanto a metodologias de formulação, existe actualmente um elevado número de métodos utilizados com sucesso em todo o mundo, diferindo entre si essencialmente por exigências de posição, exigências de projecto e disponibilidade de materiais e equipamentos construtivos. Este capítulo destaca duas metodologias, consideradas dominantes, uma baseada nos conhecimentos análogos aos utilizados no betão convencional e outra baseada nos conhecimentos análogos aos utilizados na compactação da mecânica dos solos, também designada por metodologia geotécnica.

Ambas as metodologias objectivam o alcance de uma trabalhabilidade e durabilidade adequadas a estrutura, apresentando a característica comum de uma mistura de BCC requerer um determinado estado de consistência capaz de suportar os cilindros

vibratórios e outros equipamentos pesados que circulam sobre a mistura durante a execução da obra (Andriolo, 2003).

Segundo Sagrado, (2008), um BCC bem doseado é aquele que apresenta uma quantidade de finos (ligantes agregados e filers) e uma dosagem de água adequada para que, quando adicionados a várias classes de agregados, gere uma porosidade mínima que torne a mistura mais consistente. Além de uma boa consistência, pretende-se, na formulação da mistura, gerar uma mistura impermeável que impeça a passagem de água pelo corpo da obra depois da construção.

2.2 Materiais Constituintes

2.2.1 Agregados

Os agregados foram, até há poucos anos, designados por inertes. A experiência na formulação de betões revelou, no entanto, que as suas propriedades físicas, térmicas e químicas afectam o desempenho do betão com eles fabricado, podendo ocorrer reacções químicas entre estes e os ligantes.

De um modo geral, os agregados podem definir-se como sendo partículas de rocha com dimensões variáveis que constituem a parte pétreia das misturas de betão, entrando nestas em grandes percentagens, pelo bom desempenho estrutural e pelos benefícios económicos que proporcionam. Classificam-se geralmente pelas dimensões, modo de obtenção, massa volúmica e baridade, podendo ainda ser classificados pelas suas características de ligação ao ligante, grau de absorção de água e resistência, propriedades que são obtidas em laboratório (Coutinho, 1994).

A sua selecção para a constituição de uma mistura de BCC engloba imensos factores, nomeadamente a localização da obra, a disponibilidade de material no local e as características que se exigem à construção ao nível de resistências, durabilidade e permeabilidade durante o período de vida útil da mesma.

O que acontece na realidade é, por vezes, os agregados escolhidos possuírem um mínimo de processamento, tirando deste modo o maior partido possível dos materiais existentes nas proximidades do local da construção (Andriolo, 2003).

Actualmente sabe-se que os materiais devem ser escolhidos após vasto estudo das suas características quer em laboratório, quer em plataformas experimentais de forma a prever o seu comportamento na estrutura, pois à semelhança do que acontece no betão convencional, devem considerar-se possíveis reacções químicas entre os materiais que constituem a mistura que possam ser prejudiciais à mesma, nomeadamente a existência de reacções entre agregados, ligantes e eventuais adjuvantes (ACI, 1999).

Embora existam recomendações para que sejam utilizados agregados de boa qualidade na formulação de betões, o BCC pode ser produzido com agregados de qualidade inferior, desde que a sua incorporação na mistura seja devidamente justificada.

Os agregados utilizados no BCC são, então, agregados grossos, areias e finos, fillers, podendo estes entrar na mistura em diferente número, isto é, um betão deste tipo pode conter mais de uma classe de agregados. À semelhança dos agregados seleccionados para o betão convencional, devem ser respeitadas as normas de classificação de agregados para que seja produzida uma mistura uniforme e homogénea (ACI, 1999).

No ano de 2003, foi publicado um estudo que referia os agregados utilizados na formulação de misturas de BCC até 1996, comparando-o com o número de agregados utilizados nas misturas de BCC formuladas até ao ano de 2002 (Dunstan, 2003). Esses valores podem observar-se nos gráficos 2.1 e 2.2.

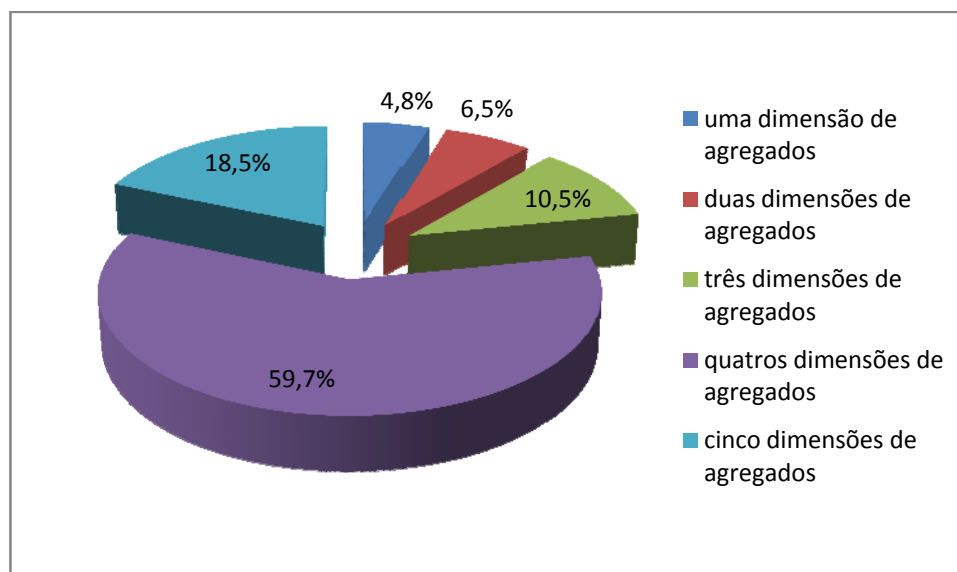


Gráfico 2.1 – Número de dimensões de agregados usados na formulação de misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 1996 (Dunstan, 2003).

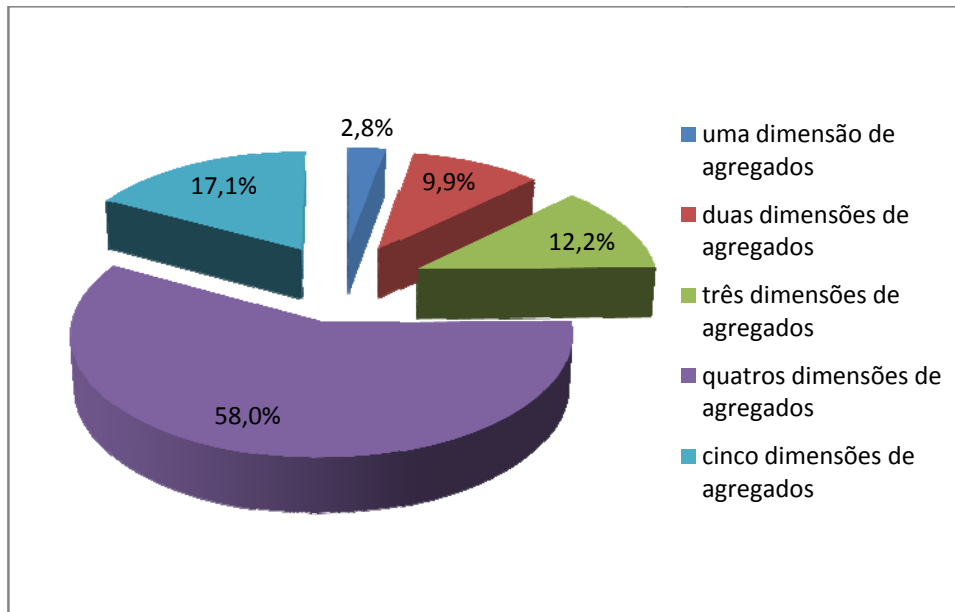


Gráfico 2.2 – Número de dimensões de agregados usados na formulação de misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 2002 (Dunstan, 2003).

Como se pode observar, a evolução no espaço de seis anos (1996-2002) do número de dimensões de agregados utilizados nas misturas de BCC não variou significativamente sendo comum utilizarem-se agregados de quatro dimensões distintas na constituição deste betão.

Na selecção dos agregados grossos, há que ter em consideração a grande influência destes no índice de vazios e na potencial segregação da mistura, não devendo ser utilizados agregados com dimensão superior a 75 mm, pois, além de aumentarem o potencial de segregação e o número de vazios que não são preenchidos com pasta, dificultam a obtenção de um grau de compactação adequado e são economicamente menos vantajosos.

Quanto à selecção de agregados finos e filers, todos aqueles que passam no peneiro #200 (ASTM), esta permite que estes sejam de natureza argilosa ou calcária quando são provenientes da britagem da rocha.

A determinação da granulometria destes agregados finos não pode ser efectuada por peneiração simples pois, devido às suas reduzidas dimensões (inferiores a 2×10^{-3} mm), acabam por aderir às partículas de maiores dimensões e não atravessam a malha do peneiro #200 (ASTM). Por este facto, o modo mais corrente para determinar a granulometria

destes agregados consiste em efectuar uma peneiração por via húmida, ou analisar a dimensão das partículas via laser.

O uso de material fino, muito plástico, deve ser evitado, além de exigir maior quantidade de água, com a consequente perda de resistência, a mistura produzida é pegajosa, difícil de misturar e de compactar. É, então, recomendado que se adicionem finos calcários, areias boas ou finos fabricados sempre que seja viável. Geralmente, é possível entrar com uma maior percentagem de agregado fino se este for pó de pedra, não argiloso em cerca de 12% (ACI, 1999), ou 15 % (Project Bacara, 1996). O que acontece, na prática, é utilizarem-se finos argilosos plásticos por estes existirem no local, o que os torna economicamente mais vantajosos.

No entanto, no caso de um fino argiloso, as partículas de argila apresentam dimensões inferiores às do cimento, podendo ser absorvidas pelas superfícies dos grãos de cimento, formando uma barreira protectora que impede a cristalização do cimento, facto pelo qual a sua percentagem na mistura deve ser sempre mínima. Mesmo adicionado nas quantidades recomendadas, cerca de 6% no máximo, um fino argiloso pode piorar as ligações entre os agregados e os ligantes devido a ser adsorvido pelas superfícies dos agregados de maiores dimensões e dos ligantes, piorando de algum modo juntamente a sua resistência à compressão. Neste sentido, quando existem finos plásticos, deve sempre ser efectuada uma avaliação dos efeitos de perda de força, da água exigida, e da durabilidade de modo a verificar se as exigências de desígnio estruturais serão cumpridas (ACI, 1999).

Ao contrário do betão convencional, quando a mistura de BCC contém uma baixa percentagem de cimento, a quantidade de material que passa no peneiro #200 (ASTM) é maior. Esta maior percentagem de material fino é utilizada para aumentar o conteúdo de pasta que preenche os vazios na mistura e contribui para uma melhor trabalhabilidade e compactabilidade relativa da mistura. Por outro lado, aumenta o valor da tensão de rotura, diminui a permeabilidade e a capilaridade e influencia o número de passagens dos equipamentos compactadores necessárias a uma boa compactação (Coutinho, 1994).

2.2.2 Ligantes

Na constituição de um BCC podem entrar vários tipos de ligante. O cimento Portland é o mais representativo, podendo os outros entrar como substitutos de fracções do primeiro para tornar o betão mais económico. Neste caso, são geralmente utilizadas cinzas volantes, escórias de alto-forno e pozolanas (ACI, 1999).

No gráfico 2.3, podem observar-se as tendências seguidas ao nível da utilização de ligantes em barragens construídas até 1996, enquanto no gráfico 2.4 se podem observar as mesmas tendências relativamente às barragens construídas até ao ano de 2002 (Dunstan, 2003).

Como se pode observar, quer num caso quer nouro a utilização de um cimento e de um baixo teor de cinzas volantes prevalece sobre os restantes ligantes possíveis; no entanto, deve observar-se o aumento significativo da utilização de um cimento natural com pozolanas e de um cimento Portland sem qualquer combinação. Isto pode dever-se à maior resistência à compressão que as misturas com cimento Portland têm revelado no decorrer dos anos.

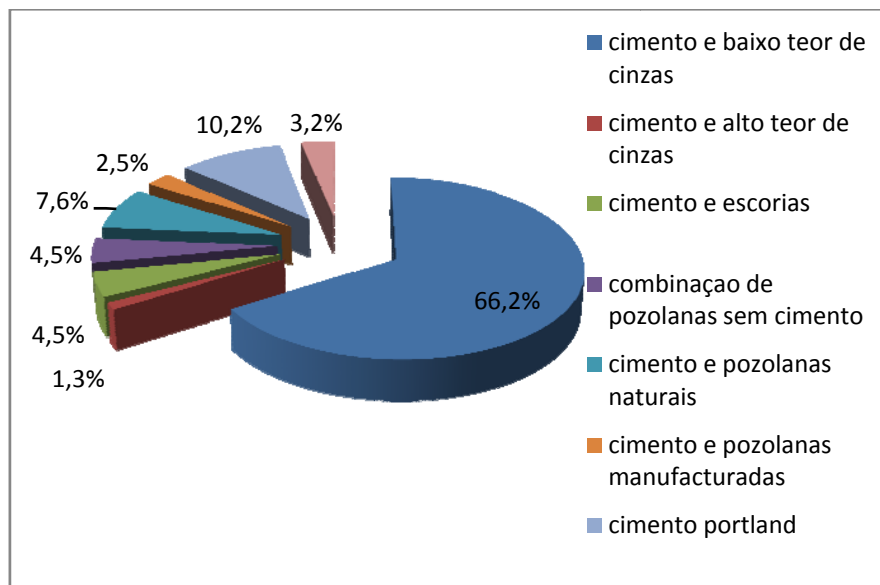


Gráfico 2.3 – Material ligante utilizado nas misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 1996 (Dunstan, 2003).

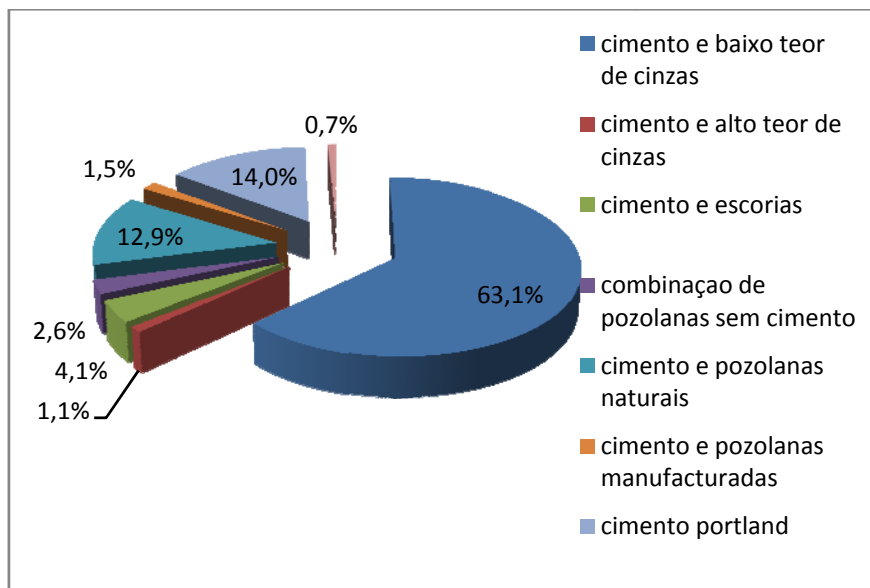


Gráfico 2.4 – Material ligante utilizado nas misturas de BCC em barragens construídas até ao ano de 2002 (Dunstan, 2003).

No que respeita ao cimento Portland, o mais utilizado na produção do BCC é do tipo II, pelas suas baixas características de geração de calor (ACI, 1999). No entanto outros tipos podem ser utilizados dependendo das características que se pretendem para o betão. De salientar que o uso de cimento Portland tipo III reduz o tempo disponível para a consolidação e aumenta a geração do calor de hidratação desde o início, pelo que geralmente não é uma grande alternativa.

No que respeita às pozolanas, estas são as mais utilizadas como ligante substituto do cimento Portland e não são mais que um produto da queima do carvão pulverizado nas caldeiras das centrais termoeléctricas que, no seu estado seco, têm uma textura e cor semelhante à do cimento, sendo constituídas, essencialmente, por partículas esféricas muito finas, compostas principalmente por silico-aluminatos (Coutinho, 1994).

A classe mais utilizada é a classe F, sendo também utilizadas cinzas volantes da classe C, pois contribuem para reduzir a geração de calor em betões mais jovens, como se pode observar pelo gráfico 2.5, podendo ser usadas para substituir até cerca de 50% do volume total de cimento, reduzindo assim custos e melhorando a trabalhabilidade da mistura.

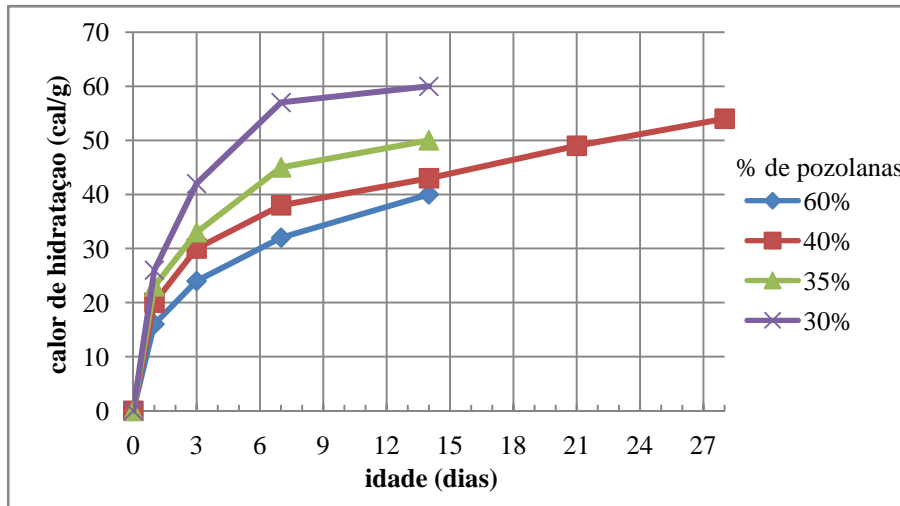


Gráfico 2.5 – Calor de hidratação resultante do uso de pozolanas (Dunstan, 1995).

Como se pode observar no gráfico apresentado, a adição de pozolanas na mistura de BCC faz diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, o calor gerado pela mistura. Quanto maior a percentagem de pozolanas presentes na mistura, menor o calor de hidratação da mesma, o que seria de se esperar.

2.2.3 Água

A experiência mostra que a fonte de água, bem como a quantidade utilizada, têm um efeito significativo no comportamento do BCC. A quantidade de água influencia o tempo de presa do betão entre camadas e faz variar significativamente a sua resistência (ACI, 1999).

A qualidade de água presente numa mistura de BCC deve ser prevista antes do acto de mistura e a sua aceitação dependente da verificação da sua apropriação de acordo com o desempenho da estrutura, do mesmo modo que no betão convencional podem ser utilizadas todas as águas potáveis e ainda as que, não o sendo, sejam inodoras e sem gosto (Coutinho, 1994). Contudo, o uso de águas suspeitas deve ser analisado em laboratório, pois podem afectar de forma prejudicial a compacidade e, especialmente, a hidratação do cimento na mistura.

2.2.4 Adjuvantes

À semelhança do que acontece num betão convencional, a adição de adjuvantes no BCC é utilizada para melhorar a trabalhabilidade, o tempo de formação de presa, reduzir a quantidade de água, aumentar o número de vazios na mistura ou mesmo melhorar a durabilidade das misturas de BCC. Em comparação com o betão convencional, as quantidades de adjuvantes requeridas no BCC são muito maiores.

Os adjuvantes que reduzem a quantidade de água e retardam o tempo de presa da mistura aumentam, geralmente, a trabalhabilidade e melhoram a ligação entre as camadas. A dosagem controlada deste tipo de químicos é, por vezes, recomendada devido à consistência mais seca do BCC. Contudo existem situações em que uma dosagem excessiva destes adjuvantes pode resultar numa melhoria mínima ou até num impacto prejudicial de desempenho a curto e a longo prazo (USACE, 2000).

A dosagem destes químicos deverá ser baseada em resultados de testes de laboratório, onde o efeito de diferentes dosagens pode ser avaliado.

Além dos adjuvantes redutores de água e retardadores de presa, podem ser administrados na mistura introdutores de ar, na tentativa de criar um sistema de espaços de ar, que geram espaços na constituição do betão para que este resista a possíveis ciclos de gelo e degelo, quando criticamente saturado. A experiência tem mostrado que a quantidade de introdutores de ar requeridos para uma mistura de BCC pode ser consideravelmente mais alta que a requerida para um betão convencional. Porém, o conteúdo de ar para proteger significativamente o BCC contra o gelo-degelo pode ser mais baixa e as bolhas de ar formadas podem não ser tão críticas quanto para o betão convencional.

Com a adição destes introdutores de ar, tanto no betão convencional como no BCC, a trabalhabilidade melhora visivelmente, pois esta operação causa uma redução da quantidade de água requerida na mistura. A quantidade destes introdutores é influenciada pelo número de vazios, o tipo de vazios e a quantidade de água na mistura.

2.3 Metodologias de Formulação de um BCC

As metodologias de formulação de um BCC podem agrupar-se, fundamentalmente, em dois métodos: metodologia análoga ao betão convencional ou metodologia análoga à compactação da mecânica de solos (ACI, 1997).

No primeiro grupo de formulação inserem-se as misturas ricas em ligante e o RCD (Roller Compacted Dams), enquanto no segundo grupo se inserem, geralmente, misturas com menores dosagens de ligante.

2.3.1 Métodos Análogos aos do Betão Convencional

Os métodos de formulação análogos aos do betão convencional pretendem obter uma mistura com quantidade de pasta suficiente para preencher todos os vazios da mistura. Desta forma, torna-se necessário efectuar um maior controlo da granulometria dos agregados para se minimizar o volume de vazios e, conseqüentemente, o volume de pasta necessário.

Segundo este método as dosagens dos componentes que constituem o BCC são calculadas com base no conhecimento das massas volúmicas dos materiais sólidos de cada componente, determinando as quantidades necessárias para se atingir um volume unitário de betão.

Na prática, são estabelecidas experimentalmente curvas de variação da massa volúmica do betão com a dosagem de água para betões com consistência diferente, de modo a otimizar as proporções dos agregados e atingir, conseqüentemente, uma melhor trabalhabilidade. Partindo das curvas estabelecidas, do valor da consistência e da massa volúmica exigida, obtém-se a dosagem de água da mistura.

Posteriormente, preparam-se em laboratório provetes de argamassa com o intuito de determinar as dosagens de cimento que geram a resistência pretendida, tendo em conta as limitações impostas pela elevada temperatura e pela ligação entre camadas consecutivas (ACI, 1999).

O valor da consistência segundo esta metodologia é medido através do teste vênê modificado, que consiste em medir o tempo em segundos necessário para consolidar um volume de mistura igual ao volume do cone de Abrams num recipiente de 241 milímetros de diâmetro através da agitação numa mesa vibratória, como mostra a figura 2.1.

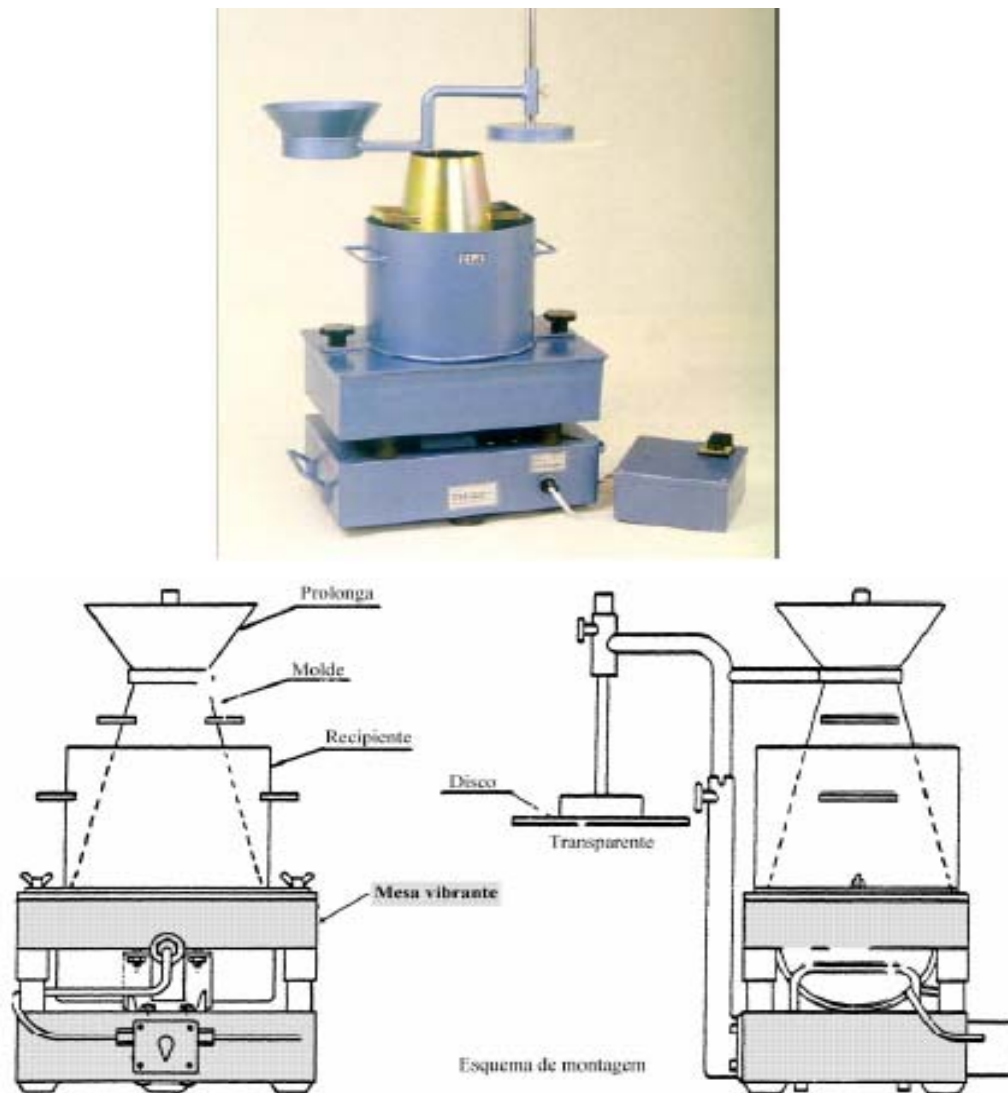


Figura 2.1 – Esquema de montagem do ensaio vênê (Coutinho, 2003).

As misturas formuladas segundo esta metodologia são geralmente menos secas, comparativamente às formuladas pelos métodos análogos à compactação da mecânica dos solos, possuindo um vênê modificado na ordem dos 15 a 30 segundos.

Incluem-se neste método as formulações propostas pela U.S. Army Corps of Engineers e o método usado no Japão RCD (Roller Compacted Dams).

De acordo com a USACE (2000), o doseamento do BCC é feito de acordo com as exigências de água (tabela 2.1) e a massa de cimento equivalente que confere a resistência à compressão pretendida.

Se o uso de pozolanas for antecipado, calcula-se o cimento e as pozolanas (figura 2.2), determinando-se posteriormente as quantidades do agregado de maior dimensão, comparando-as com os agregados finos teoricamente definidos.

Se existir escassez de finos na mistura do BCC, podem utilizar-se pozolanas ou outros finos, como por exemplo filers calcários como suplementos. Calculam-se os volumes absolutos de todos os componentes da mistura, e comparam-se com os valores apresentados na tabela 2.1, de modo a aumentar ou diminuir o volume da mistura e ajustar o conteúdo dos agregados finos. Determina-se, então, o volume da mistura e o rácio do volume da mistura com o volume da pasta, V_p/V_m .

Para a mistura, inclui-se todo o volume de agregados e os minerais mais pequenos que passam o peneiro #200 (ASTM), ligantes, água, e vazios. O rácio mínimo V_p/V_m deve ser maior que, aproximadamente, 0,42, permitindo que todos os vazios fiquem preenchidos. Se for necessário há que ajustar os ligantes ou aumentar a quantidade de agregados e minerais que passam no peneiro #200 (ASTM).

Uma vez ajustados os finos, avalia-se a trabalhabilidade e a resistência da mistura de BCC através de ensaios experimentais. Para BCC's que contenham agregados de grandes dimensões, testa-se a densidade por unidade de peso que passa o peneiro 40 mm (ASTM), testando-se para o tempo modificado de vêbê (se aplicável) e o índice de ar. De um modo geral, os cilindros e os blocos terão preferivelmente uma dimensão mínima menor que três vezes o tamanho máximo nominal do agregado de maior dimensão do betão. O BCC moldado em laboratório deve ser curado, mantendo o seu teor de humidade constante.

Tabela 2.1 – Dosagens estimadas nas composições de BCC (ACI, 1999).

		Máxima dimensão do agregado					
		19 mm		50 mm		75 mm	
		Média	Limites	Média	Limites	Média	Limites
Dosagem água (Kg/m ³)	vêbê<30seg	150	133-181	122	107-140	107	85-128
	vêbê>30seg	134	110-154	119	104-125	100	97-112
Areia (% agregado)	Agregado britado	55	49-59	43	32-49	34	29-35
	Agregado rolado	43	38-45	41	35-45	31	27-34
Argamassa (% volume)	Agregado britado	70	63-73	55	43-67	45	39-50
	Agregado rolado	55	53-57	51	47-59	43	39-48
Vp/Vm		0,41	0,27-0,55	0,41	0,31-0,56	0,44	0,33-0,59
Vazios (%)		1,5	0,1-4,2	1,1	0,2-4,1	1,1	0,5-3,3

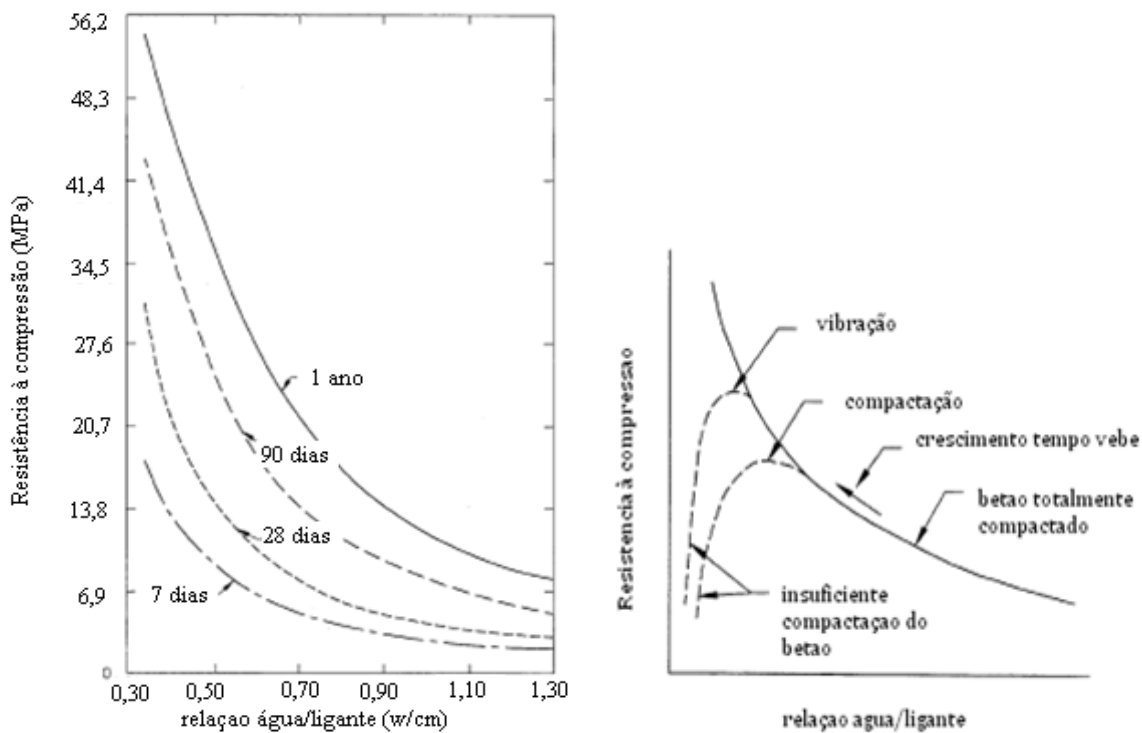


Figura 2.2 – Relação entre resistência à compressão e relação água ligante (ACI, 1999).

Um caso particular da metodologia de formação de um BCC análoga ao betão convencional é o RCD. Esta metodologia tem sido utilizada com sucesso pelos japoneses.

Neste caso particular, o BCC é formulado para ser colocado em camadas com cerca de 1 metro de espessura e espalhado com bulldozers (que chegam a fornecer 90% da compactação total), em três ou quatro camadas, sendo consecutivamente compactado com

cilindros vibradores, sendo a mistura de RCD apropriada a melhor combinação dos materiais especificados no projecto.

A dosagem de ligantes neste caso varia entre 100 a 130 kg/m³, e a dosagem de água é definida para que o betão tenha uma consistência entre 10 e 30 segundos, medida com o método vêbê modificado. Devido aos equipamentos utilizados, este método de formulação não é frequente fora do domínio japonês (ACI, 1999).

Neste caso, a medição do tempo vêbê utiliza um aparelho semelhante ao utilizado para efectuar o teste vêbê modificado; possui, no entanto, maiores dimensões, suficientes para permitirem ensaios a misturas com maior dimensão dos agregados elevada.

2.3.2 Metodologia Baseada nos Conhecimentos da Compactação da Mecânica dos Solos.

A metodologia baseada nos conhecimentos da compactação da mecânica dos solos, também designada por metodologia geotécnica, estuda o BCC com base nos conceitos de compactação da Mecânica dos Solos para efectuar estimativas de dosagens e definir o comportamento do material em obra. Os conceitos de compactação utilizados nesta metodologia foram desenvolvidos por Proctor, nos anos 30, sugerindo o autor que, à medida que se aumenta a energia de compactação, se obtém um peso volúmico seco máximo mais elevado e um teor em água óptimo mais baixo.

Esta ideia, inicialmente proposta por Reeves e Yates (1985), surge na sequência de o BCC se aplicar à construção de barragens com as técnicas comuns dos aterros, o que leva a que o BCC, um material económico e versátil, quando aplicado à construção de barragens, deve pressupor métodos de dosagem simples, de modo a existirem condições para a rápida concretização de um projecto em BCC.

O método inicia-se com o estabelecimento de uma determinada curva granulométrica de agregados, resultante da combinação de diferentes classes de agregados, compreendida no fuso granulométrico representado na figura 2.3, considerado o fuso mais adequado a uma mistura final compactada e resistente.

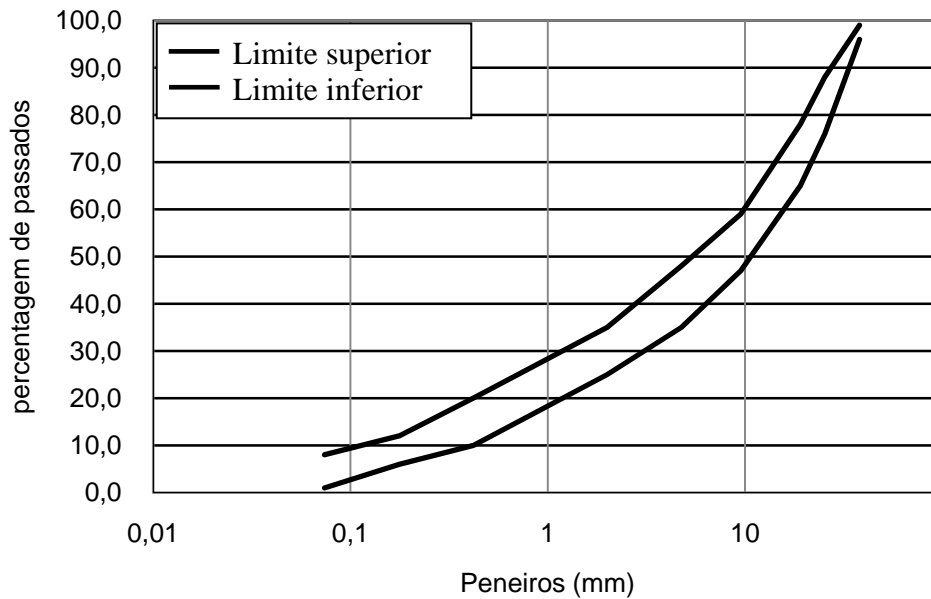


Figura 2.3 – Fusão granulométrica proposto por Reeves and Yeates (1985).

Seguidamente a combinação de agregados que define a curva granulométrica anteriormente referida é misturada em laboratório, com uma quantidade de ligante calculada em função do peso seco de agregados, obtendo-se uma quantidade de material seco (agregados + cimento) suficiente para a preparação de diferentes provetes (4 ou 5) em laboratório, nos quais se fará variar a quantidade de água de amassadura.

Esta metodologia pressupõe a compactação dos diferentes provetes num molde, com uma energia de compactação previamente definida, determinando-se os valores do peso volúmico seco aparente máximo e do teor em água óptimo da mistura.

O teor em água óptimo obtido corresponde, assim, à dosagem de água a adicionar na mistura para a obtenção da consistência adequada. No entanto esta quantidade de água pode ser ajustada visualmente quer em laboratório, quer durante a construção, se a quantidade de água determinada não proporcionar um aspecto de mistura adequado.

No caso do estudo efectuado se basear apenas em ensaios in-situ, a quantidade de água situar-se-á entre um ponto, do lado seco, em que já não existem vazios visíveis e outro ponto, do lado húmido, antes de a mistura apresentar um aspecto esponjoso (Hansen et al, 1991).

A metodologia de formulação do BCC pode ainda envolver a preparação de amostras com diferentes dosagens de ligante (cimento e cinzas), estudando as resistências da mistura formulada para aferir se as propriedades dos materiais são adequadas ao exigido em obra, de modo a obter a combinação mais económica que satisfaça as exigências de projecto. Para o efeito, podem realizar-se ensaios experimentais “in-situ” ou ensaios laboratoriais baseados em ensaios de compactação da mecânica dos solos.

No caso mais geral, em que o estudo se efectua em obra, a quantidade de água deve corresponder ao ponto imediatamente acima do estado de secagem da mistura que aumenta significativamente os problemas de segregação, e imediatamente antes de ocorrer no material fresco como que uma onda na frente do equipamento de compactação.

2.4 Experiência Portuguesa – Caso do Pedrógão

No caso particular da barragem do Pedrógão (Alqueva), foram formulados três betões (BCC) compactados com cilindros distintos, que se destinavam a ser aplicados em diferentes locais na estrutura, consoante as necessidades de resistência requeridas.

Os agregados utilizados nessas formulações foram provenientes das proximidades da obra e das escavações efectuadas na preparação das fundações da estrutura, sendo essencialmente agregados das classes apresentadas na tabela 2.2. Na mesma tabela, são ainda, apresentadas as características dos agregados utilizados (Ortega. et al, 2003).

O doseamento dos agregados na mistura do Pedrógão foi a apresentada de seguida, sendo a classificação das classes de agregados apresentada de acordo com a máxima e a mínima dimensão do mesmo:

- ✓ 29,2% de agregado 19mm/38mm
- ✓ 35,8% de agregado 5mm/19mm
- ✓ 31,5 de agregado 0mm/5mm
- ✓ 3,5 % de filer

A classificação das classes de agregados é apresentada de acordo com a sua máxima e mínima dimensão em mm.

Quanto aos ligantes utilizados sabe-se que na formulação dos BCC's utilizados na construção da referida barragem, que se trataram de um cimento Portland tipo II e cinzas volantes provenientes da central de Sines, cujas características se apresentam na tabela 2.3. A água de amassadura utilizada foi a água presente no local.

Tabela 2.2 – Propriedades dos agregados utilizados em Pedrógão (Ortega, et al, 2003).

	Peso volúmico (ton/m³)			
	Aparente (ton/m³)	Húmido (ton/m³)	Seco (ton/m³)	Absorção %
19/38	2,67	2,65	2,63	0,60
5/19	2,68	2,65	2,62	0,80
0/5	2,67	2,60	2,56	1,50

Tabela 2.3 – Propriedades do cimento e das cinzas utilizadas em Pedrógão (Ortega, et al, 2003).

	Cimento tipo II	Cinzas
SiO ₂ (%)	20,3	58,5
Al ₂ O ₃ (%)	6,5	23,3
Fe ₂ O ₃ (%)	3,2	5,8
CaO (%)	58	2,4
MgO (%)	1,5	1,8
SO ₃	2,6	0,9
Perda de fora (%)	6,13	5,5
Massa volúmica (ton/m ³)	3,05	2,35

Na figura 2.4 pode visualizar-se a curva granulométrica da principal mistura de agregados utilizada na construção da barragem de Pedrógão.

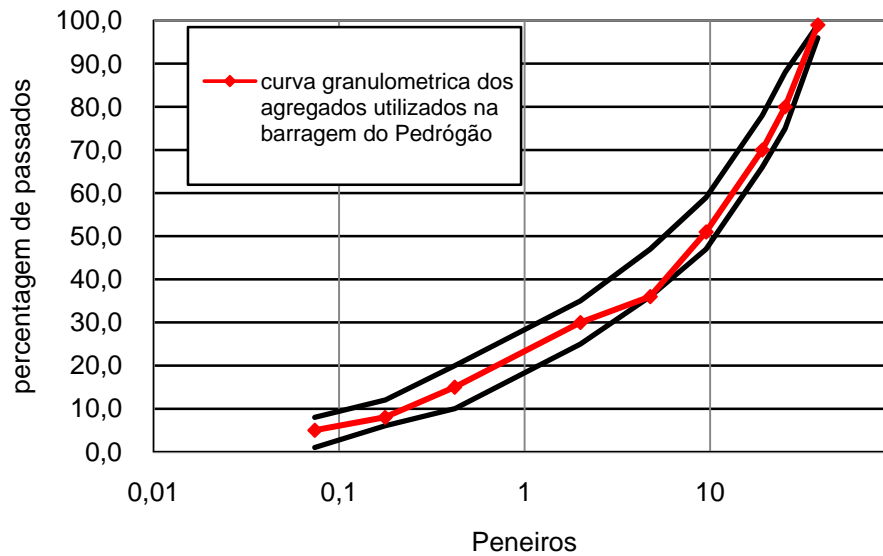


Figura 2.4 – Fuso granulométrico dos agregados utilizados na barragem do Pedrógão (Ortega, F., et al, 2003).

No caso concreto da barragem do Pedrógão, como elemento de compensação da parte fina da mistura, foi utilizado um filer calcário. Foram, então efectuados estudos referentes à percentagem de filer que constitui a parte seca da mistura. Para o efeito, foi estabelecido um estudo experimental cujo objectivo residia na percepção da influência da componente filer na mistura ao nível da optimização da compactação para um mínimo de vazios presente na mistura.

Na figura 2.5, podem observar-se os resultados experimentais atingidos, existindo uma percentagem de filer, função do peso total seco da mistura, que gera uma menor percentagem de vazios e, conseqüentemente, gera uma melhor compactação da mistura.

Estudo semelhante foi realizado no âmbito deste trabalho, pretendendo avaliar-se a influência de diferentes quantidades de filers em misturas de BCC em que se manteve constante o peso seco total de agregados, filer e ligante.

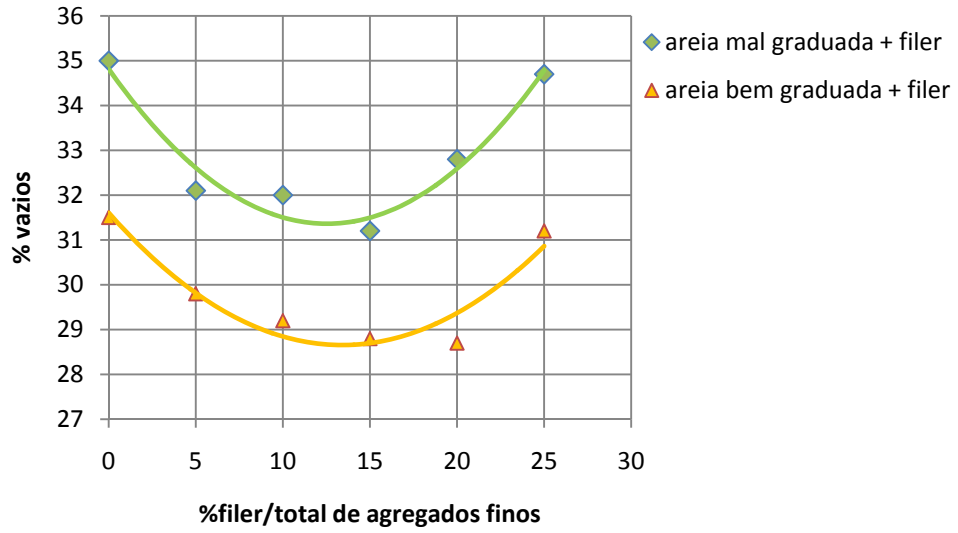


Figura 2.5 – Otimização da compactação dos agregados finos para um mínimo de vazios (Ortega, et al, 2003).

3 Construção em BCC

3.1 Generalidades

Ao longo desta dissertação, é evidenciado por diversas vezes que a vantagem de construir barragens em BCC está associada à maior velocidade de construção, comparativamente ao uso de betão convencional. Esta velocidade só é possível rentabilizando ao máximo a capacidade de produção deste betão em estaleiro, o que exige uma maior interacção entre todas as entidades intervenientes na construção.

Contrariamente ao betão convencional, em que o betão é colocado numa cofragem previamente moldada e vibrado por vibradores agulha, o BCC é colocado e compactado, através de equipamentos iguais aos utilizados na compactação dos solos. Esta colocação dá-se ao longo de grandes extensões em camadas de 250 a 450 mm de espessura (USACE, 2000), sendo a espessura mais usual 300 mm (ACI, 1999).

Pela forma como é colocado, este betão requer uma programação eficaz entre a sua produção, transporte e colocação, de modo a evitar que o ritmo construtivo seja afectado durante a construção: enquanto o betão convencional é construído por blocos, no BCC não existem blocos alternativos para onde se possam dirigir os trabalhos.

No que respeita às tendências construtivas deste tipo de barragens, em Portugal são seguidas as que se apresentam nas Normas de Construção de Barragens, parte do RSB (1998), como se verá na descrição do processo construtivo ao longo do capítulo.

O presente capítulo descreve, assim, os principais aspectos envolvidos na construção de uma barragem em BCC, nomeadamente a organização do estaleiro, as tendências construtivas existentes, os equipamentos de fabrico, os equipamentos de transporte, colocação, espalhamento e compactação.

Descrevem-se ainda algumas disposições construtivas que diferenciam o betão convencional e o BCC, nomeadamente as juntas horizontais de construção, suas propriedades de ligação, e as juntas verticais de construção, bem como é feita referência

aos tipos de paramentos utilizados, as suas propriedades e a razão do menor número de cofrags utilizadas, comparativamente com uma construção em betão convencional.

Apresentam-se, além disso, com as devidas justificações as disposições construtivas dos órgãos que a barragem pode incorporar (galerias e descarregadores), assim como a influência dos mesmos na velocidade de colocação do BCC, sendo referida ainda a construção das plataformas experimentais, explicitando as vantagens, os objectivos e as condições de execução das mesmas.

Por fim, são focados alguns aspectos a ter em conta no âmbito do controlo da qualidade do BCC, ao nível do seu fabrico e da sua construção, referindo, então, os ensaios de controlo de qualidade a efectuar em carotes extraídas do corpo da barragem, com objectivo de avaliar as características do betão colocado.

3.2 Organização e Localização do Estaleiro

Um estaleiro é normalmente definido como sendo o conjunto dos meios necessários (sejam eles humanos, materiais ou equipamentos) que possibilitam a execução de uma obra no prazo previsto, nas melhores condições técnicas e económicas, com o objectivo de assegurar um certo nível de qualidade e segurança, minimizando sempre o custo.

No caso particular do BCC, em que grande parte do seu sucesso depende da rapidez de construção, a organização do estaleiro é um dos factores mais influentes, devendo todos os serviços de apoio, central de fabrico, sistemas de transporte e iluminação, caminhos de acesso, depósitos de agregados e ligantes, sistemas de alimentação de materiais, misturadora, sistema de descarga, espaços reservados ao pessoal e equipamentos, zona de fundação do corpo da obra, etc., estar operacionais no início da construção (USACE, 2000).

Segundo as normas de construção de barragens (RSB, 1998), são responsáveis pela organização do estaleiro o dono de obra e a empresa construtora, sendo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) responsável pela supervisão da organização definida. Os factores que condicionam esta organização são a dimensão da obra, a

necessidade de produção contínua do betão, a disposição construtiva dos órgãos incorporados no betão, nomeadamente galerias e descarregadores, e o plano de betonagens, um documento que define as cotas das camadas de betonagem previstas, as condições correspondentes à formação de uma junta fria e os tempos previstos para a execução das diferentes betonagens existentes.

Uma vez conhecido o plano de betonagens, considerando a exigência de se produzir o betão de forma contínua, devem ser estudadas diferentes hipóteses para a programação da obra, seleccionando as mais adequadas. A programação, que muito influencia a organização do estaleiro, depende da análise, em fase de estudo prévio, das acessibilidades, do possível impacto ambiental no local, da topografia existente, da natureza do fluxo do rio, da presença de recursos na proximidade que possam ser utilizados, da distância entre o local de produção e construção, dos equipamentos de transporte, das condições atmosféricas previstas durante o decorrer da construção e da presença de população no local, de forma a evitar que sejam ultrapassados os limites admissíveis de poeiras e a garantir que a circulação viária existente não é afectada (RSB, 1998).

Todas estas condicionantes permitem definir de forma eficaz tempos e espaços dentro do estaleiro, que facilitam a escolha da misturadora mais adequada e a programação das distâncias entre os espaços envolvidos na construção da barragem.

Por todos os condicionantes anteriormente enumerados e pela necessidade, já referida, de produzir este betão de uma forma contínua, o local de fabrico é programado simultaneamente com o local dos depósitos de agregados, considerando que uma localização em planta adjacente a ambos, minimiza o tempo de transporte dos componentes do betão e reduz o número de equipamentos utilizados (ACI, 1999).

Estes depósitos são geralmente constituídos por baias ou estrelas que separam os agregados em diferentes fracções, com quantidades armazenadas que chegam a representar cerca de metade dos agregados necessários à amassadura da mistura total.

Estas quantidades são vantajosas sob o ponto de vista de possíveis paragens na produção devidas a interrupções no fornecimento de agregados, a transporte fora de horas, avarias, greves, ou uma menor taxa de exploração dos agregados. Permitem ainda um

melhor controlo de contaminação, de rotura de partículas, de temperatura e uniformizam a humidade das misturas produzidas (Coutinho, 1994).

Outro aspecto a ter em atenção na organização do estaleiro numa obra em BCC são os acessos que garantem a circulação dos equipamentos, que devem ser cuidadosamente planeados de forma a evitar possíveis congestionamentos, garantindo-se assim uma circulação livre e segura em todo o estaleiro. A superfície destes caminhos deve apresentar-se limpa, ausente de quaisquer tipos de lamas, óleos, vegetação ou lodos que possam colar-se aos rodados dos equipamentos de transporte e, conseqüentemente, contaminar a superfície da camada sobre a qual o BCC será depositado. Por vezes, é reservada, dentro do estaleiro, uma área destinada à limpeza dos rodados dos veículos transportadores (figura 3.1), submetendo-os, antes de circularem sobre as camadas de BCC já colocadas, a um dispositivo de pulverização, que lava os seus rodados à medida que circulam lentamente dentro da unidade de limpeza (ACI, 1999).



Figura 3.1 – Lavagem dos rodados à entrada em obra (Sunny Wash, 2008).

No caso particular da Barragem do Pedrógão, em Portugal, o estaleiro foi organizado de acordo com o plano indicado na figura 3.2.

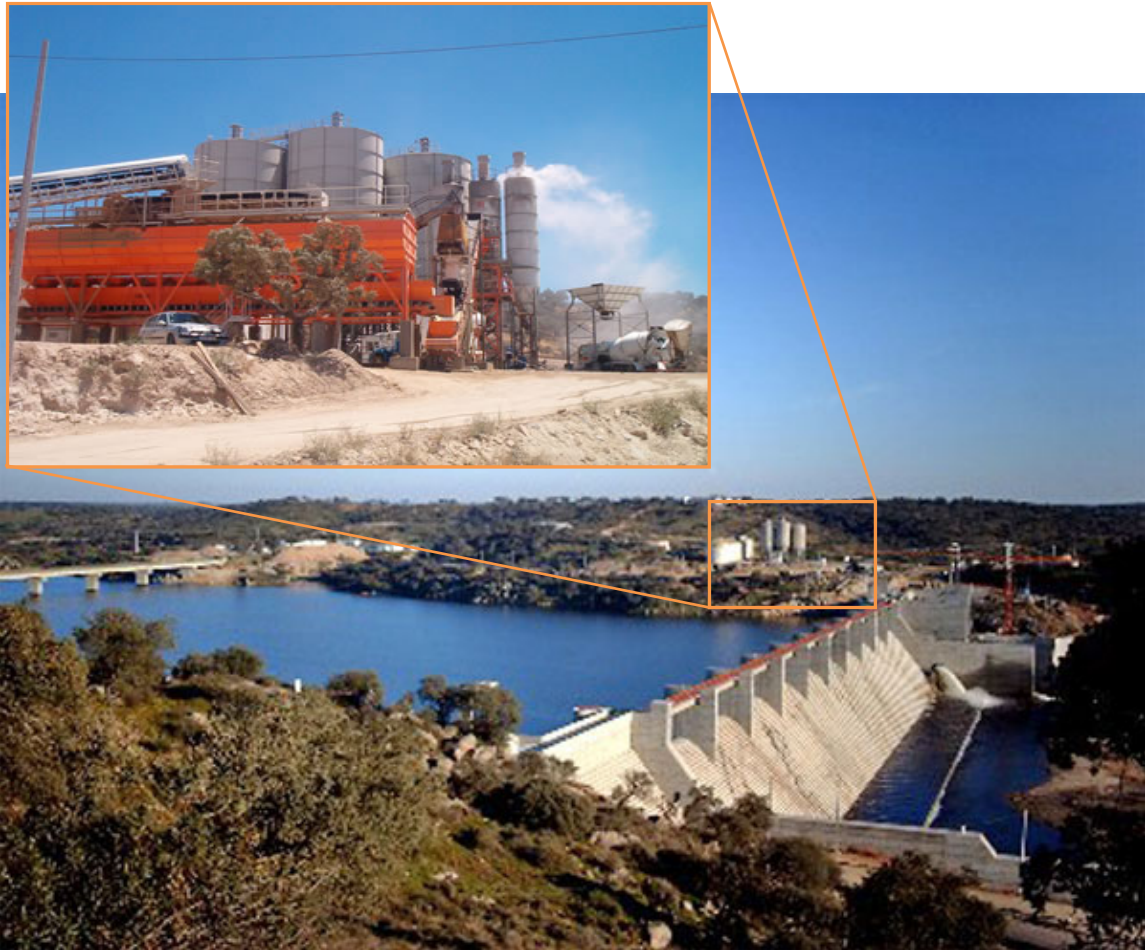


Figura 3.2 – Zona de produção do BCC na barragem do Pedrógão (Peri, 2006).

3.3 Fabrico da Mistura

À semelhança do betão convencional, o fabrico da mistura de BCC consiste na mistura das fracções dos constituintes doseados anteriormente até que toda a superfície dos agregados seja homogeneamente revestida com ligante. À saída da misturadora o BCC deve estar adequadamente misturado, nas proporções definidas, sem apresentar qualquer sinal de segregação.

Além de uma boa qualidade da mistura, este fabrico deve proporcionar uma taxa produtiva de betão elevada e contínua, capaz de responder às necessidades de colocação do

betão em obra. As taxas correntes de produção deste betão variam entre os 76 metros cúbicos por hora para pequenos projectos, 190-380 metros cúbicos por hora, em projectos de média dimensão, e 570 a mais de 760 metros cúbicos por hora para grandes projectos (ACI, 1999 e USACE, 2000), valores muito superiores aos recorrentes num betão convencional.

A escolha dos equipamentos de fabrico deste betão deve prever as características da mistura, nomeadamente a dureza, dimensão máxima e forma dos agregados, dosagens e possíveis condicionantes do estaleiro. Sendo um betão mais seco, o equipamento misturador deve garantir um desempenho compatível com o fabrico de uma mistura sem abaixamento por períodos longos sem paragens. Deve ainda evitar que o material que constitui a mistura se possa acumular nos cantos, pois isso pode diminuir a deposição de finos, conduzindo, conseqüentemente, à perda de capacidade produtiva.

As misturadoras utilizadas para o fabrico deste betão têm sido misturadoras contínuas do tipo pugmill (figura 3.3). Nas figuras 3.4 e 3.5 são ainda apresentados um esquema de produção do BCC neste tipo de misturadoras e em misturadoras de tambor, respectivamente. (ICOLD, 2003).

As misturadoras contínuas apresentam uma capacidade para produzir taxas mais elevadas de betão, conseguindo produzir o betão com taxas de uniformidade satisfatoriamente constantes (ACI, 1999). Ambas têm gerado boas misturas, dependendo as propriedades obtidas das dosagens de agregados, cimento, água e eventuais adjuvantes.



Figura 3.3 – Misturadora contínua “Pugmill” (Ciber, 2008).

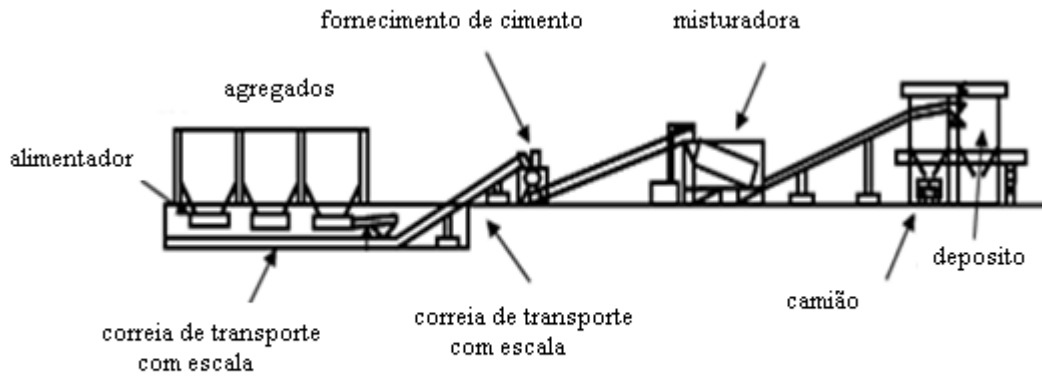


Figura 3.4 – Esquema de misturadora Contínua Australiana (Nagayama et al, 2003).



Figura 3.5 – Misturadora de tambor (Andrade, 2008).

3.4 Propriedades da mistura

As propriedades da mistura são resultantes dos materiais que a constituem. Enquanto fresca, deve dar-se especial atenção à massa volúmica, à quantidade de água, à trabalhabilidade e consistência, e ao calor gerado, pois são as propriedades que mais influenciam o transporte, a colocação e as propriedades que o BCC atinge depois de endurecido (Andrade, 2008). Seguidamente, são feitas algumas referências a estas propriedades, avaliadas à saída da misturadora.

3.4.1 Massa Volúmica

Esta característica depende essencialmente das massas volúmicas dos materiais utilizados na formulação do BCC. A massa volúmica obtida numa mistura de BCC é superior à obtida num betão convencional com o mesmo tipo de agregados (cerca de 1 a 3%), devido à menor dosagem de água e pasta da mistura e à maior energia de compactação. No entanto, esse aumento pode ser nulo, isto se o BCC formulado apresentar na sua constituição um filer com baixa massa volúmica ou uma quantidade de material pozolâmico significativa, ou ainda se a dosagem de água de amassadura também for aumentada. Na tabela 3.1 podem observar-se massas volúmicas de misturas de BCC utilizadas na construção de barragens no Mundo.

Tabela 3.1 – Massas específicas de algumas barragens no mundo (Andriolo, 1989).

Obra	País	Massa Volúmica
Itaipu	Brasil	2,62
Saco de Nova Olinda	Brasil	2,36
Shimajigawa	Japão	2,46
OhkaWa	Japão	2,30
Sakaigawa	Japão	2,54
Uppser Stillwater	EUA	2,40
Santa Efigência	Espanha	2,37

3.4.2 Quantidade de Água na Mistura à Saída da Misturadora

No que respeita à quantidade de água, a mistura deve possuir, à saída da misturadora, a quantidade mínima necessária ao desencadeamento das reacções de hidratação do cimento, e também a quantidade mínima suficiente para que a mistura saia uniforme e com um aspecto homogéneo. Essa quantidade de água necessária deve ser a suficiente para que a mistura apresente uma consistência suficiente, capaz de suportar os equipamentos construtivos que sobre ela circularam durante a construção.

Como se tem estudado, a água apresenta-se como um lubrificante durante a compactação da mistura, facilitando o rearranjo das partículas durante a vibração, pelo que uma quantidade de água maior que a necessária diminui a resistência da mistura (Project Bacara, 1996).

A quantidade de água na mistura à saída da misturadora aparece ainda ligada à porosidade da mesma, como se pode observar na figura 3.6, que representa a porosidade de duas misturas aplicadas em obra, função da quantidade de água presente nas mesmas. A porosidade tende a seguir uma linha de tendência, isto é, para dada quantidade de água presente numa mistura atinge-se uma porosidade mínima.

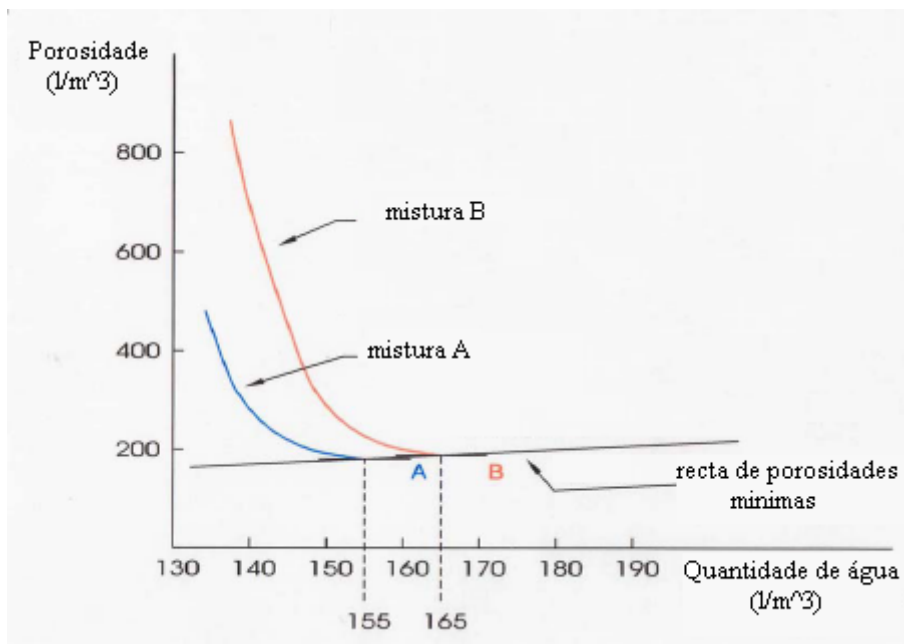


Figura 3.6 – Relação entre a porosidade e a quantidade de água numa mistura de BCC (Sagrado, 2008).

Estas propriedades (quantidade de água na mistura e porosidade) podem ser medidas através de equipamentos existentes, e funcionam como elementos de controlo de qualidade da mistura à saída da misturadora.

3.4.3 Trabalhabilidade e Consistência

A trabalhabilidade do BCC é a propriedade que determina a capacidade de o BCC ser colocado e posteriormente compactado sem segregação prejudicial. Inclui os conceitos de compacidade e, até certo ponto, moldabilidade e consistência. É afectada pelos mesmos factores que afectam a trabalhabilidade do betão convencional (ou seja, quantidade de cimento, quantidade de água, presença de substâncias químicas, adições minerais, dimensões dos agregados e qualidade dos mesmos): o efeito, porém, de cada um no BCC não será o mesmo que seria para um betão convencional (USACE, 2000).

No BCC, a trabalhabilidade não pode ser medida ou avaliada da mesma forma que seria para um betão convencional (através de um ensaio de abaixamento como referido em 2.3.1), pois num betão compactado com cilindros não está previsto qualquer tipo de abaixamento. Deste modo, um passo crítico na dosagem das misturas de BCC é estabelecer o nível de trabalhabilidade desejado (Ortega, 1988).

3.4.4 Calor Gerado

À semelhança do que ocorre num betão convencional, também no BCC se geram calores. Na mistura fresca, a principal fonte de calor é resultante da hidratação do cimento, das reacções químicas existentes quando o cimento fica em contacto com a água, e é tomado como prejudicial para a estrutura, pois a sua libertação resulta, na maioria dos casos, em tracções que geram fendilhações na estrutura.

Ao contrário do que acontece no betão convencional, o BCC assume o uso de uma menor quantidade de água, que possibilita uma baixa quantidade de cimento na mistura, sendo parte da dosagem de cimento substituída por outro material ligante. Em substituição do cimento, são usadas quantidades máximas de pozolanas ou escórias com resistência, durabilidade, economia e exigências de construção, para diminuir a quantidade de cimento Portland a utilizar. Ao usar uma menor quantidade de cimento na mistura, reduz-se o calor gerado (USACE, 2000). A quantidade de pozolanas, escorias e cimento utilizadas devem ser analisadas em laboratório numa fase de pré-construção, no que mais à frente será descrito como plataforma experimental.

3.5 Preparação da Fundação

À semelhança do betão convencional, as fundações para a execução de uma barragem em BCC devem ser escavadas até que sejam atingidos níveis adequados de fundação sob o ponto de vista geotécnico. As fundações ideais são constituídas por rocha, capazes de suportar a estrutura, resistentes à erosão e a uma possível fendilhação. Ao contrário do que acontece nos outros betões as fundações nas estruturas em BCC podem suportar alguma deformação (Portland Cement Association, 2003).

As normas de construção de barragens (RSB, 1998) referem ainda que na altura do lançamento de uma camada de regularização em betão convencional ou em BCC a fundação deve apresentar uma superfície limpa e isenta de impurezas, para que a ligação entre o betão e o maciço rochoso seja a melhor possível. A figura 3.7 representa a preparação da superfície de fundação de uma barragem.



Figura 3.7 – Preparação de fundação para barragem em BCC (Portland Cement Association, 2003).

3.6 Transporte da Mistura

O equipamento de transporte influencia em grande medida a qualidade superficial das camadas. A sua escolha depende do volume de material a transportar, dos acessos existentes, do equipamento disponível, da possibilidade de segregação da mistura, que consiste na separação do material mais grosseiro do material fino, e da possibilidade que a mistura possa apresentar para secar ou contaminar-se durante o transporte.

Na selecção do equipamento de transporte da mistura, deve considerar-se a necessidade de uma rápida capacidade de escoamento desta desde o local de fabrico até ao local de deposição, uma vez que quanto maior o tempo de exposição da mistura, menor o seu grau de compactação devido aos processos de secagem atmosféricos. Segundo o ACI (1999), o tempo de transporte de uma mistura de BCC não deve exceder os 45 minutos.

Geralmente, o transporte da mistura de BCC pode dar-se de forma directa, recorrendo, para isso, ao uso de camiões semelhantes aos utilizados no transporte e colocação de solos (como representado na figura 3.8), de forma contínua, através de tapetes rolantes (como se pode observar na figura 3.9), ou de forma mista, combinando o transporte por camiões e tapetes rolantes (como se observa na figura 3.10).

O método mais escolhido tem sido o de transportar a mistura através de camiões semelhantes aos utilizados no transporte e colocação de solos, pois apesar de ser o menos conservador das características que a mistura apresenta à saída da misturadora, é o menos dispendioso. Nesta solução de transporte, deve considerar-se a distância de transporte, o estado dos acessos, a duração de tempo de transporte, a intensidade de tráfego existente e a topografia do local.

Deve ainda avaliar-se a possibilidade dos rodados dos veículos que transportam a mistura possuírem substâncias, nomeadamente lamas ou vegetação, que possam poluir e, conseqüentemente, prejudicar a ligação entre camadas. Com esta solução, conseguem transportar-se misturas formuladas com agregados de maior dimensão igual a 38 mm, sem que ocorra a segregação da mistura.



Figura 3.8 – Transporte da mistura através de tapetes rolantes na barragem de Berña Espanha (Sagrado, 2008).



Figura 3.9 – Transporte da mistura de BCC através de caminhões (Portland Cement Association, 2003).



Figura 3.10 – Transporte da mistura por um sistema misto (Castro, et al, 2006).

Embora na maioria dos casos seja mais vantajoso recorrer ao transporte de agregados por caminhões, pela sua economia, a solução de utilizar tapetes rolantes para transportar a mistura de BCC é muito mais adequada. O transporte por tapetes rolantes é muito utilizado quando a distância entre o local de fabrico e o local de deposição da mistura não é muito grande, não existem muitos pontos de derivação no posicionamento

dos tapetes e os acessos por camião são mais complexos. Este sistema de transporte permite ainda o transporte sem segregação de misturas com máxima dimensão de agregados de 75 mm.

Recorrendo aos tapetes rolantes para transportar a mistura, deve garantir-se que estes funcionaram a velocidades adequadas, que garantam o escoamento adequado da mistura da central de fabrico, sem que ocorra segregação da mesma. Devem ainda ser largos e ocasionalmente portadores de uma protecção em caso de tempo excessivamente seco ou de chuva, devendo apenas considerar-se esta solução no caso de grandes ou médias construções, devido ao seu elevado custo.

Por vezes não é possível recorrer a um único tipo de transporte, havendo a necessidade de combinar um transporte da mistura por camiões com um transporte da mistura por tapetes rolantes – um sistema de transporte misto – como aconteceu no caso português da barragem do Pedrógão. Este tipo de transporte surge devido a condicionantes locais, quer sejam por factores topográficos, quer seja pelo facto da combinação possibilitar uma velocidade de colocação muito superior em comparação com as restantes soluções. Este sistema de transporte recorre a transportes mais económicos no exterior da barragem e diminui o risco de sujidade da superfície sobre a qual será compactada uma nova camada de mistura. Recorre-se geralmente a camiões para transportar a mistura no exterior da barragem e a tapetes transportadores para levar a mistura ao local de espalhamento e compactação (USACE, 2000).

3.7 Colocação e Espalhamento

A colocação do BCC consiste na descarga cuidadosa da mistura transportada no local da obra, evitando a segregação, e é a fase que antecede o espalhamento da mistura.

Ao contrário do betão convencional, que, pelas suas características, é depositado directamente no local, no BCC é necessário espalhar a mistura depois de colocada, dadas as suas características de um betão seco. A figura 3.11 estabelece a comparação entre os métodos de colocação utilizados no betão convencional e no BCC.



Figura 3.11 – Comparação entre espalhamento de um betão convencional e um BCC (Castro, et al, 2006).

O espalhamento tem a importante função de redistribuir os componentes na massa do betão para correcção de eventual segregação ocorrida no transporte e na descarga. Este passo é extremamente importante quando as misturas contêm agregados de grandes dimensões, devendo ser efectuado na totalidade da camada antes do início da compactação, de forma a evitar juntas verticais, que proporcionariam locais mais susceptíveis de percolação de água.

Segundo estudos efectuados (Schrader, 2003), o espalhamento deve dar-se em camadas com espessura ideal de 300 mm, pois será a espessura que assegura um melhor grau de compactação com os equipamentos de compactação habituais neste tipo de barragens. Esta espessura pode ser assegurada por marcas topográficas estabelecidas previamente nos paramentos de jusante e montante, podendo estas marcas representar o número de camadas, a altura ou mesmo a cota da galeria.

Ao longo dos anos o espalhamento do material tem-se dado em camadas aproximadamente horizontais como se representa na figura 3.12. No entanto, novos estudos têm sido efectuados, e tem aparecido muitas vezes, nos últimos anos, uma colocação de material em camadas mais inclinadas, designando-se esta forma de método rampado de colocação do BCC, como apresentado na figura 3.13.

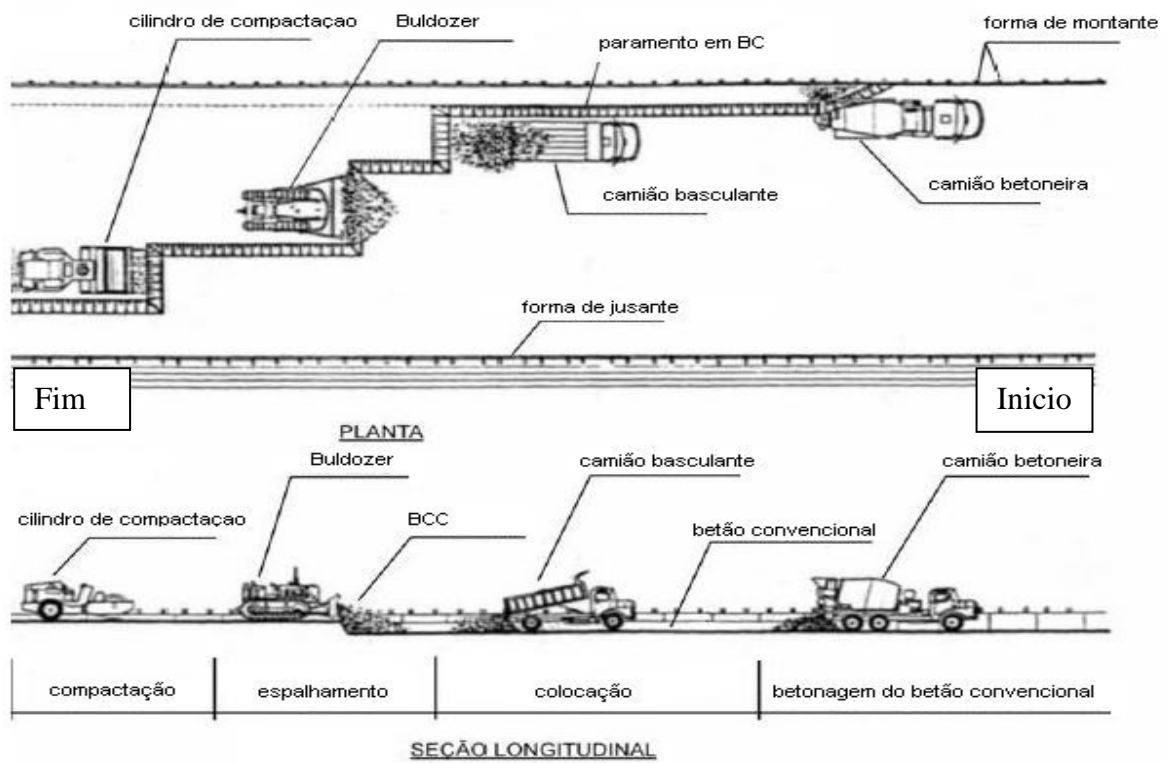


Figura 3.12 – Etapas da colocação do BCC em obra pelo método comum de colocação em camadas horizontais (Moser, 2006).

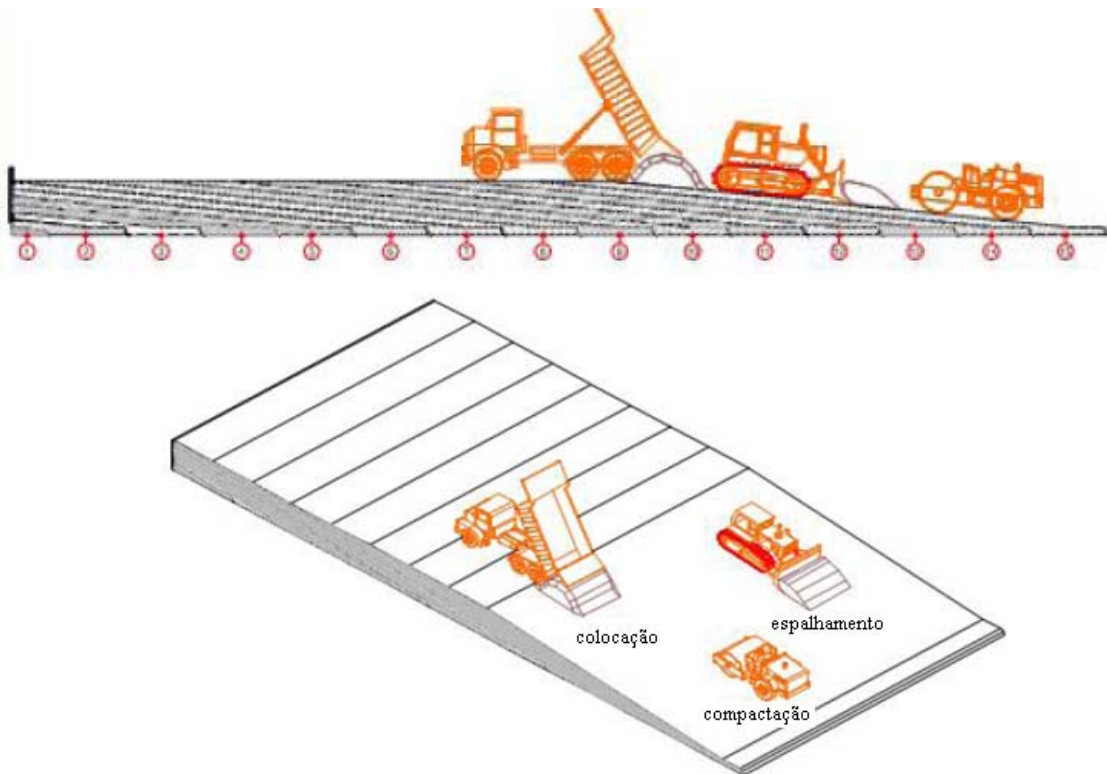


Figura 3.13 – Etapas da colocação do BCC em obra pelo método rampado (Andriolo, 2008).

O equipamento escolhido para efectuar o espalhamento é geralmente um tractor tipo “bulldozer” (tractores equipados na parte frontal com uma lâmina de aço), com dimensão e capacidade adaptados ao tipo de obra, ao volume de betão a espalhar e ao sistema de transporte utilizado, como se mostra na figura 3.14.



Figura 3.14 – Espalhamento da mistura de BCC na barragem de Wadi Dayqah (Brian, 2008).

A escolha deste equipamento é condicionada pelo sistema de transporte escolhido. No caso do transporte se efectuar por camiões, é necessário usar equipamentos mais potentes para efectuar o espalhamento, pois a descarga da mistura envolve a acumulação de maior volume de material num mesmo local. No entanto, se o transporte é efectuado por tapetes rolantes, a descarga é repartida por menores volumes, devendo usar-se equipamentos menos potentes. Em pequenas obras, o espalhamento pode efectuar-se com retroscavadoras.

Por vezes, existem interrupções na colocação e espalhamento do material, devido a condicionantes exteriores, por exemplo nos períodos de chuva. Neste caso, a última camada colocada deve ser o mais rapidamente possível compactada, com o objectivo de proteger todo o processo. Como medida de protecção adicional, podem ainda proteger-se as camadas já colocadas com coberturas impermeáveis (membranas plásticas, por

exemplo). Entendem-se por chuvas intensas as que possivelmente lavarão a superfície dos agregados da mistura recentemente compactada.

3.8 Compactação

A compactação é a fase que se segue à colocação e espalhamento de uma camada da mistura, devendo o intervalo de tempo existente entre o fabrico da mistura e esta fase ser o menor possível, de modo a evitar a ocorrência de evaporação de água presente na mistura, pois caso contrário a qualidade do betão fica comprometida, não devendo ser compactado.

3.8.1 Compactação em Zona Corrente

Os equipamentos utilizados para a compactação são geralmente cilindros vibradores de rasto liso (figura 3.15), ou mesmo o próprio bulldozer, sendo este último utilizado nas obras de menor importância, desde que o betão não seja demasiado seco e as camadas não sejam muito espessas (ACI, 1999). Embora não seja especificado em nenhuma norma, a velocidade de circulação destes equipamentos deve rondar os 1 a 2 quilómetros por hora, e a última passagem sobre a camada deve ser efectuada sem vibração para regularizar a superfície da camada (Andriolo, 2003).



Figura 3.15 - Compactação de uma camada de BCC (Castro, e tal, 2006).

O número de passagens do compactador varia consoante as propriedades da mistura: pode variar entre 4 e 6 vezes, devendo no entanto, este valor ser definido de acordo com resultados das plataformas experimentais efectuadas (ACI, 1999). Contrariamente ao que se possa pensar, um maior número de passagens do equipamento compactador sobre a mistura pode ser prejudicial na compactação, podendo causar o esmagamento dos agregados, uma maior secagem à superfície, ou a redução da densidade deste betão.

Assim sendo, o número de passagens deve ser apenas o suficiente para proporcionar uma boa consolidação da mistura, devendo terminar-se sempre que a superfície da camada apresente um aspecto liso e com algum brilho, resultante da chamada de água por parte do cilindro, como se observa na figura 3.16.



Figura 3.16 – Aspecto do BCC depois de compactado na barragem de Koudiat Acerdoune (Brian, 2008).

3.8.2 Compactação em Zonas de Cofragens, Paramentos e Galerias

Nas zonas junto às cofragens, paramentos ou galerias, os equipamentos vibradores pesados não proporcionam a compactação desejável devendo deixar-se aproximadamente 25 centímetros sem qualquer compactação. Esta largura será posteriormente compactada

recorrendo a equipamentos de compactação manual, representados na figura 3.17, ou será preenchida com betão convencional como se pode visualizar na figura 3.18. (ACI, 1999).



Figura 3.17 – Compactação junto à rocha com equipamento manual (ACI, 1999).



Figura 3.18 – Preenchimento com betão convencional junto à cofragem (Brian, 2008).

O grau de compactação é um dos responsáveis pela boa resistência mecânica adquirida (Project Bacara, 1996), dependendo esta dos factores que afectam a trabalhabilidade do betão, nomeadamente as características da camada inferior, a limpeza da superfície, as características da mistura, a dosagem de água, e o tempo decorrido entre o fabrico da mistura e o tempo de compactação.

3.8.3 Plataforma Experimental

Como se referiu, o número de passagens do equipamento de compactação sobre a superfície a compactar deve ser determinado nas plataformas experimentais para testar e avaliar materiais e técnicas de construção.

Segundo a legislação portuguesa (RSB, 1998), antes do início da construção em BCC, deve executar-se um bloco experimental, fora da zona de construção, destinado à realização de ensaios. O bloco experimental deve ser efectuado com os equipamentos de fabrico, colocação e compactação a usar na construção da barragem, e tem como objectivos:

- ✓ Ajustar as dosagens definidas, quanto à trabalhabilidade da mistura;
- ✓ Conhecer o desempenho dos equipamentos de transporte, espalhamento e compactação;
- ✓ Definir o número necessário de passagens do cilindro de compactação;
- ✓ Analisar os tempos de formação de juntas frias, bem como estudar a ligação de camadas;
- ✓ Prever as características mecânicas da mistura, efectuando ensaios de resistência à compressão e à tracção de carotes retiradas da plataforma experimental;
- ✓ Prever o comportamento das juntas verticais;
- ✓ Experiência/estudo do comportamento do que se vai elaborar;

Com base nos resultados experimentais obtidos, devem elaborar-se especificações técnicas que incluam a origem dos materiais utilizados, bem como a composição da mistura, os ensaios realizados e algumas considerações a ter em conta durante a colocação real.

Tal como nos betões convencionais, os projectos que não utilizam materiais previamente usados requerem um maior nível de responsabilidade na avaliação da qualidade. Devem ser avaliados os agregados, os ligantes, os adjuvantes, e os outros materiais utilizados na constituição da mistura, para assegurar uma qualidade de desempenho satisfatória e durável. (USACE, 2000).

Durante a fase de ante projecto, deve ser realizado um estudo prévio que confirme a localização e as características das proporções da mistura de BCC que permitam observar

algumas condicionantes de colocação e compactação. Isto possibilita a previsão de intervalos de tempo entre colocações das camadas, espessura das camadas, e técnicas de colocação e compactação do BCC. Para projectos menores, pode ser mais prático incorporar o ajuntamento de dados de selecção e de teste na fase de construção, evitando assim o recurso a estas plataformas experimentais.

A qualidade das superfícies construídas é crítica em relação à estabilidade de uma estrutura e ao seu desempenho. A formulação das proporções da mistura e os programas de ensaios subsequentes são as primeiras etapas para assegurar as tensões resistentes, bem como o desempenho esperado para a estrutura. A especificação apropriada de procedimentos e controlo de campo da construção são vitais para assegurar que o desempenho é alcançado. A equipa de projecto deve balançar as exigências estruturais, o desempenho material, e as actividades requeridas e permissíveis da construção na preparação de um projecto viável projectado.

3.9 Cura

A cura é a fase que se segue à compactação de uma camada e antecede a colocação da camada posterior, tendo por objectivo atrasar a formação de uma junta fria entre camadas. Este processo pode dar-se por meio de nebulizadores, como se observa na figura 3.19, ou por aspersão recorrendo a tractores, devendo, em ambos os casos evitar-se o encharcamento da camada compactada (ACI, 1999).

O uso de camiões de água não é aconselhado, pois arrasta os finos para a superfície da camada e, por outro lado, aumenta a probabilidade de dano sobre as superfícies, criando-lhes abaixamento nas zonas dos rodados.



Figura 3.19 – Cura do BCC através de nebulizadores (Castro, et al, 2006).

3.10 Juntas

3.10.1 Juntas horizontais de Construção

Segundo Ortega (1988), designa-se por junta horizontal de construção a separação existente entre duas camadas de BCC sucessivas. Estas juntas podem ser de dois tipos: juntas quentes e juntas frias. As juntas quentes existem quando a colocação do BCC é contínua, não tendo a camada anterior formado presa antes da colocação da camada seguinte. Este tipo de junta não necessita de qualquer tratamento, devendo apenas ser garantido que a superfície da camada já compactada se mantém limpa, dando-se, nestes casos, uma colocação de forma contínua. Por sua vez, as juntas frias ocorrem sempre que o tempo de colocação entre camadas excede uma a quatro horas (Sagrado, 2008). Na figura 3.20, é possível observar a tendência de formação de uma junta fria, bem como o que se passa quanto à qualidade de ligação da mesma com o decorrer do tempo.

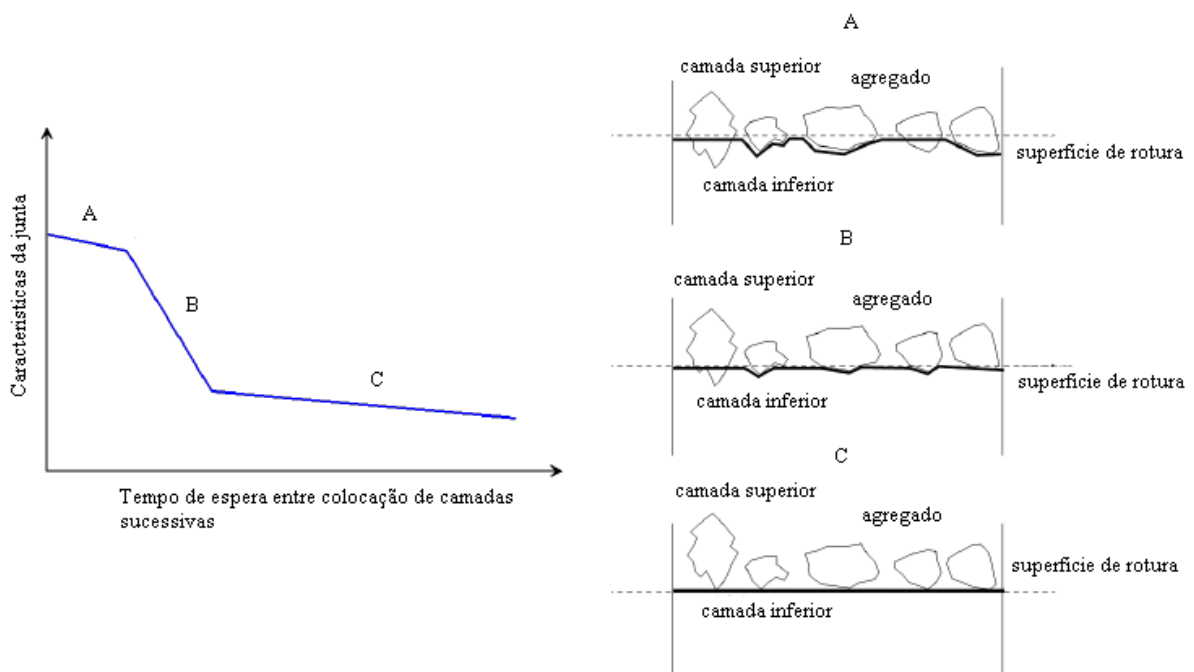


Figura 3.20 – Esquema de formação de uma junta fria (Sagrado, 2008).

As juntas horizontais de construção dependem das condições do local e da mistura, isto é, aparecem sempre que o betão da camada inferior já formou presa e as características de ligação entre camadas não são as mais adequadas. Nestes casos, torna-se necessário, além de manter a superfície da camada anterior limpa, aplicar sobre a superfície da camada já compactada uma calda de cimento, designada por mistura de ligação com melhores

características de ligação como se pode observar nas figuras 3.21 e 3.22, antes da colocação da camada seguinte.

No que respeita à junta existente entre a primeira camada de BCC e a fundação, as principais preocupações a considerar quanto ao nível de ligação, são a resistência ao escorregamento e a impermeabilização, dado que a percolação nas barragens se dá essencialmente nesta junta.

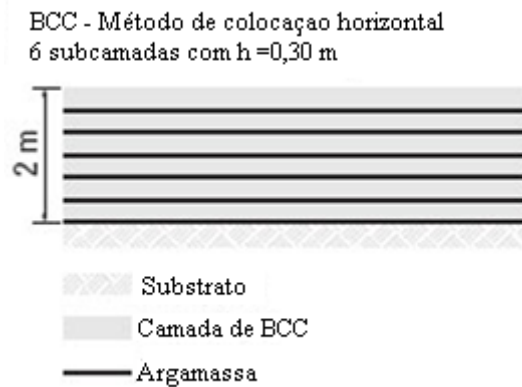


Figura 3.21 – Mistura de ligação entre camadas (Téchné, 2007).



Figura 3.22 – Colocação da mistura de ligação em obra (Nagayama, 2008).

No caso particular da barragem do Pedrógão em Portugal ficou definida a especificação, após testes experimentais em laboratório, que considera, a necessidade de uma camada sofrer tratamento com uma mistura de ligação, apenas se o período de colocação entre camadas sucessivas excedesse as 15 horas (Ortega, 2007).

3.10.2 Juntas Verticais de Contração

As juntas de contração verticais são realizadas com o objectivo de controlar as possíveis fissuras que podem ocorrer no corpo da estrutura devido a gradientes térmicos elevados. Estas juntas dividem a estrutura em blocos e, assim, evitam ou minimizam, o aparecimento de fissuras térmicas na direcção montante-jusante.

Podem existir juntas verticais de construção para dividir secções efectuando um corte sobre a superfície de BCC já compactada, realizadas na direcção perpendicular ao fluxo de água. No interior destas, pode inserir-se uma chapa metálica, plástica ou de outro material qualquer que interrompa a continuidade das camadas de grande extensão, através de um equipamento vibrador, como se pode observar na figura 3.23 (USACE, 1993).

O número de juntas de contração a efectuar é determinado pelo projectista e tem como base estudos térmicos que prevêem a fissuração com base em modelos de cálculo efectuados de acordo com o tipo de estrutura e as condições locais da obra.



Figura 3.23 – Materialização de uma junta de contração na barragem do Pedrógão (Castro, et al, 2006).

Devido à menor dosagem de cimento do BCC, o calor de hidratação libertado será menor e conseqüentemente, a tendência de fissuração diminui. É assim, necessário um menor número deste tipo de juntas. Contudo, a experiência tem revelado que nem sempre

isso acontece: geralmente, as estruturas são dotadas de várias juntas deste género, aumentando, deste modo, o grau de liberdade de deformação da estrutura.

As primeiras barragens executadas em BCC, no Japão, não apresentavam quaisquer tipos de juntas verticais, pois devido às menores reacções exotérmicas resultantes da hidratação do cimento conseguia eliminar-se este tipo de juntas da constituição do corpo da obra. No entanto, tem-se verificado nos últimos anos que este tipo de juntas não pode ser dispensado na totalidade pois, como se referiu, contribuem para melhorar a liberdade de deformação (Project Bacara, 1996).

3.11 Paramentos

Numa barragem existem dois paramentos, um a montante e outro a jusante, podendo ser de diversos tipos: verticais, inclinados ou em degraus. A escolha do tipo de paramento depende da geometria da estrutura (extensão e volume), das condições físicas do local da obra (temperatura, acção sísmica do local, velocidade do vento), das características da mistura de BCC, dos métodos construtivos adoptados, das condições de exploração previstas para a estrutura e de aspectos estéticos.

O paramento de montante constitui a superfície que fica em contacto com a água da albufeira, tendo como função garantir um aumento de resistência às acções agressivas da água susceptíveis de contaminar o betão. Este paramento pode estar sujeito a acções de tracção desenvolvidas por forças hidrostáticas ou deformações ocorridas no corpo da estrutura, pelo que a sua construção requer um elevado nível de fiscalização.

No que respeita ao paramento de jusante, a sua construção é bastante simples. No caso do paramento de montante ser vertical, este paramento de jusante é obrigado a possuir uma inclinação mínima de $0,75H/1V$ por questões de estabilidade, mesmo quando é construído em degraus, podendo esta inclinação minimizar-se a $0,80H/1V$ dependendo das características do betão utilizado (Project Bacara, 1996).

À semelhança dos paramentos de montante, os paramentos de jusante das barragens de BCC podem ser construídos em betão compactado, betão compactado enriquecido em ligante, betão convencional, ou elementos de betão pré-fabricados.

Ao nível da construção, os paramentos podem dividir-se em duas grandes categorias: impermeabilidade assegurada pelo corpo da barragem e impermeabilidade assegurada por painéis ou outros materiais de impermeabilização. Na primeira categoria inserem-se os paramentos em betão convencional ou BCC, enquanto na segunda estão incluídos os que são constituídos por elementos pré-fabricados e asseguram a impermeabilidade por possuírem uma membrana de impermeabilização (Project Bacara, 1996).

No que respeita à inclinação, podem ser apenas inclinados ou em degraus o caso de Pedrógão figura 3.24. O facto de o paramento ser em degraus deve-se, tal como nas barragens de betão convencional, a estudos hidráulicos que demonstram a vantagem desta geometria, pelo facto de diminuir a energia quando da passagem de água sobre os degraus do descarregador.



Figura 3.24 – Construção do paramento jusante na barragem de Pedrógão (Peri, 2006).

3.12 Órgãos Incorporados

Os órgãos construtivos mais importantes que uma barragem pode incorporar, são os descarregadores e as galerias. Os descarregadores são semelhantes aos das estruturas de betão convencional, e são definidos de acordo com as características de descarga da barragem. A sua construção pode ser, como o nome indica, em descarregadores inclinados em BCC, descarregadores de BCC, descarregadores de betão convencional compactado e descarregadores de betão convencional inclinados (USACE, 2000).

As galerias, à semelhança do que se passa no betão convencional, podem ser de dois tipos: de acesso, geralmente situadas no sentido paralelo ao desenvolvimento da barragem, sendo construídas sempre que possível no balanço das margens, ou na zona de fundação, onde o BCC contacta com a rocha, para remediar o problema; e de visita, necessárias por razões de segurança. As galerias de visita são, à semelhança das existentes no betão convencional, dispostas longitudinalmente no corpo da obra e permitem que a barragem seja explorada de forma prática e segura, facilitando as inspeções ao corpo da barragem e permitindo o controlo do comportamento da estrutura (Project Bacara, 1996).

Existem vários métodos de construção destas galerias, podendo até, em projectos de menores dimensões, ser eliminadas, desde que se adoptem as medidas necessárias à drenagem.

As galerias podem ser construídas preenchendo espaços com material grosso durante a compactação (servindo de cofragem) que posteriormente é retirado por escavação, podem ser executadas em betão convencional através recorrendo a cofragens ou podem ser constituídas por elementos de betão convencional pré-fabricado, montadas posteriormente durante a construção da estrutura como mostra a figura 3.25.



Figura 3.25 – Galeria de visita (USACE, 2000).

3.13 Instrumentação

A instrumentação utilizada nas barragens de BCC é idêntica à utilizada nas barragens construídas em betão convencional. A sua instalação, contudo, deve ser programada de modo a interferir o menos possível com a compactação das camadas. Este cuidado com a interferência da colocação de instrumentação é extremamente importante, pois como já se referiu anteriormente, é importantíssimo que a taxa de colocação e compactação do betão não deva ser afectada durante o período construtivo.

Os instrumentos devem então ser instalados, quando necessário, em determinados locais situados ao longo da barragem, para que as medições possam ser feitas durante a construção, verificando o comportamento da estrutura.

Essa instrumentação deve monitorizar as variações de temperatura por meio de termómetros eléctricos, a ocorrência de pressões de percolação no interior do BCC (particularmente na zona de juntas), por meio de piezómetros a medição de possíveis movimentos nas juntas, por meio de extensómetros e ainda medir os caudais infiltrados a montante na estrutura. A figura 3.26 mostra a instalação de termómetros embutidos no corpo da barragem de Pedrógão em Portugal. Note-se que podem ser instalados antes ou

depois da compactação da camada, no entanto, caso a colocação seja efectuada antes da compactação devem tomar-se cuidados especiais, especialmente, quando o compactador passa na camada sobre o equipamento.



Figura 3.26 – Colocação de termómetros embutidos no BCC (Castro, et al, 2006).

3.14 Controlo de Qualidade e de Execução

O controlo de qualidade numa barragem de BCC é definido antes do início da construção e visa controlar a execução da construção, garantindo que esta é executada de acordo com o projecto, as especificações e a legislação existente, permitindo assegurar as exigências de qualidade e desempenho da estrutura quer durante a construção, quer durante a sua vida útil.

O BCC tem grandes exigências ao nível do controlo de qualidade, devido à sua rápida velocidade de construção. O conhecimento do local, a escolha do sistema de produção, transporte, espalhamento e compactação, o controlo dos materiais, as condições de fundação e o acabamento das superfícies que irão receber o betão, as juntas de construção e o processo de cura são alguns dos principais factores que devem ser controlados. O RSB (1998) refere que, no caso particular de uma construção em BCC, deve ser feita uma avaliação cuidada das espessuras, da regularidade das camadas, do peso volúmico, do teor em água da mistura e da temperatura a que este é aplicado, durante toda a construção.

Para garantir uma mistura de boa qualidade, são efectuados ensaios que identificam e avaliam a aptidão dos agregados e dos ligantes escolhidos para comporem a mistura. No que respeita aos agregados, são controladas, em estaleiro, a granulometria, forma, características químicas, plásticas e térmicas, enquanto os ligantes são controlados ao nível do calor de hidratação que se irá gerar na mistura.

A mistura deve ser controlada à saída da misturadora, durante o transporte e colocação em obra, devendo garantir-se que não apresente segregação e que apresenta um aspecto homogéneo e consistente. No final da compactação, são geralmente efectuados ensaios a carotes extraídas, para avaliar a resistência obtida, o módulo de elasticidade e as características de ligação entre camadas.

Esta avaliação é normalmente repetida ao fim de três meses, pois é nessa altura que o betão apresentará as suas propriedades máximas, uma vez que os ligantes utilizados neste tipo de construção têm como característica um desenvolvimento de resistências mais lento de forma a evitar fissurações (Project Bacara, 1996).

Durante a colocação em obra, devem igualmente ser efectuados ensaios que verifiquem se o teor em água é satisfatório a uma boa compactação, uma vez que, durante o transporte, a mistura pode perder água, por evaporação, ou ganhar mais água, devido a precipitação.

No caso particular da barragem do Pedrógão foi efectuado um controlo de qualidade às características dos diferentes BCC colocados, tendo sido para isso, no fim de construída a totalidade da barragem, retiradas algumas carotes com diâmetros de 123 e 190 milímetros. Essas carotes revelaram uma uniformidade no betão, em que as juntas existentes entre camadas se revelaram totalmente invisíveis. Este facto leva a concluir que o objectivo de construir uma estrutura verticalmente monolítica foi alcançado (Ortega, 2007).

Às carotes retiradas foram ainda efectuados ensaios de resistência à compressão para avaliação das resistências alcançadas, que revelaram o alcance de resistências próximas das estimadas em laboratório na ordem de aproximação dos 10 por cento.

Foram ainda efectuados ensaios de permeabilidade à estrutura, quer em laboratório às carotes extraídas, quer in-situ através de ensaios de permeabilidade (Lugeon ou Lefranc), estes ensaios revelaram, como seria de esperar, que o nível de permeabilidade da mistura de BCC formulada com uma maior dosagem de ligante cimento é muito maior do que a mistura de BCC formulada com ligante cimento e pozolanas.

4 Propriedades do BCC Endurecido

4.1 Generalidades

O betão compactado com cilindros apresenta, depois da execução da camada, praticamente as mesmas propriedades do betão convencional, sendo as diferenças existentes resultantes da menor dosagem de água e de pasta existente no BCC quando comparadas com as dosagens do betão convencional.

À semelhança do betão convencional, as propriedades deste betão dependem grandemente da força e da durabilidade exigidas pela estrutura. Porém, são também fortemente influenciadas pela misturadora utilizada na amassadura da mistura e pelos meios de transporte, colocação e compactação.

A caracterização destas propriedades pode ser obtida através de ensaios laboratoriais em provetes, efectuados para o efeito, ou em carotes extraídas do corpo da estrutura. Os ensaios efectuados a carotes extraídas resultam geralmente, em valores mais representativos do material efectivamente colocado em obra, tornando-se muito úteis na percepção do comportamento da estrutura.

Com este capítulo pretende-se então, descrever de modo sumariado, algumas das principais propriedades do BCC após formação de presa, bem como a importância dos factores que influenciam essas propriedades.

4.2 Características Mecânicas

4.2.1 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão é dos mais simples de efectuar num betão, sendo recorrente relacionar os valores obtidos neste ensaio com outras propriedades características do betão endurecido, como a durabilidade. Talvez pela facilidade de determinação da resistência à compressão, esta é a propriedade utilizada como controlo de

qualidade do betão em obra para confirmar as propriedades pretendidas em projecto (ACI, 1999).

Para efectuar este controlo de qualidade são realizados provetes em laboratório, ou são recolhidas carotes em obra, de modo a ser possível determinar os valores de resistência à compressão em várias idades do BCC. Os resultados obtidos nestes ensaios dependem de diversos factores, nomeadamente factores relativos ao material utilizado na mistura, agregados, dosagem de água, dosagem de ligantes e eventualmente dosagem de adjuvantes. Dependem ainda da humidade local, e do grau de compactação efectuado às camadas.

Das propriedades referidas, as que mais influenciam as resistências à compressão atingidas pelo BCC são precisamente a qualidade e a dosagem dos agregados, e a dosagem de ligantes utilizada (Andrade, 2008). Como se pode observar pelas figuras 4.1 e 4.2, que representam a resistência à compressão atingidas por um BCC formulado com agregados de boa qualidade e a resistência à compressão atingida por um BCC formulado com agregados de menor qualidade para diferentes idades – 7 dias, 14 dias, 28 dias, 90 dias e 1 ano – os valores do BCC formulado com os melhores agregados atingem níveis muito mais elevados, como seria de esperar, visto que os agregados são os principais constituintes da mistura.

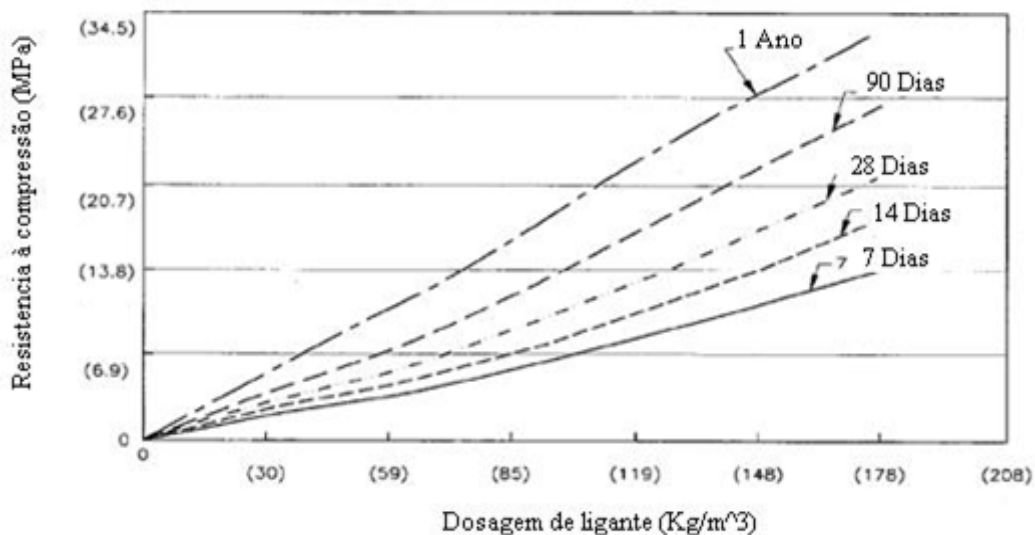


Figura 4.1 - Curvas de resistências à compressão associadas a um BCC formulado com agregados de boa qualidade (ACI, 1999).

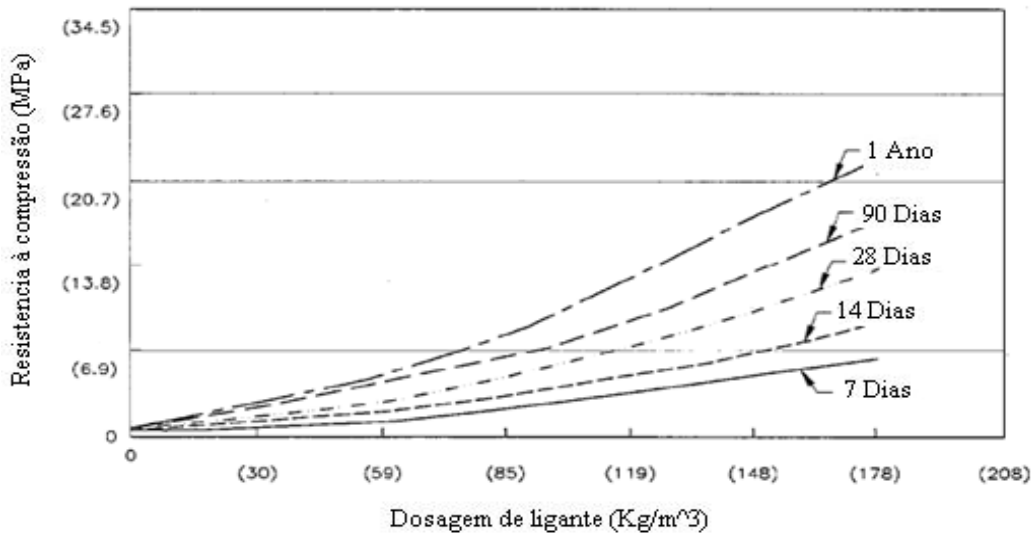


Figura 4.2 – Curvas de resistências à compressão associadas a um BCC formulado com agregados de menor qualidade (ACI, 1999).

Nas figuras 4.3 e 4.4, pode observar-se claramente a influência das dosagens de ligante na resistência à compressão para diferentes idades do BCC: 7 dias, 28 dias, 90 dias e 1 ano. Na figura 4.3, o BCC foi formulado apenas com o ligante cimento, enquanto na figura 4.4 o BCC foi formulado com os ligantes cimento e pozolanas, sendo estas últimas doseadas entre 30 a 50% do material ligante.

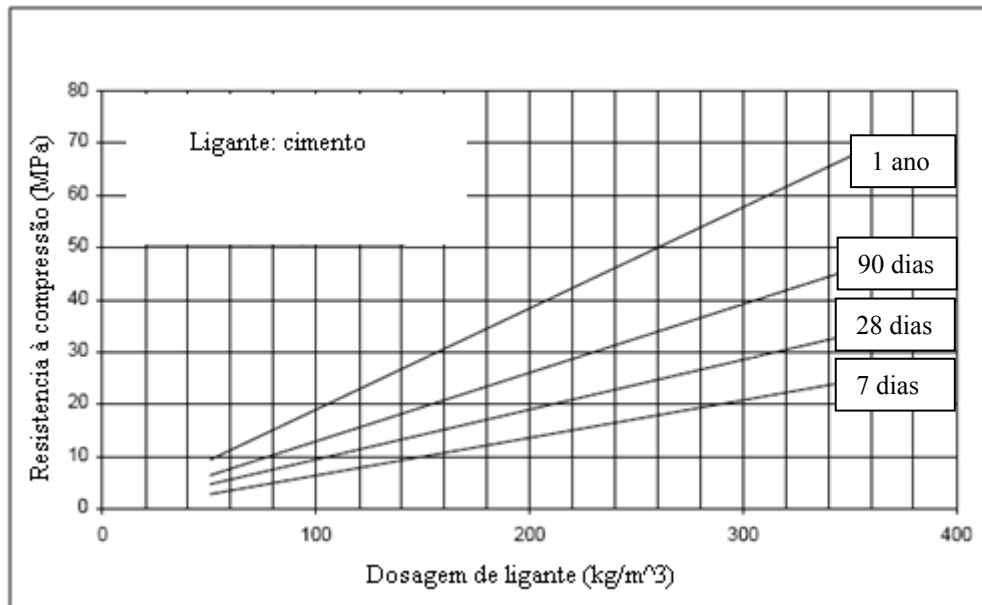


Figura 4.3 – Relação consumo de cimento (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) (USACE, 2000).

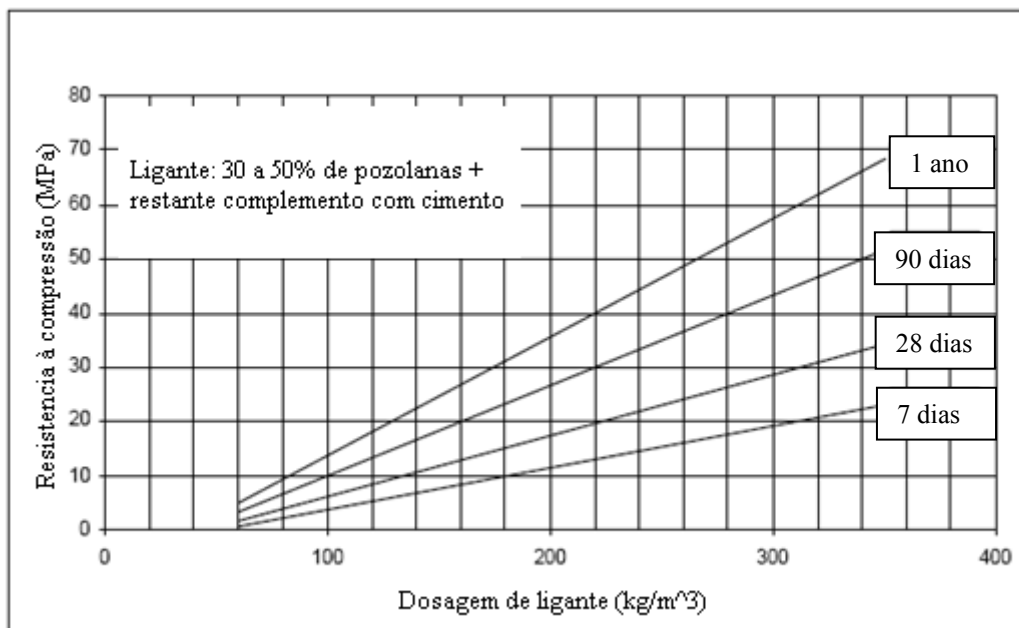


Figura 4.4 – Relação consumo de cimento com pozzolanas (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) (USACE, 2000).

Como se constata, para as menores dosagens de ligante o uso do ligante, cimento sem material pozolâmico permite atingir um maior valor de resistência mecânica; no entanto, para maiores dosagens de ligante, o valor de resistência alcançado é semelhante, quer se utilize material pozolâmico ou não.

No caso de misturas formuladas segundo os procedimentos do betão convencional, verifica-se que a sua resistência à compressão aumenta sempre que o volume de pasta presente ultrapassa o volume de vazios existente, utilizando uma mínima quantidade de água, enquanto no caso da mistura formulada pela metodologia baseada nos conhecimentos da colocação e compactação de solos a resistência à compressão máxima é atingida, como na compactação de um aterro, com um teor em água óptimo de compactação da mistura.

Como se pode observar na tabela 4.1, o valor da resistência à compressão do BCC aumenta com o tempo, chegando, ao final de 365 dias, a ser o dobro relativamente ao valor atingido aos 90 dias. No caso particular da barragem de Upper Stillwater nos EUA, a sua resistência à compressão ao fim de 365 dias era de 46,5 MPa, enquanto aos 90 dias era de 21,4 MPa. Na mesma tabela, são apresentados alguns valores das resistências à compressão obtidas em algumas obras a nível mundial.

No caso particular da barragem em BCC do Pedrógão, em Portugal, foram alcançadas resistências à compressão médias de 16,4 MPa aos 28 dias e 31,7 MPa aos 365 dias, no principal betão colocado em obra (Ortega, et al, 2003).

4.2.2 Resistência à Tração

A resistência à tracção pode ser determinada de modo directo ou através de ensaios de resistência em compressão diametral, sendo, neste caso, a resistência à tracção cerca de 5 a 15% do valor da resistência à compressão diametral obtida. O valor desta resistência depende essencialmente da qualidade dos agregados da idade do betão, da dosagem de ligante e das condições de junta quando da colocação das camadas, isto é, se existiram juntas frias durante a colocação do BCC em obra. (ACI, 1999).

Um ponto importante na determinação da resistência à tracção de uma mistura é a orientação do provete em ensaio. Dados existentes revelam que a resistência alcançada em carotes extraídas horizontalmente do corpo da estrutura é cerca de 20% superior à resistência à tracção alcançada em carotes extraídas na vertical. A resistência à tracção directa na zona de juntas não depende da resistência da mistura mas sim da velocidade e das condições de construção das camadas. Na figura 4.5 pode comparar-se os resultados da resistência à tracção obtida em ensaios de laboratório, com resultados reais obtidos em carotes extraídas no campo.

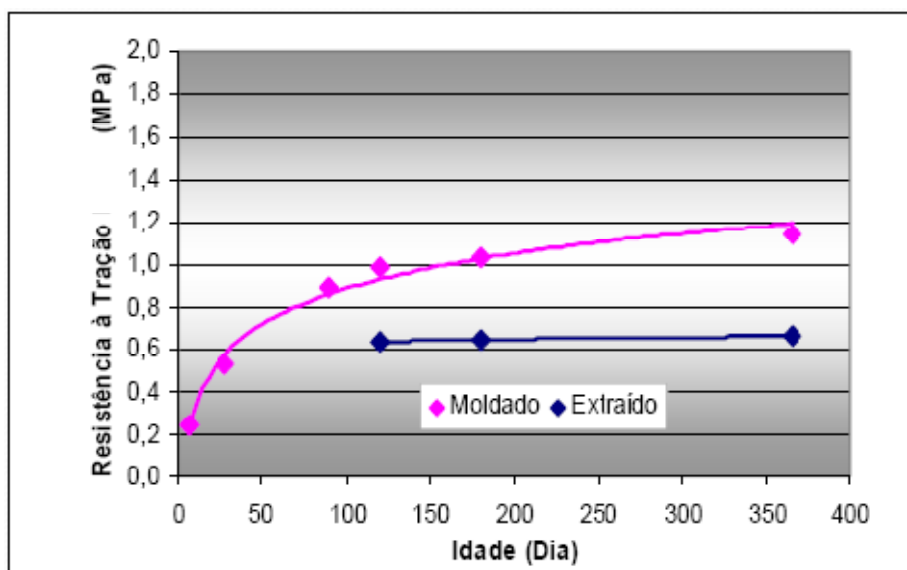


Figura 4.5 – Comparação entre as resistências à tracção obtidas em laboratório e obtidas em campo (Andrade, 2008).

4.2.3 Resistência ao Corte

A resistência ao corte é, geralmente, a propriedade mais crítica do betão endurecido em barragens de BCC, sendo especialmente importante na zona das juntas de contracção verticais.

Esta resistência é resultado da soma da coesão com o atrito interno e o deslizamento entre camadas, ocorrendo essencialmente na zona das juntas de construção do BCC (ACI, 1999), pelo que depende grandemente das condições e da velocidade construtiva. Quanto maior esta velocidade, melhores as características de ligação entre camadas e, conseqüentemente, maior é a resistência ao corte do BCC.

Esta resistência pode ser determinada em laboratório, à semelhança do que se passa nos aterros, através de ensaios de corte directo, utilizando para o efeito diferentes tensões normais através da equação de Coulomb, dada por:

$$\tau = c + \sigma \times tg(\phi)$$

em que:

τ é a resistencia ao corte num plano horizontal

c é a coesão da mistura;

σ é a tensão média vertical;

ϕ é o angulo de atrito interno existente

Na execução destes ensaios, torna-se necessário que as condições da superfície de junta simulem o que se passa em obra, particularmente no que se refere às condições de colocação, como seja o caso do tempo de exposição e os métodos de tratamento da junta, sempre que estes existam. Na tabela 4.2, podem observar-se valores característicos das resistências ao corte alcançados na construção de barragens a nível mundial.

4.3 Deformabilidade

4.3.1 Módulo de Elasticidade

Este valor, também designado por módulo de Young, é a razão entre a tensão normal e a extensão correspondente, em compressão ou tracção, em regime elástico.

A deformabilidade do betão constituinte de uma barragem deve ser relativamente elevada, ou seja, o betão deve apresentar um baixo módulo de elasticidade, o que permitirá reduzir a possibilidade de fissuração, quando o corpo da estrutura está sujeito a determinados níveis de tensão. Por outro lado, um baixo valor do módulo de elasticidade facilita adaptações a deformações impostas, como sejam assentamentos pouco significativos da fundação. Na figura 4.6, são apresentados os resultados de um estudo efectuado por Marques e Filho e apresentado por Andrade, (2008), onde se observa a comparação de resultados obtidos para o módulo de elasticidade num BCC efectuado em laboratório e num BCC efectuado em obra.

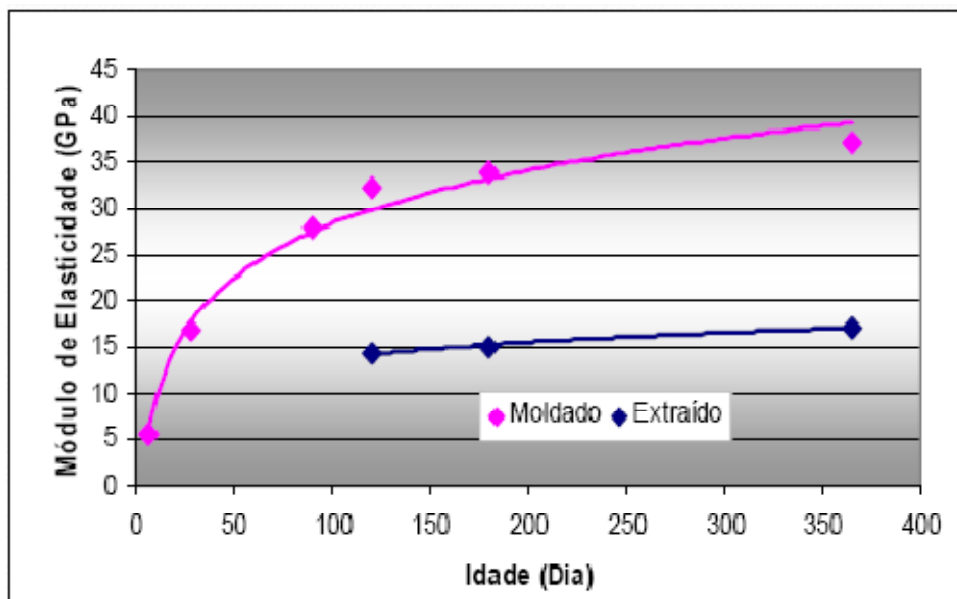


Figura 4.6 – Comparação entre o módulo de elasticidade de um BCC formulado em laboratório e um BCC formulado em obra (Andrade, 2008).

Esta propriedade do betão depende essencialmente da sua idade, do tipo de agregados que o constituem, da sua resistência e da dosagem de ligante utilizada na sua constituição, aumentando assim, como nos betões convencionais, com a idade (ACI, 1999).

Como se pode observar na tabela 4.1, são alcançados, aos 365 dias, valores para o módulo de elasticidade inferiores a 25 GPa, abaixo dos 30 GPa comuns num betão convencional: isto deve-se, principalmente às menores dosagens de ligante presentes nas misturas deste betão.

4.3.2 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson representa a relação entre a extensão transversal (lateral) e a extensão axial (longitudinal) correspondente que resulta de uma distribuição axial uniforme de tensões em regime elástico. No BCC, este coeficiente toma valores semelhantes aos do betão convencional entre 0,17 e 0,22 (USACE, 1993). Na tabela 4.1, podem também observar-se alguns valores deste coeficiente em diversas barragens de BCC mundiais.

4.4 Fluência e Capacidade de Deformação

A fluência define-se como a deformação ao longo do tempo provocada por uma tensão mantida constante (no tempo), podendo, no caso de barragens, a pressão exercida pela água sobre o paramento montante entender-se como sendo essa tensão constante. Por vezes, aparece associada a esta propriedade outra propriedade designada por relaxação, não sendo mais que a diminuição da resistência com o tempo.

Como em todas as estruturas de betão, no BCC a fluência é função das propriedades dos materiais constituintes do betão, da idade em que ocorrem os primeiros carregamentos e das temperaturas ambientais existentes.

4.5 Retracção

A retracção do BCC consiste, à semelhança do que acontece nos betões comuns, na deformação por perda de água. No entanto, é menor no primeiro tipo de betão, pela menor dosagem de água envolvida no seu fabrico. Esta propriedade é, então, afectada pela dosagem de água presente na mistura e pela relação água ligante presente. Geralmente, a presença de pozzolanas atenua a retracção do betão. (Ortega, 1988).

4.6 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas mais relevantes surgem de variações de temperatura que ocorrem durante a construção e o período de vida útil da obra. No corpo de uma barragem livre, correspondem a variações de volume ou de forma: no entanto, em estruturas restringidas de se deslocar geram tensões térmicas, podendo causar fissuração.

Estas propriedades variam geralmente consoante o tipo de agregados e dosagem de ligantes, pelo que betões constituídos com o mesmo tipo de agregados apresentam valores semelhantes quer para estruturas em BCC, quer para estruturas em betão convencional. Variam ainda em função da espessura das camadas e do desenvolvimento das mesmas em comprimento, sabendo-se, teoricamente, que camadas de maior comprimento têm tendência de formação de juntas frias mais rapidamente, necessitando, conseqüentemente, de tratamento.

Uma das principais fontes de libertação de calor numa estrutura deste tipo é o calor de hidratação libertado pelas reacções do ligante cimento com a água. Este valor está dependente da dosagem de ligante utilizada na formulação da mistura de BCC e da velocidade a que este é colocado. Quanto maior a dosagem de ligante cimento utilizada na formulação da mistura, maior o número de reacções exotérmicas existentes. Juntando esta consequência com a necessidade de uma rápida colocação, existirá em pouco tempo, um aumento térmico na estrutura constituída por grandes massas. Este processo, é muitas vezes, o responsável pelo aparecimento de fissuras no corpo da estrutura, podendo, por vezes, colocar a sua estabilidade em causa. Para o evitar são utilizados, como foi referido anteriormente em (2.2), ligantes com baixo calor de hidratação, com o objectivo de reduzir as quantidades de calor libertadas.

4.7 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida pela quantidade de água que atravessa o corpo de uma barragem, quer pela massa, quer pelas juntas existentes.

Esta propriedade depende largamente do número de vazios existente e da porosidade, pelo que, de forma directa, depende da mistura formulada, dos vazios

formados depois do endurecimento, e da compactação dada durante a construção (ACI, 1999). De um modo geral, numa barragem de BCC, a permeabilidade aumenta consoante o número de juntas existentes entre as camadas, podendo assimilar-se aos valores de uma Barragem em betão convencional no caso de não possuir juntas e se for composta por uma mistura enriquecida.

Dunstan (1989) sugere que quanto maior a dosagem de cimento na mistura, melhor a estanquidade da barragem e, conseqüentemente, menor a sua permeabilidade. Ensaio laboratoriais têm revelado que a permeabilidade de uma barragem construída em BCC ronda os $0,15$ a 15×10^{-9} cm/s.

4.8 Durabilidade

A durabilidade do BCC depende da energia de compactação, da quantidade de ligantes utilizados, da qualidade dos materiais, e da percentagem de compactação. Com agregados duros e densos e uma apropriada selecção do tipo e quantidade de ligantes o BCC exhibe uma excelente resistência à abrasão e à erosão, à alcalinidade de certos agregados e ao ataque de sulfatos (USACE, 2000).

A resistência do BCC a águas agressivas, a substâncias químicas, a gases, ou a simples lixivianos de componentes solúveis em água é função da permeabilidade do betão, sendo em misturas com baixo teor de ligantes, esta permeabilidade bastante elevada, pelo que a resistência diminui, atenuando, de igual modo, a durabilidade da estrutura.

Para misturas de massa interior pobres, a protecção de durabilidade é aumentada frequentemente pelo uso de uma mistura na zona exterior com uma maior percentagem de ligantes, a incorporação de revestimentos betões convencionais, o uso de membranas impermeáveis, e, por vezes, secções de maiores dimensões, de modo a permitir alguma deterioração.

A resistência de congelação do BCC sem admissão das chamadas “bolhas de ar” é baixa quando criticamente saturado, pois fica exposto a acções de gelo-degelo. Porém,

quando o BCC não está criticamente saturado, é relativamente resistente à congelação, até mesmo em zonas de clima severo.

Em aplicações de laboratório, a resistência às acções de gelo-degelo do BCC pode ser melhorada de forma muito significativa com o uso de inserção de bolhas de ar. No entanto, a consistente produção de bolhas de ar no BCC em condições reais foi de menor confiança.

Se a introdução de ar é específica para o BCC, devem ser utilizados ensaios de laboratório e de campo, de acordo com os materiais de projecto, para determinar a eficácia e as taxas apropriadas de dosagem desta adição, os efeitos do ar na trabalhabilidade e na quantidade de água exigida pelo BCC, os efeitos provocados nas operações de compactação, os efeitos dos vazios nos agregados e ligantes e no índice de introdução de ar.

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Valores característicos da resistência à compressão e características de deformabilidade determinados em cilindros de grandes barragens mundiais (ACI, 1999)

Nota: Método de fabricação dos cilindros: VB = vêbê (ASTM C 1176); MP = Proctor modificado (ASTM D 1557); e PT = Martelo pneumático																		
Barragem/Projecto	Identificação Da Mistura	Pozolanas (kg/m ³)	w/cm	Maxima Dim. agregado (mm)	Método fabricação cilindros	Resistência à compressão (MPa)					Módulo de Elasticidade (GPa)				Coeficiente Poisson			
						7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	365 dias	7 dias	28 dias	90 dias	365 dias	7 dias	28 dias	90 dias	365 dias
Camp Dyer	RCC1	81	0,55	38,1	VB	6,1	10,1	—	—	25,4	—	—	—	—	—	—	—	—
Concepcion	152C	0	1,03	76,2	PT	4,0	5,5	7,6	8,8	—	—	7,58	13,17	22,82	—	0,17	—	—
Galesville	RCC1	51	1,09	76,2	PT	2,1	4,0	7,0	—	11,2	—	—	—	—	—	—	—	—
	RCC2	68	0,84	76,2	PT	2,9	5,7	9,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Middle Fork	112C	0	1,43	76,2	PT	—	8,8	11,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Santa Cruz	1 E	—	0,88	51	PT	4,4	8,9	15,0	—	21,0	9,38	12,41	15,58	22,34	0,13	0,14	0,19	0,21
	RCCAEA	75	0,67	50,8	VB	7,5	18,8	22,2	—	30,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Stacy Spillway	210C105P	62	0,82	38,1	MP	—	18,1	21,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Stagecoach	120C130P	77	0,93	50,8	PT	1,5	2,4	—	6,8	8,6	—	—	—	—	—	—	—	—
Upper Stillwater	L1	—	0,47	51	VB	9,4	14,7	24,2	—	36,0	—	7,10	9,10	11,79	—	0,13	0,14	0,17
	L3	—	0,43	51	VB	7,7	11,2	19,1	—	34,2	—	6,34	—	12,14	—	0,13	—	0,18
	RCCA	173	0,39	50,8	VB	7,4	12,6	17,9	—	44,1	—	—	—	—	—	—	—	—
	RCCB	206	0,33	50,8	VB	9,2	15,4	21,4	—	46,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Urugua-I	101C	0	1,67	76,2	PT	—	6,4	8,1	—	9,6	—	15,51	21,51	24,82	—	—	—	—
Willow Creek	175C	0	1,06	76,2	PT	6,9	12,8	18,3	—	26,1	15,17	18,41	19,17	—	—	0,19	0,18	—
	175C80P	47	0,73	76,2	PT	7,9	14,2	27,3	—	28,6	16,55	20,06	22,41	—	—	0,21	0,21	—
	80C32P	19	1,61	76,2	PT	4,0	8,1	11,9	—	18,1	18,27	10,96	13,17	—	—	0,14	0,17	—
Zintel Canyon	100C1975	—	2	76	PT	1,9	4,3	7,5	—	10,7	4,69	10,62	14,82	17,72	—	—	0,21	—
	200C1975	—	1	76	PT	6,8	11,2	14,7	—	21,4	10,62	16,48	17,03	22,62	—	—	0,2	—

Propriedades do BCC endurecido

Tabela 4.2 - Valores característicos da resistência ao corte determinados em cilindros em grandes barragens mundiais (ACI, 1999)

Nota: Tipo de junta: B = tratada NB = sem tratamento P = betão presente															
Barragem/Projecto	Tipo Mistura	Cimento (kg/m ³)	Pozolanas (kg/m ³)	w/cm	Maxima dim. agregados (mm)	Tipo Junta	Idade (dias)	Resistência à compressão interior (MPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de corte °	Resistência ao corte (kPa)	Ângulo de Corte residual °	Consistência tempo vêê, (segundos)	% Juntas ligadas	Maturidade das juntas
Cuchillo Negro	130C100P	77	59	0,99	76,20	B	750	17	1551	58	—	—	—	—	—
	130C100P	77	59	0,99	76,20	P	750	17	2482	52	—	—	—	—	—
	130C100P	77	59	0,99	76,20	NB	750	17	689	62	—	—	—	—	—
Elk Creek	118C56P	70	33	1,00	76,20	P	90	9	1551	43	—	—	21	—	—
	118C56P	70	33	1,00	76,20	B	90	9	862	49	—	49	—	58	—
Galesville	RCC1	53	51	1,09	76,20	NB	415	14	758	67	552	40	—	24	500
	RCC1	53	51	1,09	76,20	B	415	14	2275	52	483	43	—	76	—
	RCC1	53	51	1,09	76,20	P	415	14	2620	33	655	45	—	—	—
Upper Stillwater	RCCA	79	173	0,39	50,80	NB	365	36	3103	53	207	49	17	80	—
	RCCA	79	173	0,39	50,80	NB	545	39	3861	76	138	53	17	—	—
	RCCA85	79	173	0,37	50,80	P	120	27	2068	55	207	42	29	60	—
Victoria	113C112P	67	66	0,80	50,80	P	365	18	1931	64	276	47	730	—	—
	113C112P	67	66	0,80	50,80	B	365	18	1586	69	69	44	—	—	—
	113C112P	67	66	0,80	50,80	NB	365	18	1172	62	1379	48	—	—	—
Willow Creek	175C	104	0	1,06	76,20	NB	200	—	1278	65	—	—	—	57	500
	175C80P	104	47	0,73	76,20	NB	200	—	1279	63	—	—	—	54	500
	80C32P	47	19	1,61	76,20	NB	200	—	793	62	—	—	—	58	500
Zintel Canyon	125CNA	74	0	1,50	63,50	NB	345	10	586	56	69	40	14	—	—
	125CNA	74	0	1,50	63,50	B	345	10	1379	54	69	40	14	65	—
	125CNA	74	0	1,50	63,50	P	345	10	1999	56	0	55	14	—	—

5 Formulação de um BCC em laboratório

5.1 Generalidades

Das diferentes metodologias de formulação de um BCC referidas no capítulo 2 (2.3), escolheu-se para estudar neste trabalho a metodologia baseada nos conhecimentos de colocação e compactação de aterros da mecânica dos solos, por se considerar a que melhor simula em laboratório o processo construtivo deste tipo de barragens, construídas com recurso a equipamentos de espalhamento e compactação típicos dos aterros. Para tal, como referido, o material BCC deve possuir uma consistência que lhe permita suportar o peso dos cilindros de compactação em obra, uma granulometria e um teor em ligante adequados ao processo de compactação utilizado.

Deve ter-se ainda em atenção na formulação utilizada que para caracterizar este betão, de forma física e mecânica, o procedimento laboratorial deve reproduzir, tanto quanto possível, as condições de cura e os tempos de execução, tendo ainda como preocupação uma caracterização do comportamento do material, quer durante o período construtivo, quer durante do período de vida útil da obra.

O programa experimental de formulação de um BCC em laboratório que se apresenta foi executado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no Departamento de Engenharia Civil e apoia-se em estudos anteriores (Santana, 2000) que utilizaram esta metodologia para formular misturas de BCC. Estudos que tiveram como ponto de partida um único tipo de agregados, de origem calcária com uma granulometria constante ao longo de todos os ensaios, variando unicamente a quantidade e o tipo de ligante.

Nestes estudos experimentais já desenvolvidos, a dosagem de água obtida para diferentes dosagens de cimento e cinzas não sofreu grandes variações, tendo-se concluído que a dosagem de água depende fundamentalmente da dosagem e granulometria dos agregados e não da dosagem de ligante.

Neste sentido, a parte experimental desenvolvida neste trabalho, fixou, para além dos agregados, a quantidade de ligantes (neste caso cimento), tendo-se privilegiado o estudo da influência, na compactação da mistura de diferentes, quantidades de filer.

De facto, um bom betão com uma dosagem adequada é aquele que tem uma quantidade de finos (cimento+cinzas volantes ou pozolanas+filer), passados no peneiro nº 200 ASTM, e uma quantidade de água tais que, para uma dada granulometria, se obtenha uma porosidade mínima (Sagrado, 2008).

Apesar do inegável interesse da caracterização mecânica de provetes compactados por vibração com as diferentes misturas obtidas, esta análise não faz parte do presente trabalho experimental.

5.2 Aplicação da metodologia geotécnica

5.2.1 Descrição

Como referido em 2.3.2, esta metodologia de formulação de misturas em laboratório é baseada na optimização dos parâmetros de compactação: peso volúmico aparente seco e teor em água de diferentes misturas. A aplicação desta metodologia neste trabalho consiste basicamente no seguinte:

- ✓ Selecção de diferentes classes de agregados, com base nas suas características de granulometria, que apresentem boas características de resistência e de deformabilidade e que, por sua vez, possam ser estendidos a uma aplicação em obra.
- ✓ Definição de misturas utilizando as classes de agregados seleccionadas, variando os componentes destes em cada mistura, sobre as quais se realizam ensaios de compactação, determinando, para cada uma delas, o teor em água óptimo.
- ✓ A partir deste teor em água óptimo alcançado, estabelecem-se para cada mistura, as dosagens de cada um dos outros componentes, nomeadamente ligantes e eventuais adjuvantes, calculando-se os seus pesos por unidade de volume (kg/m^3).

5.2.2 Seleção dos Materiais Constituintes

Como foi referido no capítulo 2 devem seleccionar-se diferentes classes de agregados susceptíveis de ser utilizados em obra, com propriedades físicas e características mecânicas conhecidas. Os agregados seleccionados devem incluir areias, bem como um filer que será o responsável pela compensação da parte fina da mistura de agregados.

O estabelecimento das fracções de cada agregado é estabelecido de modo a gerar uma curva granulométrica compreendida no fuso teórico estabelecido por Reeves & Yeats (1985), apresentado na figura 2.3. A dimensão máxima não deve ser superior a 50 mm para minimizar a segregação do material durante o seu espalhamento e compactação. No presente trabalho, pretende-se apenas variar a quantidade de filer, mantendo os restantes agregados, obtendo-se assim diferentes curvas granulométricas, que diferem apenas na parte fina.

Relativamente ao cimento é fixada apenas uma dosagem, seleccionada com base em composições de BCC já estudadas. Essa dosagem é determinada em percentagem relativamente ao peso seco da mistura de agregados.

5.2.3 Preparação de Provetes e Ensaios de Compactação

A utilização destes equipamentos e o estudo das condições de compactação adoptadas foram objecto de aferição com base na Norma BS1924: Test 5, que se refere à realização de ensaios de compactação por vibração em solos estabilizados com ligantes hidráulicos (Santana, 2000).

Com base nesses estudos realizados quer para a formulação da mistura, quer para posteriores ensaios sobre o material endurecido, a técnica de compactação adoptada para a preparação de provetes é a seguinte:

- ✓ Utilização de um pilão vibrador de frequência elevada (2500-2600 percussões/minuto), com guiamento por estar menos dependente do operador;

- ✓ Utilização de uma placa circular de 140 mm de diâmetro, com uma espessura mínima de 10 mm, na extremidade do pé compactador;
- ✓ Provetes cilíndricos com as dimensões de 152 mm de diâmetro por 115 mm de altura (moldes do ensaio Proctor pesado – LNEC E 197-66 e 262-72);
- ✓ Compactação em três camadas com um tempo de vibração de 1 minuto por camada, ou até que a pasta apareça à volta da placa;
- ✓ Os provetes devem estar compactados nos 30 minutos subsequentes à amassadura, para evitar que o betão ganhe presa, com a consequente perda de trabalhabilidade, antes de terminada a preparação dos provetes;

Para realizar os ensaios de compactação do BCC utiliza-se o molde grande do ensaio Proctor Pesado (LNEC E197-66 e 262-72) com as características referidas na tabela 5.1 e o martelo vibrador Kango do DEC com as características apresentadas na mesma tabela. A figura do equipamento utilizado encontra-se na figura 5.1.

Tabela 5.1 – Características do equipamento utilizado.

Molde ensaio Proctor Pesado – Especificações LNEC E197-66; E-262-72	
Dimensões (mm)	Diâmetro: 152 mm Altura: 115 mm
Volume aproximado (m ³)	2,09 x 10 ⁻³
Peso do molde (kg)	1,5 kg
Martelo vibrador (Kango)	
Peso estático aproximado (N)	750 N
Frequência de percussão (percussões/min)	2500 - 2600
Potência de vibração (W)	750
Diâmetro da placa de base (mm)	143
Espessura mínima da placa de base (mm)	10

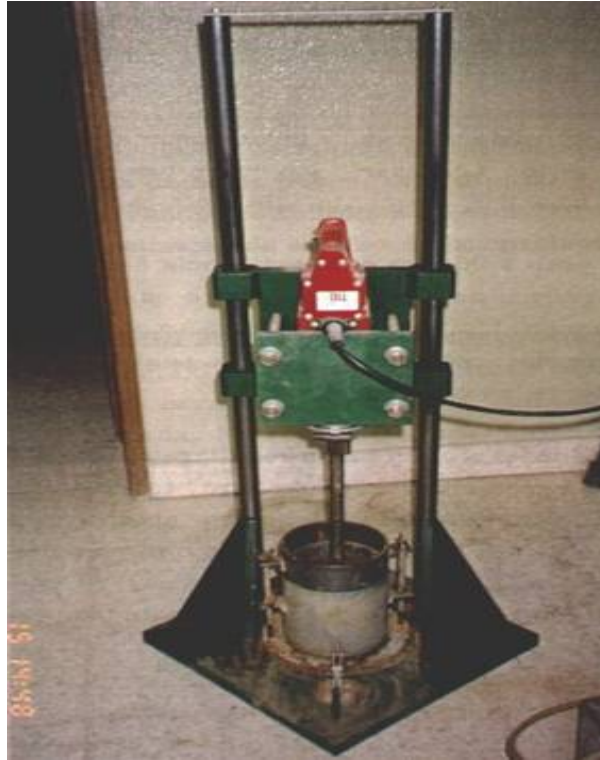


Figura 5.1 – Equipamento de ensaio do DEC.

Em geotecnia, o teor em água é definido pela relação entre o peso de água e o peso do material seco. No entanto, no betão fresco, a determinação do teor em água pelo método tradicional da mecânica dos solos, de secagem em estufa, não conduz ao valor da quantidade de água realmente existente em cada provete, devido ao consumo de água pelo processo de hidratação do cimento. Assim neste trabalho, o valor do teor em água é determinado pela razão entre o peso de água adicionada à amassadura antes da compactação e o peso seco da mistura agregados mais cimento, do seguinte modo:

$$\omega = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

Em que:

P_w é o peso de água adicionado(N)

P_s é o peso seco da mistura(N)

O peso volúmico húmido da mistura compactada (γ) é obtido a partir do peso total húmido da mistura depois de compactada (P_h) e do volume do molde (V) utilizado na compactação:

$$\gamma = \frac{P_h}{V}$$

O valor de $\gamma_d = (P_s/V)$ é obtido pela expressão que relaciona os resultados anteriormente obtidos:

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V} = \frac{\frac{P_h}{1+w}}{V} = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

Em que:

γ é o peso volúmico da mistura húmida

V é o volume do molde Proctor Pesado;

ω é o teor em água existente na mistura;

γ_d é o peso volumico seco da mistura;

P_s é o peso seco da mistura;

P_h é o peso húmido da mistura depois de compactada;

Resultam assim os diferentes teores em água e os pesos volúmicos secos que permitem determinar os valores necessários à construção de uma curva de compactação como a que se apresenta na figura 5.2.

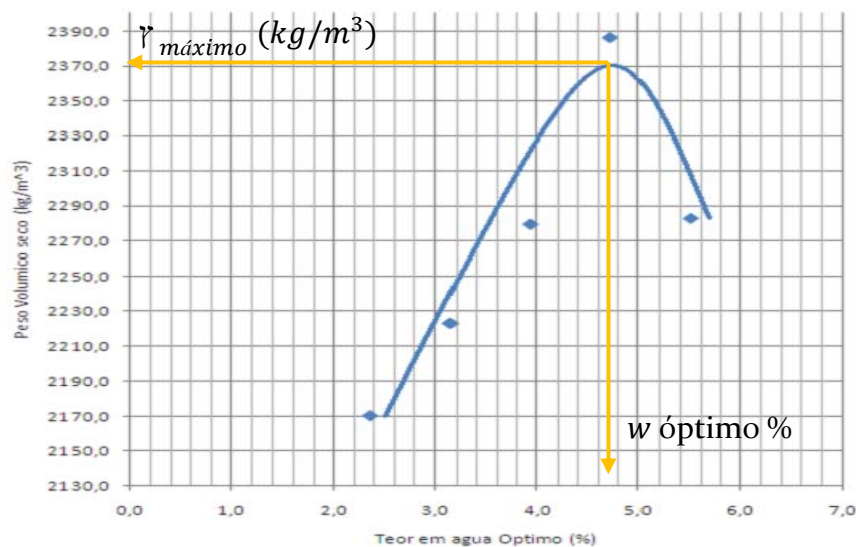


Figura 5.2 – Curva de Compactação de uma Mistura.

Os pontos representam o valor do peso volúmico seco de uma mistura em função do teor em água da mesma, e o pico da curva determina os parâmetros de compactação, ou seja, o teor em água óptimo e o correspondente peso volúmico aparente seco máximo.

5.2.4 Estabelecimento de Dosagens

Uma vez determinado o teor em água óptimo e o peso volúmico seco máximo de cada mistura podem determinar-se as dosagens dos componentes que vão constituir a mistura final em kg/m^3 . Para isso, sabe-se que o peso total P de um metro cúbico de mistura é:

$$P = P_w + P_{s,agr} + P_c$$

Em que:

P_w é o peso de água existente num metro cúbico de mistura;

$P_{s,agr}$ é o peso dos agregados secos num metro cúbico de mistura;

P_c é o peso do cimento num metro cúbico de mistura;

Dado que, $\gamma_d = \frac{P_s}{V}$ e $\omega = \frac{P_w}{P_s}$, com $V = 1 \text{ m}^3$, obtém-se:

$$P_w = \omega \times \gamma_d$$

ou seja o valor de P_w é obtido directamente multiplicando $\gamma_{d \text{ max}}$, obtido nos ensaios de compactação pelo respectivo teor em água óptimo determinado no mesmo ensaio (ω_{opt}), vindo em (kN/m^3).

Por outro lado o peso de cimento que existe num metro cúbico de cimento é função do peso seco dos agregados existentes num metro cúbico de mistura, isto é:

$$P_c = a \cdot P_{s,ag}$$

em que a , é uma constante que vai de 0 a 1.

Obtendo-se assim os valores pretendidos de P_c P_s P_w em kN/m^3

5.3 Programa de Ensaios

5.3.1 Propriedades dos Materiais Constituintes

O programa experimental desenvolvido neste trabalho aplica a metodologia geotécnica de formulação de BCC e tem como objectivo estudar a influência da percentagem de filer nas características de compactação da mistura de BCC.

Este estudo iniciou-se com uma selecção de materiais que pudessem constituir a mistura, principalmente ao nível dos agregados disponíveis. Além dos agregados disponíveis no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa recorreu-se a obras em curso nas imediações. Foram assim recolhidas amostras representativas dos agregados, transportadas para o laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil para se proceder às respectivas análises granulométricas e à determinação dos seus pesos volúmicos.

Recorrendo a uma folha Excel, com o fuso granulométrico base pretendido, apresentado na figura 2.3, foram testadas várias fracções de cada um dos materiais disponíveis com o objectivo de avaliar quais os materiais que permitiam obter uma curva granulométrica compreendida nesse fuso. A folha Excel está programada de modo a obter-se de forma instantânea a curva granulométrica resultante quando se combinam diferentes quantidades de materiais de granulometrias conhecidas.

Por fim foram seleccionadas três britas uma areia e um filer, este último utilizado como elemento compensatório da enorme escassez de material fino, cujas características granulométricas se apresentam na tabela 5.2. Na mesma tabela apresentam-se os valores dos respectivos pesos volúmicos das partículas sólidas (γ_s), determinados em laboratório, necessários à determinação do peso volúmico das mistura formuladas, valor que é dado pela razão entre o peso das partículas sólidas e o volume ocupado pelas mesmas. Na figura 5.3 são apresentadas as respectivas curvas granulométricas.

A areia foi cedida pela Secção de Materiais e Tecnologias de Construção e o filer utilizado foi um filer calcário, proveniente da pedreira Parapedra situada em Rio Maior.

Tabela 5.2 – Características granulométricas dos agregados utilizados na formulação de um BCC em laboratório.

PENEIROS		% Passados acumulados				
ASTM	(mm)	Areia 4,16/0,177	Brita 9,52/2	Brita 25,4/19,1	Brita 19,1	Filer
	38,10	-	-	100	-	-
	25,40	-	-	50	100	-
3/4"	19,10	-	100	17,2	86,24	-
3/8"	9,52	100	77,4	0,1	2,81	-
4,00	4,76	99,43	12	0,1	2,73	-
10,00	2,00	64,46	3	0,1	2,73	-
40,00	0,42	23,21	1,07	0,1	2,73	100
80,00	0,18	14,24	1,07	0,1	2,73	99,97
200,00	0,07	1,3	0,73	0,1	0,9	92,5
	γ_s (kN/m ³)	2450	2700	2700	2700	2850

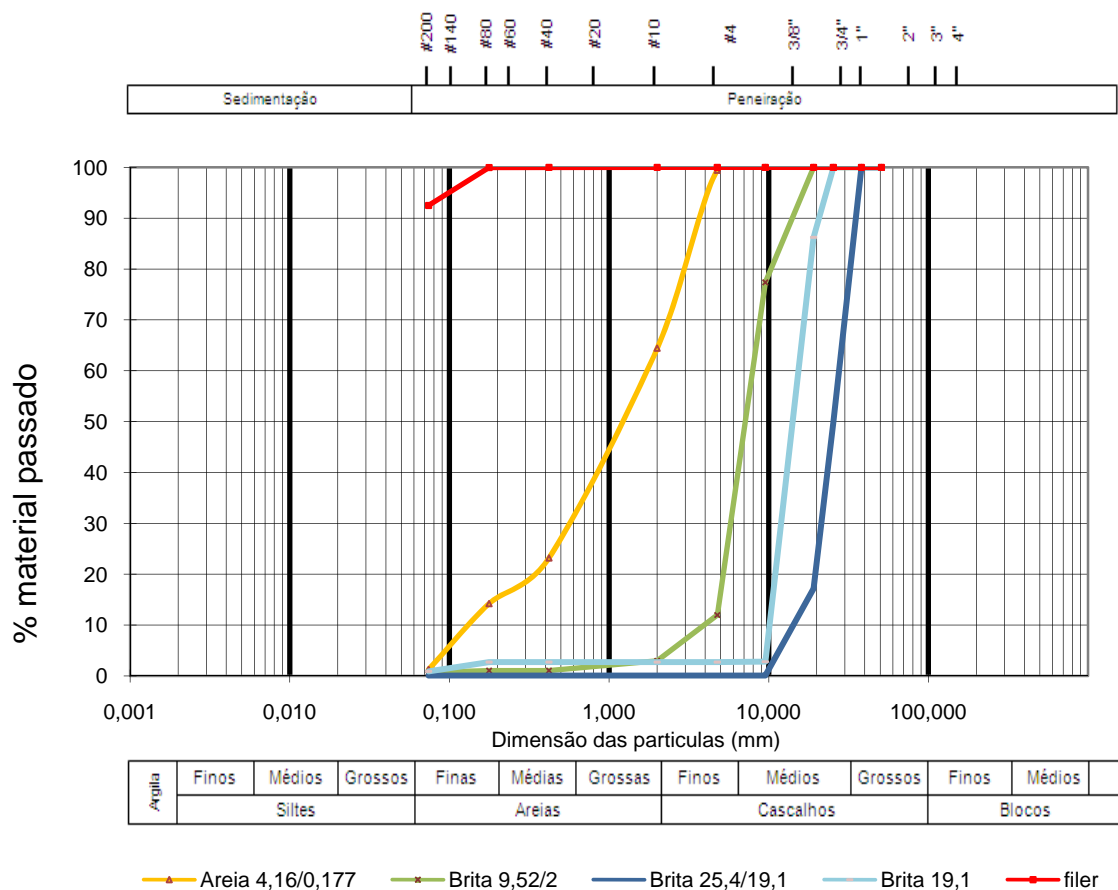


Figura 5.3 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados na formulação de um BCC em laboratório.

Recorrendo às classes de agregados seleccionados, foram estabelecidas diferentes curvas granulométricas, utilizando a folha Excel já referida. Foram fixadas as dosagens dos

agregados mais grossos e manteve-se constante a soma (em percentagem) do filer e da areia, em 55 por cento do peso seco total da mistura de agregados. No anexo I são apresentadas as folhas Excel com esses resultados.

As percentagens das diferentes classes de agregados em cada mistura estudada, constam da tabela 5.3, com as quais foram obtidas as curvas granulométricas da figura 5.4.

Tabela 5.3 – Percentagens das classes de agregados no total dos agregados.

Mistura	Agregados (%)				
	Filer	Areia 4,16/0,177	Brita 9,5/2	Brita 25,4/19,1	Brita 19,1
A	0	55	21	6	18
B	3	52	21	6	18
C	6	49	21	6	18
D	9	46	21	6	18
E	12	43	21	6	18

Tabela 5.4 – Percentagem de Passados acumulados das misturas de agregados estudadas.

	Peneiros									
	ASTM			3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,18	0,07
% Passados acumulados										
Misturas	A	100	97	92,56	71,77	57,7	36,58	13,49	8,55	1,04
	B	100	97	92,56	71,77	57,72	37,65	15,79	11,13	3,77
	C	100	97	92,56	71,77	57,74	38,71	18,1	13,7	6,51
	D	100	97	92,56	71,77	57,76	39,78	20,4	16,27	9,24
	E	100	97	92,56	71,77	57,77	40,85	22,7	18,84	11,98

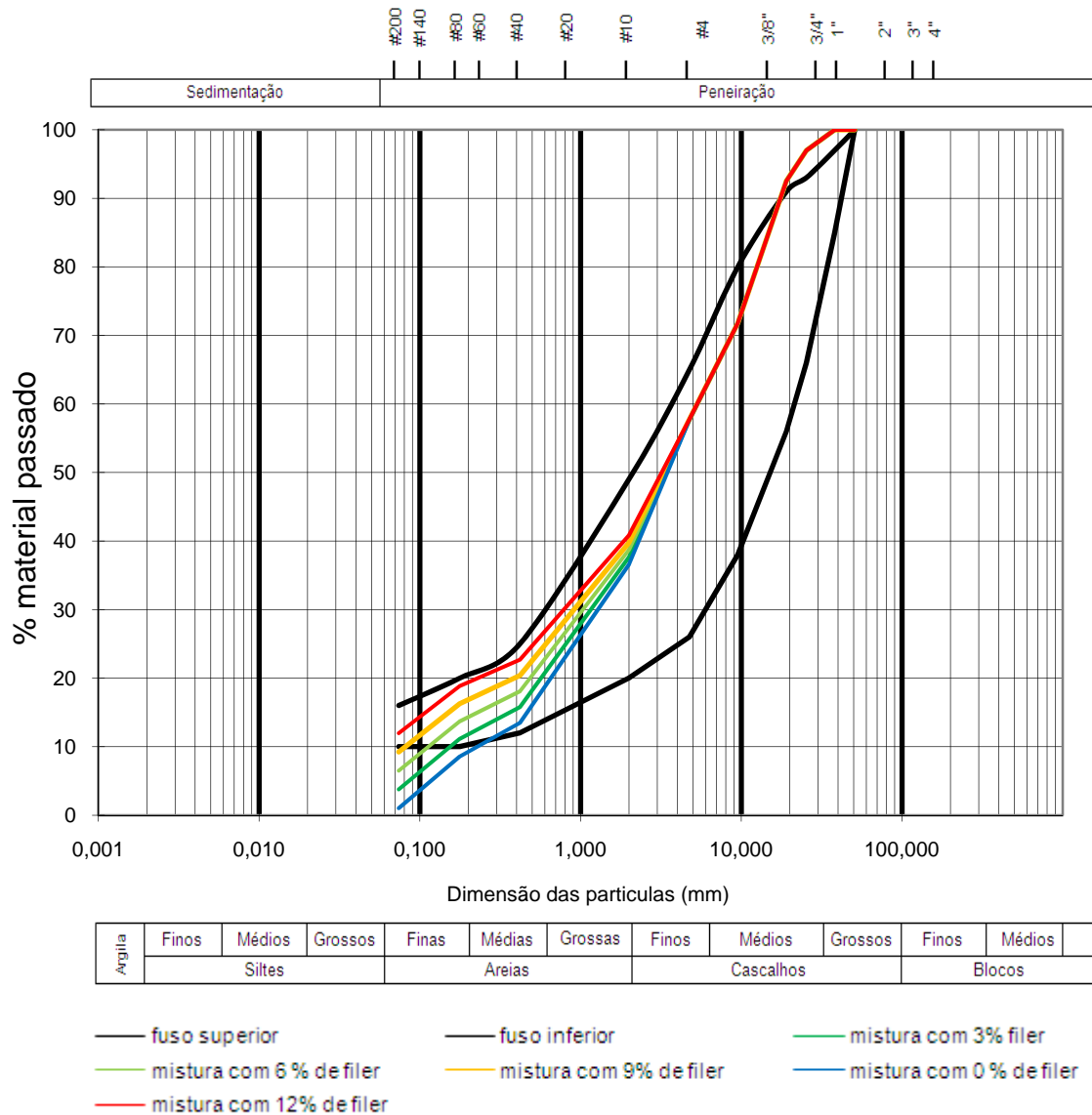


Figura 5.4 – Curvas granulométricas das misturas de agregados doseadas.

O ligante utilizado foi um cimento portland tipo II, classe 42,5, cedido pela Secil, composto por 80 a 94 % de Clínquer Portland, 6 a 20% de calcário e 0 a 5% de outros constituintes. A percentagem deste nas misturas foi fixada em 6% relativamente ao peso seco dos agregados, valor já usado em estudos anteriores (Santana, 2000) e que correspondeu a dosagens de cerca de 130 kg/m³ de cimento na mistura, consideradas usuais no betão deste tipo de barragens.

A água utilizada na amassadura foi a água da rede pública existente na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

5.3.2 Preparação dos Provetes

Para se proceder à amassadura das misturas, os agregados seleccionados tiveram um período de secagem em estufa de vinte e quatro horas, de modo a não apresentarem humidade natural, que falseasse a determinação do teor em água final da mistura, como referido em 5.2.3.

Para cada mistura referida na tabela 5.3 é preparada uma amassadura em quantidade suficiente para os 5 provetes necessários ao estabelecimento de uma curva de compactação, cerca de 6 kg para cada provete.

Neste processo de amassadura das misturas decidiu-se que este seria feito por partes, amassando apenas a quantidade necessária à realização de um provete de compactação de cada vez, 6 kg da mistura de britas areia e filer, para evitar a segregação.

Partindo-se então de uma quantidade fixa da mistura de agregados, apresentada na tabela 5.5, considerada suficiente para preencher o molde de compactação, neste caso 6 kg, acrescentaram-se as quantidades de ligante referidas na tabela 5.3 em percentagem, definidas em função do peso seco da mistura de agregados. Para a dosagem de cimento estipulada, 6% do peso seco da mistura de agregados, tem-se, para a amassadura de um provete, 0,36 kg do cimento Portland fornecido pela Secil.

Tabela 5.5 – Quantidades dos agregados em (kg) nas misturas função do peso seco da mistura de agregados necessária para efectuar um provete 6 kg.

	Mistura	Agregados				
		Areia 4,16/0,177	Brita 9,57/2	Brita 25,4/19,1	Brita 19,1	Filer
Quantidade de agregado (kg)	A	3,3	1,26	0,36	1,08	0
	B	3,12	1,26	0,36	1,08	0,18
	C	2,94	1,26	0,36	1,08	0,36
	D	2,76	1,26	0,36	1,08	0,54
	E	2,58	1,26	0,36	1,08	0,72

Para cada mistura assim estabelecida variou-se a quantidade de água necessária à compactação de cada provete sensivelmente entre os 4,5 e os 7,5% (função do peso seco da mistura de agregados) dando origem às quantidades de água referidas na tabela 5.6. Por uma questão prática estas quantidades de água foram repetidas para todas as misturas ensaiadas.

Tabela 5.6 – Quantidades de água a adicionar nas amassaduras.

Provete	1	2	3	4	5
Quantidade de Água (ml)	150	200	250	300	350

Após a amassadura de cada mistura (figura 5.5), foram efectuados ensaios de compactação utilizando os procedimentos referidos em 5.2.3, e resumidos na tabela 5.7. A figura 5.6 retracts a ultima camada compactada no molde Proctor.



Figura 5.5 - Aspecto de mistura de BCC.

Nestas condições foram efectuadas 25 amassaduras, 5 para cada ensaio de compactação.

Tabela 5.7 – Condições dos ensaios de compactação realizados.

Ensaio	Compactação				Dimensões do molde		
	Tipo	P (N)	h(mm)	n	t	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
Vibração	Kango	Peso estático:100N		3	1 min	152	115

P é o peso do pilão; h é a altura de queda; n é o número de camadas; N é o número de pancadas por camada e t é o tempo de vibração.



Figura 5.6 – Compactação das camadas no molde Proctor Pesado.

Após compactação o provete é então retirado do molde com um macaco hidráulico, como se apresenta na figura 5.7, obtendo-se por pesagem o seu peso total húmido, (P_h).

Como referido, o tempo decorrido desde a adição da quantidade de água estipulada até à pesagem do provete compactado não pode exceder os 30 minutos.

No anexo II, encontram-se os boletins de resultados dos ensaios de compactação realizados, um para cada mistura, e as curvas de compactação correspondentes.

No anexo III pode ainda observar o protocolo de laboratório adoptado nos ensaios.

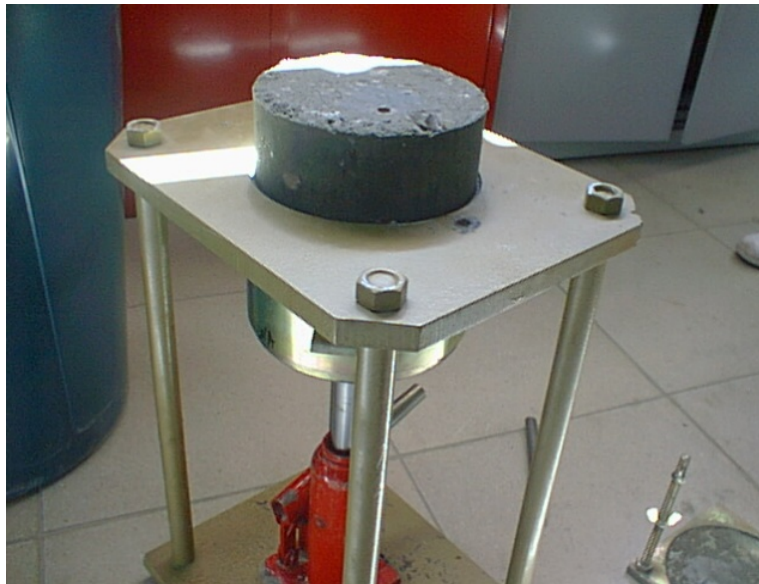


Figura 5.7- Descobragem de um Provete compactado com auxílio de macaco hidráulico.

5.4 Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

Na tabela 5.8, são apresentados os valores obtidos para todos os provetes compactados.

Na primeira coluna é identificada a dosagem de filer, função do peso seco total da mistura de agregados em estudo. Na segunda coluna apresentam-se as misturas efectuadas em cada dosagem de filer, identificando-se de X1 a X5 em que o índice da mistura X representa diferentes quantidades de água adicionadas para obter os diferentes pontos da curva de compactação que irá otimizar a mistura X.

Na terceira coluna estão os pesos finais das misturas depois de compactadas, isto é o valor de (P_h). Partindo deste valor, e conhecido o valor do volume do molde Proctor Pesado constrói-se a quarta coluna com os valores do valor do peso volúmico, γ , dados pela expressão:

$$\gamma = \frac{P_h}{V}$$

Na tabela 5.8 são ainda apresentados teores em água finais de cada provete, isto é, os teores em água da amassadura correspondente, que são dados pela razão entre as quantidades de água, em peso, referidas na tabela 5.6 e os 6,360 quilos de material seco estipulados para a amassadura de cada provete.

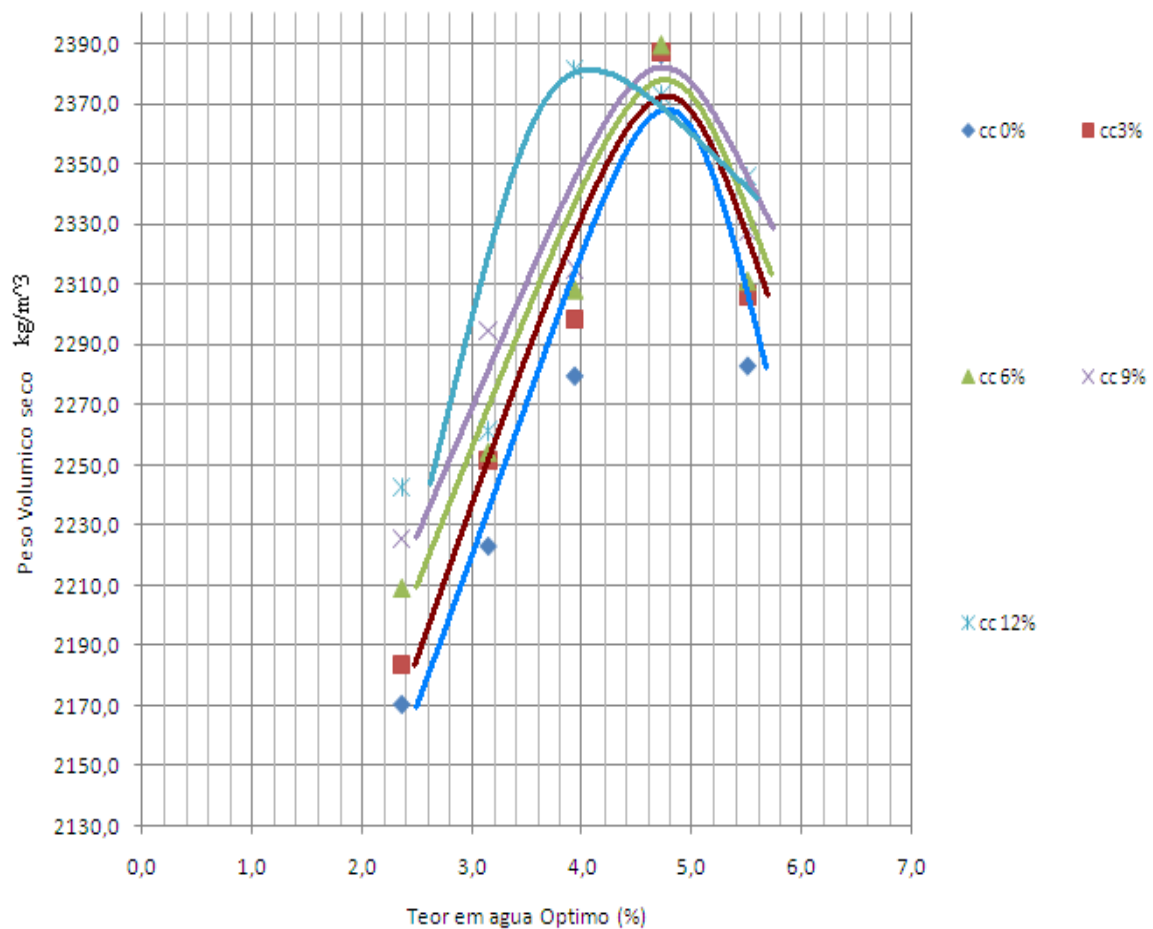
Com estes valores é ainda possível determinar os pesos específicos secos (γ_d), que se apresentam na sexta coluna da tabela 5.8. estes pesos são calculados, função do peso total húmido e do teor em água, pela expressão:

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V} = \frac{P_h}{1+w} = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

Tabela 5.8 – Valores obtidos dos ensaios de compactação.

% Filer relativamente á mistura seca de agregados	Provete	P. húmido mistura (kg)	γ (kg/m ³)	ω (%)	γ_d (kg/m ³)
0	A1	4,52	2221,71	2,36	2170,5
	A2	4,66	2293,06	3,14	2223,2
	A3	4,82	2369,33	3,93	2279,7
	A4	5,08	2499,24	4,72	2386,7
	A5	4,90	2408,70	5,50	2283,1
3	B1	4,54	2235,49	2,36	2184,0
	B2	4,72	2322,59	3,14	2251,8
	B3	4,86	2389,02	3,93	2298,7
	B4	5,08	2499,73	4,72	2387,1
	B5	4,95	2433,30	5,50	2306,4
6	C1	4,60	2261,08	2,36	2209,0
	C2	4,73	2325,05	3,14	2254,2
	C3	4,88	2398,86	3,93	2308,1
	C4	5,09	2502,19	4,72	2389,5
	C5	4,96	2438,22	5,50	2311,0
9	D1	4,63	2278,30	2,36	2225,8
	D2	4,81	2366,87	3,14	2294,7
	D3	4,89	2406,24	3,93	2315,2
	D4	5,11	2514,49	4,72	2401,2
	D5	4,99	2455,45	5,50	2327,4
12	E1	4,67	2295,52	2,36	2242,6
	E2	4,74	2332,43	3,14	2261,3
	E3	5,03	2475,13	3,93	2381,5
	E4	5,05	2484,97	4,72	2373,0
	E5	5,03	2475,13	5,50	2346,0

Com os valores apresentados na tabela 5.8 é possível construir as curvas de compactação correspondentes a cada mistura A, B, C, D, E, apresentadas na figura 5.8. Estas curvas, como foi anteriormente referido, são construídas em função do peso específico seco (γ_d) e do teor em água de cada mistura.



cc- curva de compactação relativa à respectiva percentagem de filler, função do peso seco de agregados.

Figura 5.8 - Sobreposição das curvas de compactação obtidas nos ensaios de laboratório.

A partir das curvas de compactação obtêm-se pares de valores $\gamma_{d,Max}$ e ω_{opt} para cada mistura. Estes valores correspondem aos parâmetros óptimos de compactação de cada dosagem de filler, função do peso seco da mistura, estudada (incluindo o cimento), isto é, correspondem ao ponto de pico de cada curva e à sua respectiva abcissa. Com estes valores óptimos, apresentados na tabela 5.9, foi possível estabelecer as dosagens para cada um dos componentes na mistura, em kg/m^3 , como referido em 5.2.4, cujos valores são igualmente apresentados na mesma.

Tabela 5.9 – Resumo dos ensaios de compactação realizados.

					Dosagem na mistura (kg/m ³)						Cálculo	
Mistura	%de filer na mistura em relação ao peso seco de agregatos	γ_d^{Max} (kg/m ³)	W opt ** (%)	W (kg/m ³)	Filer	Areia	Brita 9,52/2	Brita 25,4/19,1	Brita 19,2	Cimento	γ (kg/m ³)	γ_s (kg/m ³)
A	0	2370,0	4,7	111,4	0,0	1229,7	469,5	134,2	402,5	134,2	2481,5	2748,5
B	3	2372,0	4,7	111,5	67,1	1163,6	469,9	134,3	402,8	134,3	2483,5	2760,5
C	6	2378,0	4,7	111,8	134,6	1099,3	471,1	134,6	403,8	134,6	2489,8	2772,5
D	9	2383,0	4,7	112,0	202,3	1034,1	472,1	134,9	404,7	134,9	2495	2784,5
E	12	2383,0	4,0	95,3	269,8	966,7	472,1	134,9	404,7	134,9	2478,3	2796,5

** - % relativamente ao peso seco total

γ (kg/m³) – peso volúmico total da mistura (relativamente ao volume total)

γ (kg/m³) – peso volúmico das partículas sólidas da mistura (relativamente ao volume de sólidos)

As percentagens totais de finos obtidas (material passado no peneiro #200 ASTM), cimento e filer, relativamente ao peso total da mistura, estão entre os 5 e os 16 %. No entanto, este aumento da quantidade de finos é conseguido à custa do aumento de filer, já que a dosagem de cimento se mantém praticamente constante.

Da tabela 5.9 é possível obter a variação do peso volúmico em função da quantidade de filer utilizada na formulação da mistura, representada na figura 5.9. Essa variação mostra que à medida que se aumenta a quantidade de filer na mistura, o peso volumico seco (γ_d), aumenta até à mistura que possui 9%, apresentando a mistura constituída com 12% de filer um valor semelhante ao da mistura constituída com 9%, pelo menos para as quantidades estudadas neste trabalho experimental.

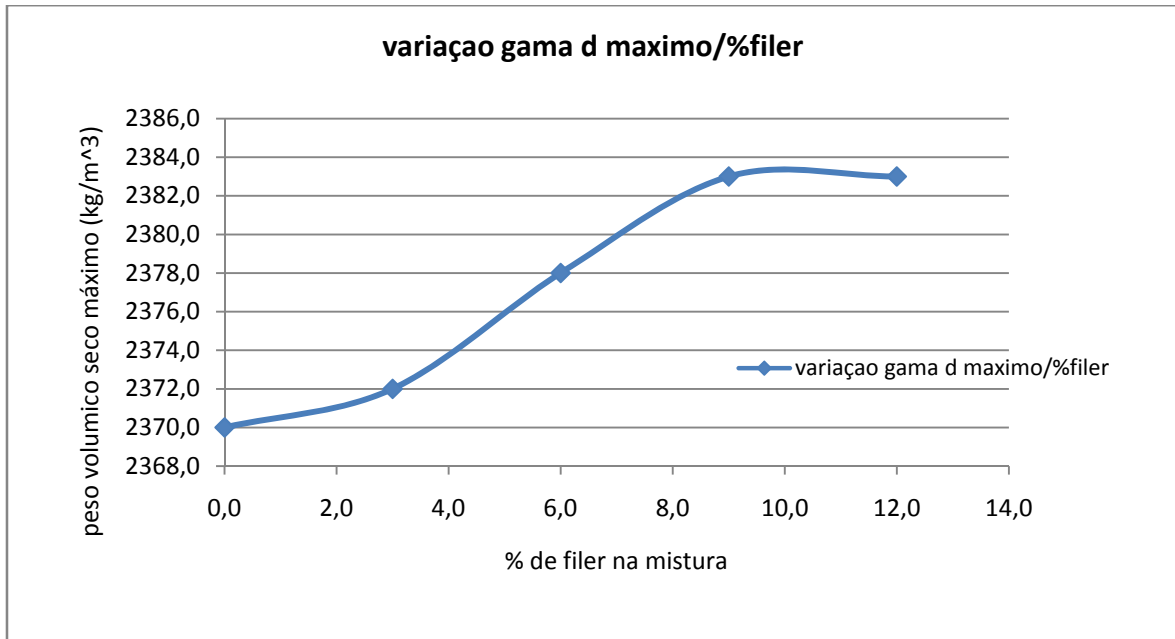


Figura 5.9 – Variação do peso volúmico seco em função da quantidade de filer utilizada na formulação da mistura.

5.5 Conclusões

O programa experimental apresentado teve como objectivo essencial a aplicação da metodologia geotécnica na formulação de composições de misturas de BCC, por se considerar que é a mais representativa do processo construtivo do BCC.

De entre os agregados disponíveis, ou de fácil obtenção por parte do Departamento de Engenharia Civil, conseguiu-se o material necessário para ensaiar 5 composições, optando-se por estudar a influência da percentagem de filer em cada mistura, quando este substitui parte da areia.

Os ensaios de compactação por vibração realizados, utilizando o compactador do DEC, permitiram assim a optimização dos parâmetros de compactação (obtenção de um teor em água óptimo e o correspondente peso volúmico seco máximo), a partir dos quais se estabelecem as dosagens dos restantes componentes.

As dosagens de água obtidas, para as diferentes misturas, não apresentaram grandes variações, o que se deve ao facto de se ter sempre os mesmos agregados grossos. Assim,

como referido por outros autores, quando se mantém constante a granulometria dos agregados, a realização de ensaios de compactação para formulação de BCC, não necessita de um carácter tão sistemático.

Em obra, estas quantidades de água devem ser aumentadas cerca de 1%, relativamente ao óptimo, para entrar em linha de conta com as perdas durante o manuseamento do BCC.

Como se manteve sempre constante a dosagem de cimento na mistura, a relação A/C (água/cimento) também é sensivelmente a mesma para todas as misturas, ou seja de 0,9 o que está de acordo com os valores da bibliografia para este tipo de betões.

As misturas C, D e E com quantidades de filer crescentes, para uma quantidade de cimento sensivelmente constante, são as que têm percentagens totais de finos adequadas a este tipo de betões compactados com cilindros (ACI, 1999). De facto, o total de finos (passados no peneiro #200 (ASTM)) presentes na mistura, necessários à compactação adequada de uma dada camada, pode ser conseguido à custa apenas do aumento de filer, quando não é necessário aumentar as características de resistência.

6 Considerações Finais

Ao longo deste estudo, foi evidenciado que o êxito de aplicação do BCC se prende essencialmente com a maior velocidade construtiva que este material permite e a maior economia por este gerada face a um betão convencional. Esta velocidade deve-se também à boa organização do estaleiro, a uma boa coordenação das entidades envolvidas no projecto, aos métodos de fabrico, transporte, colocação e compactação do betão que, por serem semelhantes ou iguais aos utilizados na compactação dos aterros, permitem a colocação do betão em obra a uma velocidade muito superior à colocação de um betão convencional. Deste modo, pode adiantar-se que um bom projecto de BCC é aquele que une as vantagens de resistência de um betão convencional, com as vantagens de construção de um aterro.

A utilização deste betão na construção de barragens tem evoluído gradualmente nos últimos anos. Esta evolução deve-se essencialmente a investigações que têm decorrido sobre novos materiais que o possam constituir e aos bons resultados que estruturas com ele concebidas têm gerado. Nos últimos 30 anos o uso deste betão, na construção de barragens, evoluiu de uma forma impressionante, sendo actualmente uma alternativa mais económica face à construção de barragens com outros betões.

Um dos pontos fortes deste betão está na possibilidade de utilizar uma menor dosagem de cimento que, por um lado, torna também a estrutura mais económica e, por outro, reduz a libertação de calor de hidratação, diminuindo o risco de ocorrência de tensões de origem térmica (geralmente tracções) potenciais geradoras de fissuração na estrutura.

A primeira e única barragem de BCC em Portugal até à data, concluída no ano de 2006, é a barragem de Pedrógão, situada no rio Guadiana cujas principais características foram referidas ao longo do trabalho. No entanto outros estudos têm sido desenvolvidos para a construção no país de novas barragens com recurso a este betão.

No que respeita aos métodos de formulação de misturas de BCC existem essencialmente duas metodologias, uma baseada em procedimentos geotécnicos com base nos parâmetros de compactação da mecânica dos solos e uma baseada nos conhecimentos do betão convencional. Ambos os métodos têm gerado bons resultados quando são utilizados, uma vez que o objectivo de ambos é formular uma mistura durável, que apresente características de resistência, deformabilidade e impermeabilidade adequadas durante o período de vida útil da estrutura. Constituiu objectivo deste trabalho estudar misturas de BCC aplicando a metodologia geotécnica na sua formulação, tendo em mente o facto de que, após ganhar presa, o material se comporta como um betão e deve ser estudado como tal.

A ligação entre camadas, resultado do método construtivo deste betão, assume particular importância devendo garantir-se, após compactação de camadas sucessivas que estas se comportem como uma camada só, exibindo uma boa ligação entre juntas, pontos críticos à percolação de água na estrutura, podendo por em causa a estabilidade da mesma.

À semelhança do que acontece no betão convencional uma estrutura construída em BCC pode também incluir no seu corpo, instrumentação que permita o controlo de qualidade da estrutura, quer durante a construção, quer durante a sua vida útil. Além da instrumentação, por vezes são retiradas carotes para análise em laboratório, determinando-se características mecânicas, características de deformação, características de permeabilidade e características térmicas do material colocado. Alguns destes resultados, se obtidos durante a construção podem ser confrontados com resultados de plataformas experimentais que antecederam a construção da estrutura, verificando se tudo decorre dentro do previsto.

Um dos factores preponderantes no doseamento deste betão é a possibilidade que este possui de poder incorporar, em substituição de parte do cimento, uma maior percentagem de finos (ASTM #200), comparativamente ao betão convencional. Estes finos, quer se trate de pozolanas ou de agregados não plásticos (filer), aumentam o teor em pasta, influenciando o número de passagens dos cilindros vibradores necessários à

obtenção de uma melhor compactação. Os ensaios experimentais realizados no âmbito deste trabalho tiveram como objectivo formular um BCC, com diferentes dosagens de filer para perceber a influência deste nos parâmetros de compactação das misturas de BCC obtidas. Para o efeito, manteve-se constante a quantidade de cimento, tendo apenas substituído parte da areia, por fíler, em diferentes percentagens.

Nesses ensaios foi seguida a metodologia geotécnica, baseada na optimização dos parâmetros de compactação, por se considerar a que melhor simula em laboratório o processo construtivo deste tipo de barragens. Com esta metodologia obtêm-se, por um lado, os teores em água óptimos correspondentes a cada dosagem de filer estudada e, por outro, a compacidade óptima dada pelos pesos volúmicos aparentes secos máximos correspondentes.

O emprego desta técnica utilizando o molde grande Proctor e martelo vibrador Kango possibilita que esta metodologia possa ser utilizada no controlo de qualidade em obra, permitindo comparar o teor em água óptimo da mistura colocada com o valor do teor em água óptimo previamente determinado em plataforma experimental à semelhança do que é feito em Geotecnia na construção de aterros.

Os ensaios realizados em laboratório utilizaram três britas de natureza calcária, de diferentes granulometrias, uma areia e um filer calcário e um cimento Portland tipo II. Foram compactados provetes com diferentes percentagens de filer e areia previamente estabelecidas, fixando as quantidades de agregados e de cimento.

O teor em água óptimo obtido para cada mistura foi sensivelmente constante, o que se deve ao facto de apenas se ter variado a quantidade de filer, mantendo constante a granulometria dos agregados. Como se sabe, a água introduzida na mistura entra essencialmente na hidratação do cimento e na molhagem da superfície dos agregados. Uma vez que neste caso a fracção de cimento e de agregados grossos foi mantida constante, variando-se apenas a areia e o filer, conclui-se que a variação de filer não influencia, aparentemente, o valor do teor em água óptimo de compactação. Esta

conclusão pode justificar-se pela superfície de filer ser insignificante na molhagem de agregados.

No que respeita ao peso volúmico seco máximo atingido, pode concluir-se, por interpretação dos resultados experimentais obtidos, que aumenta sempre que a quantidade de filer na mistura aumenta, até dado valor, 9% pelas dosagens estudadas, mantendo-se aproximadamente constante nas restantes dosagens superiores a esta. Isto deve-se ao facto de uma maior quantidade de filer proporcionar uma maior quantidade de pasta, que preencherá os vazios da mistura e, conseqüentemente, aumentará o seu peso volúmico.

A partir dos parâmetros de compactação obtidos (peso volúmico seco máximo e teor em água óptimo) foi possível estabelecer as dosagens de todos os componentes das misturas, em kg/m^3 valores a utilizar em obra. Para compensar perdas de humidade do BCC durante a sua colocação em obra, é usual aumentar a quantidade de água em cerca de 1% relativamente ao óptimo obtido em laboratório. Além disso, como é sabido, betões doseados do lado húmido têm menos possibilidades de segregação em obra.

Das dosagens obtidas para as diferentes misturas, quando convertidas em volumes a partir das massas volúmicas dos constituintes, obtêm-se valores residuais para o volume de vazios, o que comprova a boa qualidade das misturas obtidas. A obtenção deste volume de vazios, aplicando a fórmula fundamental da composição dos betões (em volume) às dosagens obtidas, comprova a adequação da metodologia geotécnica à formulação do BCC. Regras sobre a sua aplicação ao BCC constam de Normas Internacionais, nomeadamente as publicadas pelo ACI.

A experiência adquirida com o trabalho experimental desenvolvido poderia ter permitido ensaiar outras dosagens de cimento, variando ainda a quantidade de filer, permitindo obter conclusões sob o ponto de vista económico. No entanto, neste tipo de trabalho, os meios e o tempo disponíveis são escassos, não tendo sido possível obter materiais em quantidade suficiente, nomeadamente, agregados.

Considerações finais

Para estudar o comportamento das misturas obtidas é de inegável interesse estudar a sua caracterização mecânica, nomeadamente resistência à tracção e resistência ao deslizamento das juntas construtivas. No entanto, esta caracterização não faz parte do presente trabalho. Teoricamente, as misturas formuladas funcionam adequadamente à compressão, com a dosagem de cimento usada, sendo que esta resistência não é normalmente condicionante no BCC aplicado em Barragens.

A construção da barragem de Pedrógão veio demonstrar que é possível construir em Portugal Barragens em BCC, economicamente mais viáveis pelas razões durante o presente estudo.

Bibliografia:

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 211.3R-97. *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. ACI Materials Journal. 1997
2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 211.3R-97. *Roller-Compacted Mass Concrete*. ACI Materials Journal. 1999.
3. ANDRADE, W. P., *RCC Properties: What is more Important for Dams*, 1º Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
4. ANDRIOLO, F.R. *Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado*, São Paulo, 1989.
5. ANDRIOLO, F.R. *The use of roller compacted concrete (RCCD)*. São Paulo: Oficina de Textos. 1998.
6. ANDRIOLO, F.R. *Materials and RCC Quality Requirements*. Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro, 2003.
7. ANDRIOLO, F.R., *Acertos, Contrariedades, Conquista e a Necessidade de manter Qualidade*, 1º Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
8. BRIAN, A.F., *RCC – New Developments and Innovations*, 1º Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.

9. CASTRO, A.T.; RIBEIRO, A.B.; FARINHA, M.B. *Caracterização das propriedades do betão compactado com cilindros da barragem de Pedrógão*. LNEC, DEC-FCT. 2006.
10. CASTRO, A.T. *Barragens de BCC Aspectos Estruturais*. LNEC, 2008.
11. CIBER, www.ciber.com.br/media/redaktion/pictures/technologies/counterflow/Picture-4.jpg), 2008.
12. COUTINHO, A. S., GONSALVES, A. *Fabrico e Propriedade do Betão*. LNEC. 1994.
13. COUTINHO, J.S., *Aulas Práticas de Materiais de Construção*, FEUP, 2003
14. DUNSTAN, M.R.H., *"Recent developments in roller compacted dam construction"*, Water Power & Dam Construction Handbook 1989.
15. DUNSTAN, M.R.H., *"RCC Dams (> 15m)"*, Water Power & Dam Construction Handbook 1995.
16. DUNSTAN, M.R.H., *The state-of-the-art off RCC dams 2003-an update of ICOLD Bulletin No.125*, Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro, 2003.
17. HANSEN, K.; REINHARDT, W. G. *Roller-compactd concrete dams*. New York; McGraw-Hill, 1991.
18. ICOLD, General Reports and Special Conferences. *Proceedings of the International Symposium Held in Santander, Spain, October. 2003*.
19. INAG, *Curso de exploração e segurança de barragens*. 2002.

20. INAG, www.inag.pt, 2008.
21. MOSER, D.E., *Medidas Múltiplas de Características de Barragens de Concreto Compactado Com Rolo Utilizando Instrumentação por Fibra Óptica*, Curitiba, 2006.
22. NAGAYAMA, I.; JIKAN, S. *30 Years' History of Roller-compacted Concrete Dams in Japan*. Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro, 2003.
23. NAGATAKI, S. , FUJISAWA, T., KAWASAKI, H., State of art RCC dams in Japan, 1º Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
24. ORTEGA, S. F. *Hormigón Compactado con Rodillo*, Revista de Obras Publicas, Outubro 1988.
25. ORTEGA, S. F.; BASTOS, P & ALVES, P., *Pedrógão Dam: first RCC Experience in Portugal*. Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro 2003.
26. ORTEGA, S. F., *Alternative Designs for Dam Construction*, International Water Power and Dam Construction, Junho 2007.
27. PERI® - Empresa de cofragens. (www.peri.pt), 2006.
28. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, *Design Manual For Small RCC Dams*. 2003.
29. PROJECT BACARA. *Le béton compacté au rouleau*, 1988-1996.

30. RAPHAEL, J. M., *The Optimum Gravity Dam*, Rapid Construction of Concrete Dams, American Society of Civil Engineers, New York, 1970.
31. REEVES, G. N., and YATES, L. B. “*Simplified design and construction control for roller compacted concrete.*” *Proc., Roller Compacted Concrete*, ASCE, New York. 1985.
32. RSB, Regulamento de Segurança de Barragens, D.R. N° 93 de 21/04/98, Série I - B, 1998.
33. SAGRADO, J. D., *Conferencia Brasil*, 1° Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
34. SAGRADO, J. D., *Materiais, Dosagem e Técnicas de Controlo de Qualidade do CCR em Barragens Espanholas*, 1° Brasillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
35. SANTANA, M.T. *Metodologia geotécnica de composição de um betão compactado com cilindros*. VII Congresso Nacional de Geotecnia. Porto. Abril 2000.
36. SCHRADER, E. *Design and mix studies with high and low cementious content RCC for Nordlingaalda dam in Iceland*. Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concreted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro 2003.
37. SUNNY, (www.sunny-wash.de/images/rechts.jpg), 2008.
38. Téchne, *Reportagem sobre Concreto Compactado com Rolo*, Brasil, 2007.

39. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. ETL – 1110-2-343, *Structural Design Using the Roller-Compacted Concrete (RCC) Construction Process*. May 1993.
40. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Roller-compacted concrete – Engineering and Design. *Engineer Manual EM 1110-2-2006*, Washington, DC. 15 jan. 2000.

ANEXO I

Folhas Excel Para Efectuar as Combinações de Agregados

Anexo I – Folhas Excel Para efectuar as Combinações de Agregados

Mistura A – percentagem de filer em relação á mistura seca de agregados: 0%

				3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
PENEIROS	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
F. SUP.		97,0	93,0	91,0	80,0	65,0	49,0	25,0	20,0	16,0
F. INF.		85,0	66,0	56,0	38,0	26,0	20,0	12,0	10,0	10,0
	Percentagens Agregados (%)	% Acumulados passados								
Areia (4,16/0,177)	55	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	64,5	23,2	14,2	1,3
Brita (9,52/2)	21	100,0	100,0	100,0	77,4	12,0	3,0	1,1	1,1	0,7
Brita (25,4/19,1)	6	100,0	50,0	17,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Brita (19,1)	18	100,0	100,0	86,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	0,9
Filer	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5
COMP.	100	100,0	97,0	92,6	71,8	57,7	36,6	13,5	8,6	1,0

Anexo I – Folhas Excel Para efectuar as Combinações de Agregados

Mistura B – percentagem de filer em relação á mistura seca de agregados: 3%

				3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
PENEIROS	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
F. SUP.		97,0	93,0	91,0	80,0	65,0	49,0	25,0	20,0	16,0
F. INF.		85,0	66,0	56,0	38,0	26,0	20,0	12,0	10,0	10,0
	Percentagens Agregados (%)	% Acumulados Passados								
Areia (4,16/0,177)	52	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	64,5	23,2	14,2	1,3
Brita (9,52/2)	21	100,0	100,0	100,0	77,4	12,0	3,0	1,1	1,1	0,7
Brita (25,4/19,1)	6	100,0	50,0	17,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Brita (19,1)	18	100,0	100,0	86,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	0,9
Filer	3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5
COMP.	100	100,0	97,0	92,6	71,8	57,7	37,6	15,8	11,1	3,8

Anexo I – Folhas Excel Para efectuar as Combinações de Agregados

Mistura C – percentagem de filer em relação á mistura seca de agregados: 6%

				3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
PENEIROS	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
F. SUP.		97,0	93,0	91,0	80,0	65,0	49,0	25,0	20,0	16,0
F. INF.		85,0	66,0	56,0	38,0	26,0	20,0	12,0	10,0	10,0
	Percentagens Agregados (%)	% Acumulados Passados								
Areia (4,16/0,177)	49	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	64,5	23,2	14,2	1,3
Brita (9,52/2)	21	100,0	100,0	100,0	77,4	12,0	3,0	1,1	1,1	0,7
Brita (25,4/19,1)	6	100,0	50,0	17,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Brita (19,1)	18	100,0	100,0	86,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	0,9
Filer	6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5
COMP.	1,000	100,0	97,0	92,6	71,8	57,7	38,7	18,1	13,7	6,5

Anexo I – Folhas Excel Para efectuar as Combinações de Agregados

Mistura D – percentagem de filer em relação á mistura seca de agregados: 9%

				3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
PENEIROS	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
F. SUP.		97,0	93,0	91,0	80,0	65,0	49,0	25,0	20,0	16,0
F. INF.		85,0	66,0	56,0	38,0	26,0	20,0	12,0	10,0	10,0
	Percentagens Agregados (%)	% Acumulado Passado								
Areia (4,16/0,177)	46	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	64,5	23,2	14,2	1,3
Brita (9,52/2)	21	100,0	100,0	100,0	77,4	12,0	3,0	1,1	1,1	0,7
Brita (25,4/19,1)	6	100,0	50,0	17,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Brita (19,1)	18	100,0	100,0	86,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	0,9
Filer	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5
COMP.	1,000	100,0	97,0	92,6	71,8	57,8	39,8	20,4	16,3	9,2

Anexo I – Folhas Excel Para efectuar as Combinações de Agregados

Mistura E – percentagem de filer em relação á mistura seca de agregados: 12%

				3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
PENEIROS	(mm)	38,1	25,4	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
F. SUP.		97,0	93,0	91,0	80,0	65,0	49,0	25,0	20,0	16,0
F. INF.		85,0	66,0	56,0	38,0	26,0	20,0	12,0	10,0	10,0
	Percentagens Agregados (%)	% Acumulado Passado								
Areia (4,16/0,177)	43	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	64,5	23,2	14,2	1,3
Brita (9,52/2)	21	100,0	100,0	100,0	77,4	12,0	3,0	1,1	1,1	0,7
Brita (25,4/19,1)	6	100,0	50,0	17,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Brita (19,1)	18	100,0	100,0	86,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	0,9
Filer	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5
COMP.	100	100,0	97,0	92,6	71,8	57,8	40,8	22,7	18,8	12,0

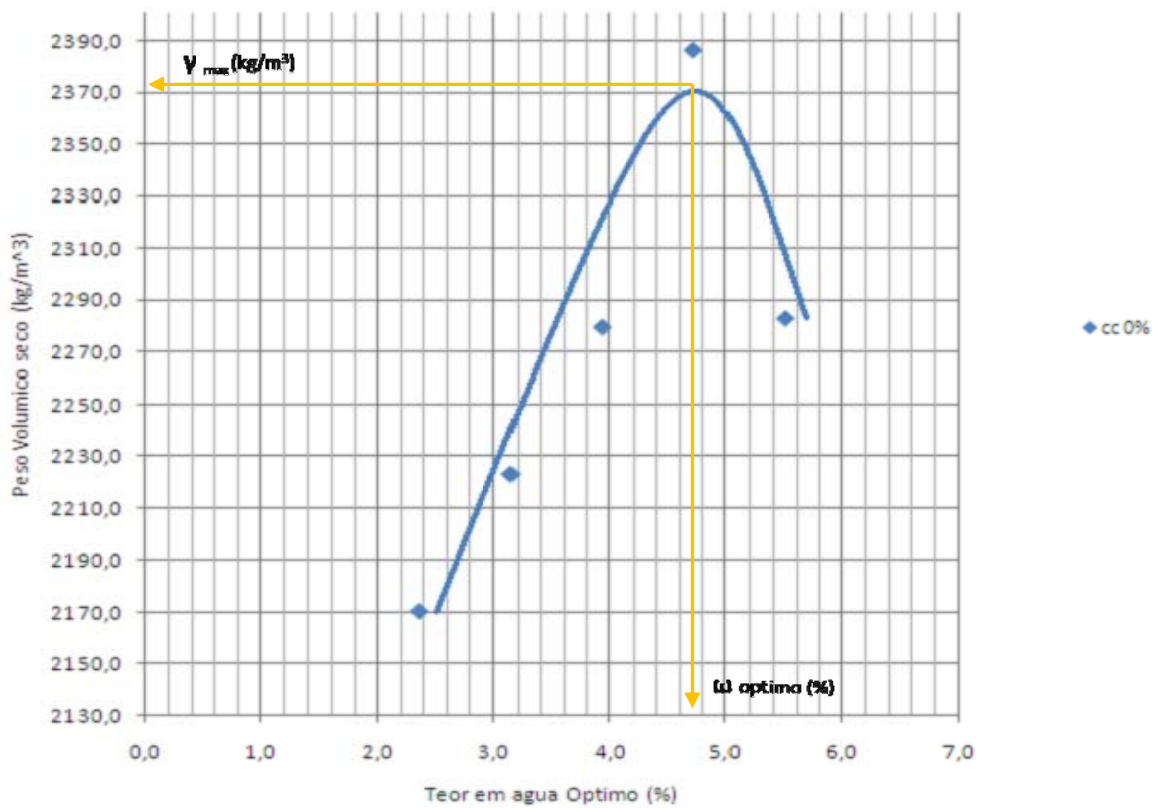
ANEXO II

Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaios de
Compactação

ANEXO II – Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaios de Compactação

Mistura A – percentagem de filler em relação à mistura seca de agregados: 0%

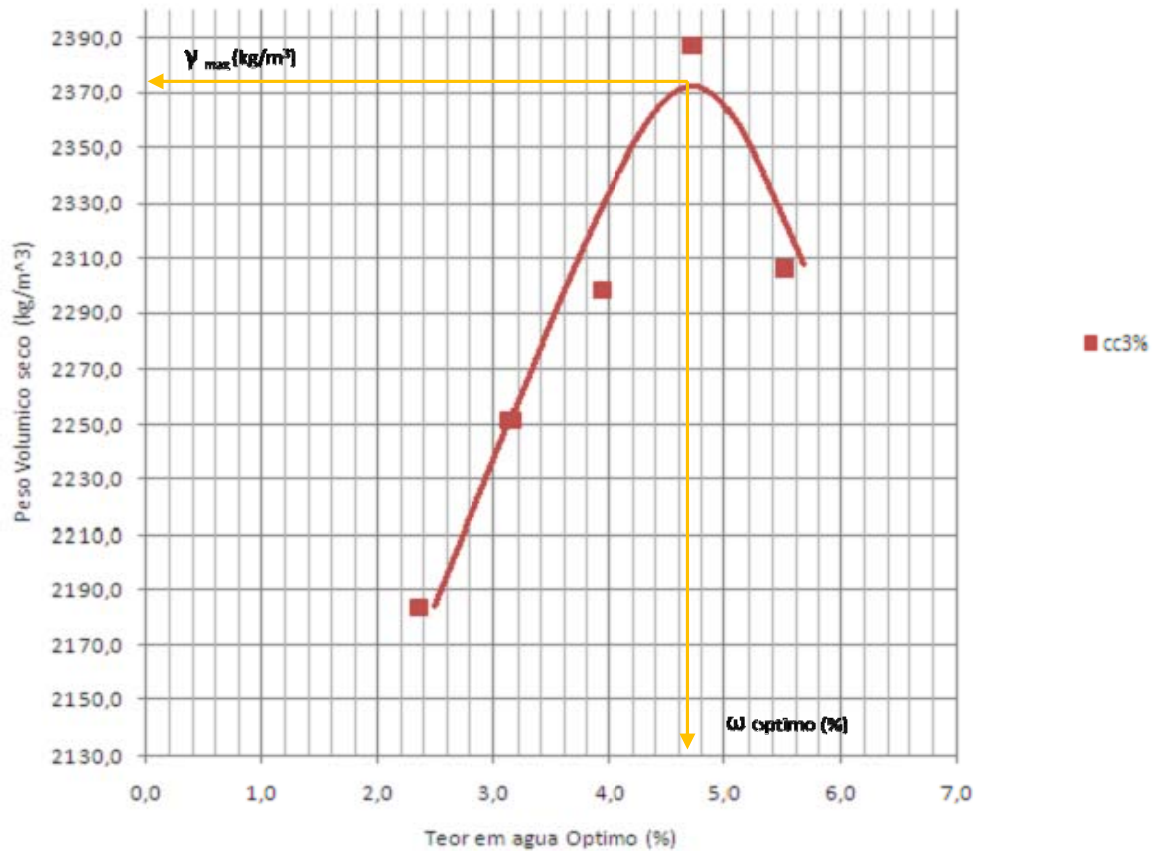
Peso molde s/ alonga (kg)	5,0					
Volume do molde (m ³)	0,0020					
Peso seco (kg)	6,360					
		A1	A2	A3	A4	A5
Peso húmido (molde + mistura) (kg)		9,5	9,6	9,8	10,1	9,9
Peso húmido mistura (kg)		4,5	4,7	4,8	5,1	4,9
(kg/m ³)		2221,7	2293,1	2369,3	2499,2	2408,7
Água adicionada (l)		0,150	0,200	0,250	0,300	0,350
Teor em água - w (%)		2,4	3,1	3,9	4,7	5,5
d		2170,5	2223,2	2279,7	2386,7	2283,1



ANEXO II – Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaios de Compactação

Mistura B – percentagem de filler em relação à mistura seca de agregados: 3%

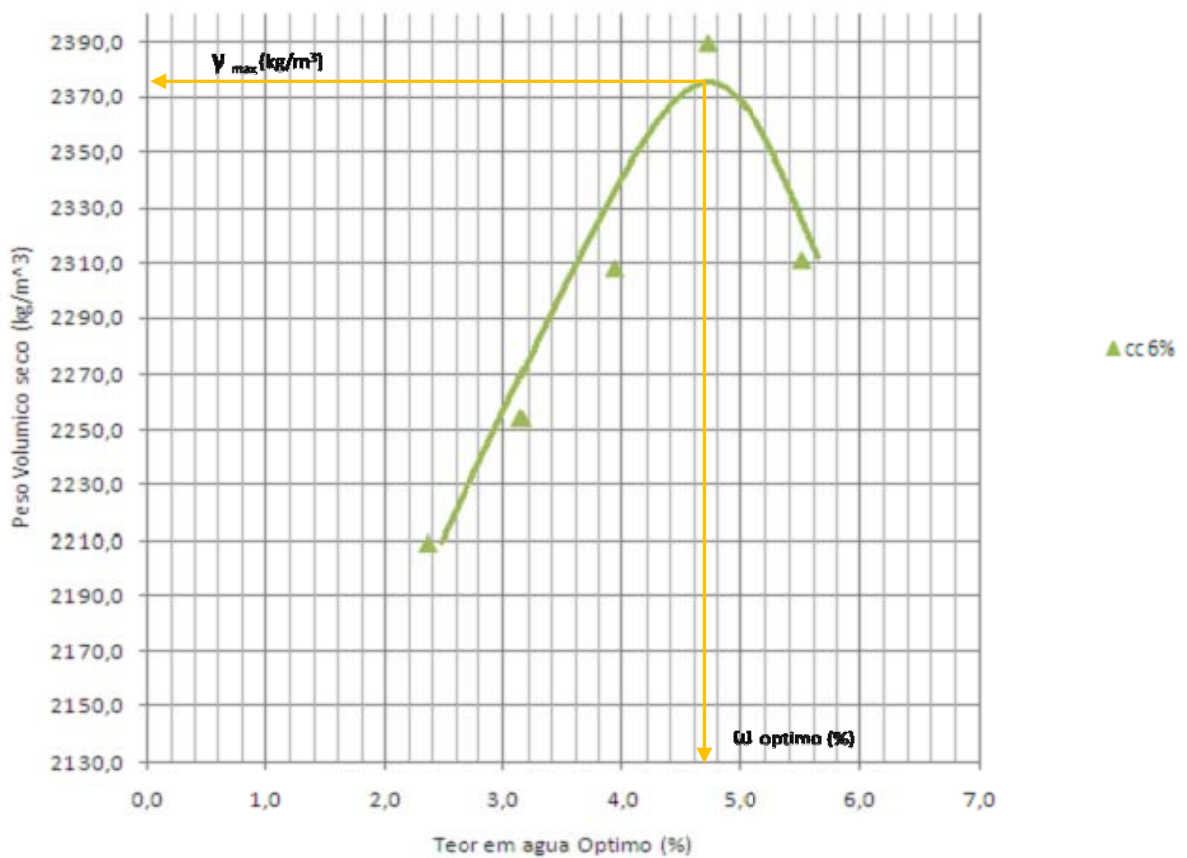
Peso molde s/ alonga (kg)	5,0				
Volume do molde (m ³)	0,0020				
Peso seco (kg)	6,360				
	A1	A2	A3	A4	A5
Peso húmido (molde + mistura) (kg)	9,5	9,7	9,8	10,1	9,9
Peso húmido mistura (kg)	4,5	4,7	4,9	5,1	4,9
(kg/m ³)	2235,5	2322,6	2389,0	2499,7	2433,3
Água adicionada (l)	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350
Teor em água - w (%)	2,4	3,1	3,9	4,7	5,5
d	2184,0	2251,8	2298,7	2387,1	2306,4



ANEXO II – Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaio de Compactação

Mistura C – percentagem de filler em relação à mistura seca de agregados: 6%

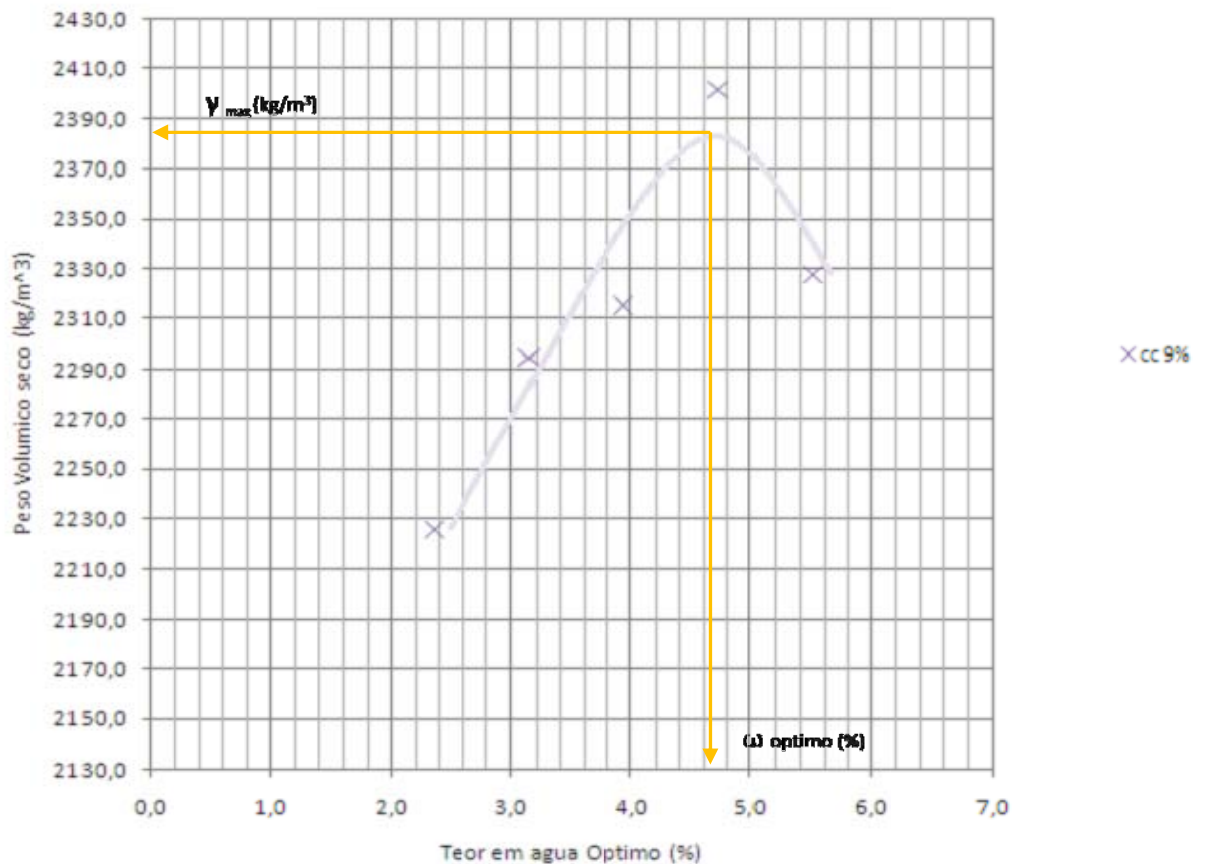
Peso molde s/ alonga (kg)	5,0					
Volume do molde (m ³)	0,0020					
Peso seco (kg)	6,360					
	A1	A2	A3	A4	A5	
Peso húmido (molde + mistura) (kg)	9,6	9,7	9,9	10,1	9,9	
Peso húmido mistura (kg)	4,6	4,7	4,9	5,1	5,0	
(kg/m ³)	2261,1	2325,0	2398,9	2502,2	2438,2	
Água adicionada (l)	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	
Teor em água - w (%)	2,4	3,1	3,9	4,7	5,5	
d	2209,0	2254,2	2308,1	2389,5	2311,0	



ANEXO II – Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaio de Compactação

Mistura D – percentagem de filler em relação à mistura seca de agregados: 9%

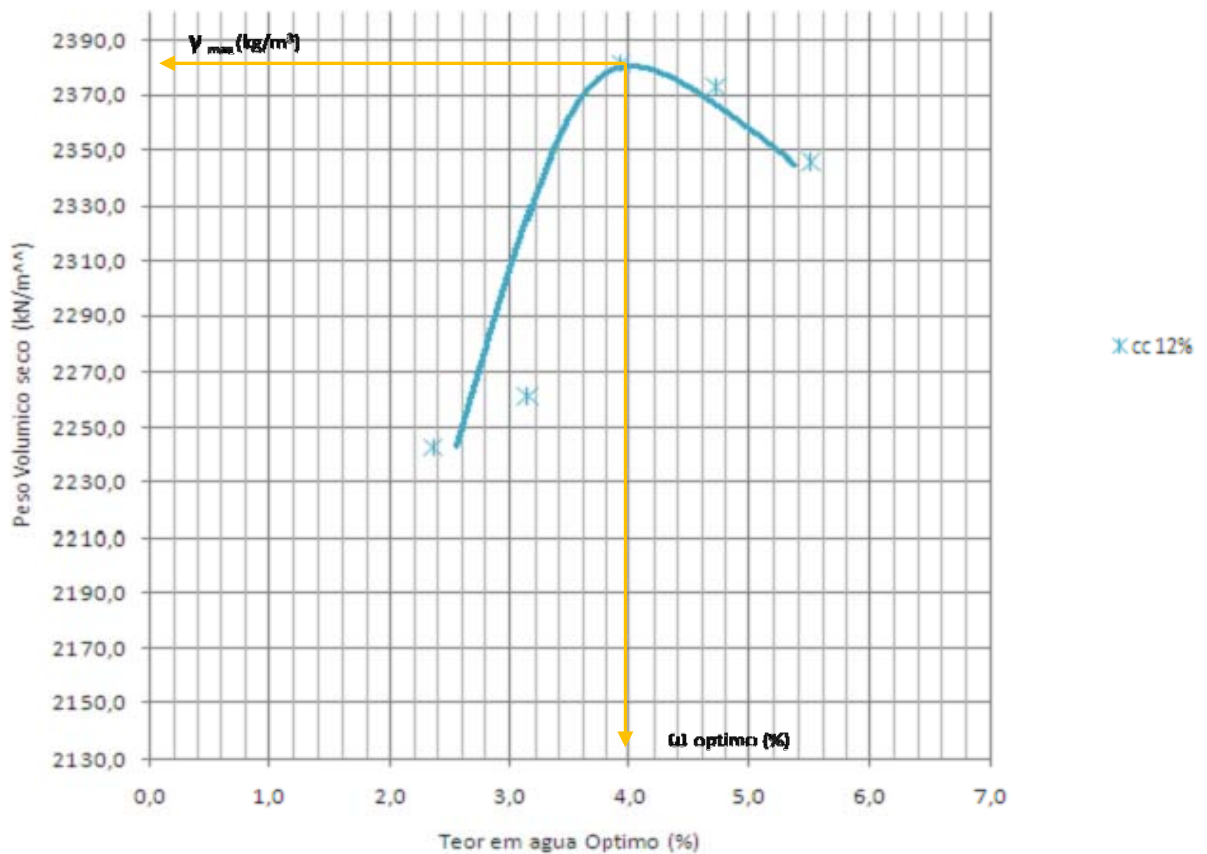
Peso molde s/ alonga (kg)	5,0				
Volume do molde (m ³)	0,0020				
Peso seco (kg)	6,360				
	A1	A2	A3	A4	A5
Peso húmido (molde + mistura) (kg)	9,6	9,8	9,9	10,1	10,0
Peso húmido mistura (kg)	4,6	4,8	4,9	5,1	5,0
(kg/m ³)	2278,3	2366,9	2406,2	2514,5	2455,4
Água adicionada (l)	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350
Teor em água - w (%)	2,4	3,1	3,9	4,7	5,5
d	2225,8	2294,7	2315,2	2401,2	2327,4



ANEXO II – Resultados Experimentais Obtidos nos Ensaio de Compactação

Mistura E – percentagem de filer em relação à mistura seca de agregados: 12%

Peso molde s/ alonga (kg)	5,0				
Volume do molde (m ³)	0,0020				
Peso seco (kg)	6,360				
	A1	A2	A3	A4	A5
	9,6	9,7	10,0	10,0	10,0
Peso húmido (molde + mistura) (kg)	4,7	4,7	5,0	5,1	5,0
Peso húmido mistura (kg)	2295,5	2332,4	2475,1	2485,0	2475,1
(kg/m ³)	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350
Água adicionada (l)	2,4	3,1	3,9	4,7	5,5
Teor em água - w (%)	2242,6	2261,3	2381,5	2373,0	2346,0



Anexo III

Protocolo Experimental para realizar um BCC em
Laboratório

1.1 Procedimento para elaboração do laboratório

1. Determinam-se curvas granulométricas de vários agregados, e seleccionam-se classes dos mesmos que melhor se adaptem à amassadura de uma mistura com boas propriedades resistentes e de deformabilidade.
2. Partindo das classes de agregados anteriormente seleccionadas são efectuadas diferentes combinações com o objectivo de atingir uma mistura seca de agregados cuja curva granulométrica esteja compreendida nos fusos teóricos estabelecidos na figura (2.3).
3. No presente trabalho foram seleccionados os agregados apresentados na tabela A1. Na mesma tabela são apresentadas as quantidades necessárias para proceder à compactação de um provete.

Tabela A.1 – Quantidades de agregados necessárias para a compactação de um provete

		Agregados				
		Filer	Areia 4,16/0,177	Brita 9,57/2	Brita 25,4/19,1	Brita 19,1
Quantidades à formulação de um provete (kg)	A	0	3,3	1,26	0,36	1,08
	B	0,18	3,12	1,26	0,36	1,08
	C	0,36	2,94	1,26	0,36	1,08
	D	0,54	2,76	1,26	0,36	1,08
	E	0,72	2,58	1,26	0,36	1,08

Nota: antes da mistura os agregados devem permanecer 24 horas em estufa, para a quantidade medida representar um peso seco.

4. Cada linha da tabela anteriormente apresentada corresponde uma amassadura necessária para executar a compactação de um provete. Devem ser efectuadas 5 misturas para linha apresentada, nas quais apenas se fará variar a quantidade de água de acordo com as quantidades apresentadas na tabela A.2

Tabela A.2 – quantidades de água a adicionar nas amassaduras

Provete	1	2	3	4	5
Quantidade de Água (ml)	150	200	250	300	350

1.1.1 – Amassadura:

- a. Colocam-se num recipiente com capacidade suficiente as quantidades apresentadas numa linha do quadro A.1, com uma quantidade de cimento igual a 0,36 kg.
- b. Adiciona-se uma das quantidades de agua apresentadas na tabela A.2.
- c. Efectua-se a amassadura de todos os componentes, até se obter uma mistura homogénea.
- d. Efectuam-se os ensaios de compactação.
- e. Repetem-se os passos anteriores para as restantes dosagem de água apresentadas na tabela A.2
- f. Para as restantes linhas do quadro, isto é para as restantes dosagens que se pretendem estudar são efectuados novamente os passos a) a e).

1.1.2 Ensaios de compactação

Estes ensaios são efectuados de acordo com a especificação LNEC E 197-66 e 262-72.

Relativamente a estes ensaios, é utilizado o molde grande do ensaio Proctor de 152 mm de diâmetro, sem espaçador, sendo a altura dos provetes, após a compactação de 115 mm, e o vibrador Kango do DEC.

- a. Depois de devidamente oleado o molde Proctor pesado a mistura é compactada em 3 camadas.
- b. As pancadas devem ser distribuídas por toda a superfície da camada, repetindo-se o processo até estarem compactadas as 3 camadas, com um tempo de vibração de 1 minuto por camada, ou até que apareça pasta em redor da placa.
- c. Antes da colocação da 3ª camada, é ajustada a alonga, ocupando a última camada depois de compactada, uma altura de cerca de 6 a 13 mm dentro da alonga, acima do molde.

Nota: Os provetes devem estar compactados nos 30 minutos que se seguem à amassadura para evitar que o betão ganhe presa, e conseqüentemente a trabalhabilidade, antes de terminada a preparação dos provetes;

Anexo III – Protocolo Experimental para Realizar um BCC em Laboratório

- d. Uma vez compactado, rasoirar-se a superfície do provete deixando a sua superfície com um acabamento superficial satisfatório.
- e. Retira-se o provete do molde e determina-se o seu peso total húmido.
- f. O processo repete-se até que estejam compactados os 5 provetes com as diferentes quantidades de água de amassadura.
- g. Estes passos repetem-se para as misturas constituídas com as dosagens apresentadas nas linhas A, B, C, D, E.