



Diogo Amaro Freitas Fernandes

Licenciatura em Ciências da Engenharia

A aplicação estrutural de betões de elevado desempenho (HPC e UHPC)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: António Manuel Pinho Ramos, Professor
Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente : Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Arguente : Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal : Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos

“Copyright” Diogo Amaro Freitas Fernandes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível devido à ajuda de todos aqueles que contribuíram, não só durante a realização do mesmo, como em todo o meu percurso académico. A todos, o meu muito obrigado.

Ao Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos, meu orientador científico, pelos conhecimentos partilhados, disponibilidade e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos que me forneceram motivação nas horas de maior desânimo.

À Carolina Fernandes, pela ajuda na revisão do texto e todo o apoio prestado.

À Nádía Nunes pela compreensão demonstrada, opiniões fornecidas e contínuo incentivo até à conclusão desta dissertação.

Por fim agradeço a todos os meus familiares, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram para a sua realização com o melhor sucesso possível.

A UTILIZAÇÃO ESTRUTURAL DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO (HPC E UHPC)

RESUMO

A evolução dos betões, na procura de estruturas com um maior tempo de vida útil, menores custos de reparação e maiores resistências tem sido alvo de pesquisa por investigadores de todo o mundo.

No presente trabalho é apresentado o estado da arte dos betões de elevado desempenho (HPC-High Performance Concrete e UHPC-Ultra High Performance Concrete), betões garantes de maior durabilidade e resistência, com o objectivo de conhecer as inovações trazidas por estes, na aplicação estrutural actual.

A durabilidade e resistência incrementadas por estes betões às estruturas é um dos temas abordados, referindo-se quais os seus constituintes que maximizam as suas características.

O benefício da sua aplicação em elementos estruturais de edifícios e pontes é abordado, exemplificando-se obras diversificadas onde este material teve um papel preponderante.

Algumas constituições patenteadas pelos maiores produtores mundiais de UHPC são descritas.

Para um maior desenvolvimento dos HPC e UHPC, o estabelecimento de recomendações internacionais é fundamental, apesar de existirem na actualidade algumas recomendações internacionais, nacionais e associativas.

THE STRUCTURAL APPLICATION OF CONCRETE WITH HIGH PERFORMANCE (HPC AND UHPC)

ABSTRACT

The evolution of concrete, in search of structures with longer life, lower repair costs and higher resistance has been target of research around the world.

In this work the state of the art of high performance concretes is presented, high performance concrete (HPC) and ultra high performance concrete (UHPC), concretes that ensuring greater durability and strength, in order to meet the innovations brought by them, in current structural application.

The durability and strength enhanced by these concretes to structures is one of the topics discussed, relating which the constituents that maximize their characteristics.

The benefit of its application in structural elements of buildings and bridges is discussed, illustrating with diverse works where this material had a leading role.

Some constitutions patented by the world's largest producers of UHPC are described.

For a biggest development of HPC and UHPC, the establishment of international recommendations is essential, in spite of exist in the present some international, national and associative recommendations.

PALAVRAS CHAVE

Betão de ultra elevado desempenho

Betão de elevado desempenho

Durabilidade

Fibras

KEY WORDS

Ultra high performance concrete (UHPC)

High performance concrete (HPC)

Durability

Fibre

ÍNDICE DE MATÉRIAS

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 GENERALIDADES | 1 |
| 1.2 OBJECTIVOS | 2 |
| 1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... | 2 |
| Capítulo 2 - DURABILIDADE | 5 |
| 2.1 GENERALIDADES | 5 |
| 2.2 MEDIDAS DE DURABILIDADE..... | 6 |
| Capítulo 3 – DESENVOLVIMENTO DO HIGH PERFORMANCE CONCRETE E ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE | 11 |
| 3.1 HISTÓRIA DO HPC e UHPC..... | 11 |
| 3.2 DIFERENCIAÇÃO ENTRE HSC E HPC | 13 |
| Capítulo 4 – CONSTITUIÇÃO DOS BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO | 19 |
| 4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES..... | 19 |
| 4.1.1 Cimento..... | 19 |
| 4.1.2 Adições minerais..... | 21 |
| 4.1.2.1 Cinzas volantes | 22 |
| 4.1.2.2 Sílica de fumo | 24 |
| 4.1.2.3 Metacaulino | 25 |
| 4.1.3 Água..... | 25 |
| 4.1.4 Adjuvantes | 26 |
| 4.1.4.1 Superplastificantes..... | 26 |
| 4.1.4.2 Outros adjuvantes | 27 |
| 4.1.5 Agregados | 29 |
| 4.1.6 Fibras..... | 31 |
| 4.2 MÉTODO DE MISTURA DE UM BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO | 34 |
| Capítulo 5 – VANTAGENS DE APLICAÇÃO DOS HPC E UHPC | 37 |
| 5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS..... | 37 |
| 5.1.1 Custos de aplicação..... | 40 |
| 5.2 APLICAÇÃO ESTRUTURAL..... | 41 |
| 5.2.1 Edifícios | 42 |
| 5.2.1.1 Construção em altura, pilares..... | 43 |
| 5.2.1.2 Vigas | 44 |
| 5.2.1.3 Coberturas..... | 45 |
| 5.2.1.4 Paredes finas | 45 |
| 5.2.1.5 Reabilitação | 46 |
| 5.2.1.6 Ambientes agressivos | 46 |
| 5.2.2 Pontes..... | 47 |
| 5.2.2.1 Pré-fabricação | 51 |
| 5.2.3 Substituição do cimento por produtos sub industriais – vantagem ambiental.. | 53 |
| Capítulo 6 – ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE PATENTEADOS | 57 |
| 6.1 CONSTITUIÇÕES GERAIS DOS HPC E UHPC | 57 |
| 6.1.1 DUCTAL | 58 |
| 6.1.1.1 DUCTAL JS1000..... | 61 |
| 6.1.2 RESCON..... | 61 |
| 6.1.3 DUCORIT | 63 |
| 6.1.4 CERACEM | 65 |

| | | |
|--|---|------------|
| 6.1.5 | BCV (Béton Composite Vicat) | 66 |
| 6.1.6 | CARDIFRC..... | 68 |
| | | |
| Capítulo 7 – RECOMENDAÇÕES PARA A APLICAÇÃO ESTRUTURAL DO HPC/UHPC..... | | 71 |
| 7.1 | GENERALIDADES | 71 |
| 7.1.1 | Recomendações da RILEM..... | 72 |
| 7.1.2 | Recomendações francesas..... | 73 |
| 7.1.3 | Recomendações italianas | 74 |
| 7.1.4 | Recomendações japonesas | 75 |
| 7.1.5 | Recomendações da VSL Austrália para vigas pré-esforçadas compostas por DUCTAL | 77 |
| | | |
| Capítulo 8 – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES REALIZADAS..... | | 79 |
| 8.1 | GENERALIDADES | 79 |
| 8.1.1 | Two Union Square, Seattle (Estados Unidos da América) | 79 |
| 8.1.2 | Construção da cobertura de silos, Illinois (Estados Unidos da América) | 81 |
| 8.1.3 | Fundações de turbinas eólicas offshore a Sul da Ilha de Samsøe (Dinamarca) | 83 |
| 8.1.4 | Ponte pedonal, Seoul, (Coreia do Sul) | 84 |
| 8.1.5 | Placas de ancoragens, Calgary, (Canadá)..... | 85 |
| 8.1.6 | Cobertura em casca das portagens do viaduto Millau (França) | 86 |
| 8.1.7 | Ponte rodoviária the Saint-Pierre-La-Cour (França)..... | 87 |
| 8.1.8 | Reforço de barreiras de embate com camada de UHPRFC em ponte rodoviária, Zurique (Suíça)..... | 89 |
| 8.1.9 | Reforço estrutural de membros de plataformas petrolíferas | 90 |
| 8.1.10 | Reabilitação de pilar de uma ponte, Zurique (Suíça) | 91 |
| 8.1.11 | Reforço de laje industrial, Genebra (Suíça) | 93 |
| 8.1.12 | “Carpete voadora”, Estrasburgo (Bélgica)..... | 93 |
| 8.1.13 | Ampliação do aeroporto internacional de Tóquio (Japão) | 94 |
| 8.1.14 | Outras aplicações | 95 |
| | | |
| Capítulo 9 - CONCLUSÕES..... | | 99 |
| | | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1 - Vida útil e vida residual de uma estrutura | 6 |
| Figura 2. 2 - Protecção das estruturas à introdução de água | 7 |
| Figura 2. 3 - Porosidade dos capilares vs razão A/C..... | 8 |
| Figura 3. 1 - Evolução das resistências médias à compressão do betão aos 28 dias | 12 |
| Figura 4. 1 - Resistência à compressão do betão vs razão A/C vs resistência compressão cimento | 20 |
| Figura 4. 2 - Densidade de fibras existente nos HPC obtida por raio- X, simulada num cubo ... | 32 |
| Figura 4. 3 - Comparação do comportamento a um ensaio uniaxial de tracção de um betão com menor volume de fibras (<2%)(esquerda), em relação a um betão com maior volume de fibras (> 2%)(direita)..... | 33 |
| Figura 5. 1 - Influência da razão A/C na resistência à compressão do betão | 38 |
| Figura 5. 2 – Aumento da resistência à compressão nos dias após fabrico do betão | 39 |
| Figura 5. 3 - Economia futura de custos dos UHPC em relação ao betão convencional | 41 |
| Figura 5. 4 - Avanço em altura com implementação de HPC com elevada resistência | 43 |
| Figura 5. 5 - Comparação das dimensões da viga de UHPC em relação a viga equivalente de aço, betão pré-esforçado e betão convencional..... | 44 |
| Figura 5. 6 - Construção de pequeno pavilhão com paredes de UHPC de 3 cm de espessura.... | 45 |
| Figura 5. 7 – Representação esquemática da ponte Gyeongju, à esquerda estrutura comum, à direita estrutura com passeio pedonal de UHPC suspensa..... | 48 |
| Figura 5. 8 - Laje (1,8 m x 3 m), constituída por UHPC de 25 mm de espessura suportando um automóvel..... | 49 |
| Figura 5. 9 - Comparação do comportamento à flexão do UHPC (DUCTAL) com o betão convencional | 50 |
| Figura 5. 10 - Ponte de Sherbrooke, Canadá, primeira ponte construída em UHPC, tabuleiro com 3 cm de espessura | 50 |
| Figura 5. 11 - Viga em “π”, pré-fabricada com 15 m de comprimento e 3 m de largura para aplicação em pontes pedonais | 51 |
| Figura 5. 12 - Viga protótipo em UHPC desenvolvida pela FHWA..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 6. 1 - Gama de cores do BCV | 67 |
| Figura 6. 2 - Instalação de painel de varanda com BCV (cor preta) | 68 |
| | |
| Figura 8. 1 - Interior de um tubo de aço utilizado para confinar o HPC do Two Union Square, (Estados Unidos da América)..... | 80 |
| Figura 8. 2 - Instalação da cobertura do silo | 82 |
| Figura 8. 3 - Instalação das turbinas eólicas a Sul da ilha de Samsøe (Dinamarca),..... | 83 |
| Figura 8. 4 - Ponte da Paz, Seoul, Coreia do Sul | 85 |
| Figura 8. 5 - Placa de ancoragem de UHPC instalada no muro de contenção de terras..... | 86 |
| Figura 8. 6 - Cobertura das portagens do viaduto Millau (França) | 87 |
| Figura 8. 7 - Descrição da solução implementada, na Ponte rodoviária the Saint-Pierre-La-Cour (França) | 88 |
| Figura 8. 8 - Ponte rodoviária de Saint-Pierre-La-Cour sobre uma linha-férrea..... | 88 |
| Figura 8. 9 - Barreiras protectoras de embate reabilitadas com UHPRFC..... | 89 |
| Figura 8. 10 - Injecção de UHPC nos elementos de suporte da plataforma Sabah Shell (Malásia) 90 | |
| Figura 8. 11 - Elementos de suporte revestidos com UHPC contra a corrosão..... | 91 |
| Figura 8. 12 - Pilar reabilitado na Suíça..... | 92 |
| Figura 8. 13 - Secção transversal da laje reforçada com a camada de UHPRFC (cinzento)..... | 93 |
| Figura 8. 14 - “Carpete voadora”, Museu Ungerer | 94 |
| Figura 8. 15 - Nova pista do aeroporto internacional de Tóquio construída sobre o mar | 95 |
| Figura 8. 16 - Tetrapodes constituídos por UHPC na ilha da Reunião | 96 |
| Figura 8. 17 – Representação esquemática de bancadas de estádio em UHPC..... | 96 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2. 1 - Porosidade à água das várias classes de betões..... | 7 |
| Quadro 2. 2 - Velocidade de corrosão das armaduras de diferentes classes de betões | 9 |
| Quadro 3. 1 - Diferenciação das classes de betões segunda a sua resistência à compressão | 15 |
| Quadro 3. 2 - Diferenciação das classes de betões..... | 15 |
| Quadro 3. 3 - Diferenciação das classes de betões..... | 16 |
| Quadro 4. 1 - Evolução dos superplastificantes | 27 |
| Quadro 4. 2 - Resistências de diversos agregados..... | 29 |
| Quadro 4. 3 - Características de fibras poliméricas e de carbono. | 32 |
| Quadro 5. 1 - Resistências máximas à compressão adquiridas em relação à razão A/C..... | 38 |
| Quadro 5. 2 - Aplicações dos HPC e UHPC | 42 |
| Quadro 5. 3 - Razão entre a massa das restantes vigas em relação à viga de aço | 44 |
| Quadro 5. 4 - Composição dos betões ensaiados | 55 |
| Quadro 5. 5 - Parâmetros ambientais emitidos no fabrico dos materiais discriminados, segundo dados de Teichmann e Schmidt..... | 55 |
| Quadro 6. 1 - Comparação da constituição do UHPC e HPC | 57 |
| Quadro 6. 2 - Comparação das características de durabilidade dos diferentes betões | 59 |
| Quadro 6. 3 - Constituição típica do DUCTAL | 59 |
| Quadro 6. 4 - Diâmetro dos constituintes do DUCTAL..... | 60 |
| Quadro 6. 5 - Características do DUCTAL..... | 60 |
| Quadro 6. 6 - Características DUCTAL JS1000 | 61 |
| Quadro 6. 7 - Constituintes do RESCON..... | 62 |
| Quadro 6. 8 - Características de vários produtos DUCORIT..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Quadro 6. 9 - Características de durabilidade do DUCORIT | 64 |
| Quadro 6. 10 - Constituintes do BSI/ Ceracem..... | 65 |
| Quadro 6. 11 - Características de durabilidade do Ceracem | 66 |
| Quadro 6. 12 - Características mecânicas do BCV | 66 |
| Quadro 6. 13 - Características de durabilidade do BCV | 67 |
| Quadro 6. 14 - Constituintes do CARDIFRC | 69 |
| Quadro 6. 15 - Propriedades mecânicas do CARDIFRC | 69 |
| | |
| Quadro 8. 1 - Constituintes do HPC utilizado no Two Union Square, (Estados Unidos da América)..... | 80 |
| Quadro 8. 2 - Comparação da duração de montagem das coberturas dos silos em aço e UHPC. | 82 |
| Quadro 8. 3 - Comparação de algumas características entre trechos de bancada em betão convencional e UHPC | 97 |

NOTAÇÕES

Letras minúsculas latinas

| | |
|-------|---|
| f_c | resistência à compressão do betão em provetes cilíndricos aos 28 dias |
| w | massa de água por unidade de volume da pasta de betão |
| c | massa de cimento por unidade de volume da pasta de betão |
| s | massa de sílica de fumo por unidade de volume da pasta de betão |

Letras maiúsculas latinas

| | |
|-----------------|---|
| CO ₂ | dióxido de carbono |
| A/L | razão entre a água e o ligante |
| A/C | razão entre a água e o cimento |
| K_g | parâmetro dependente do tipo de agregados |
| R_c | resistência do cimento aos 28 dias |
| MS | microsílica |
| E | escória |

Siglas

| | |
|--------|--|
| FHWA | Federal Highway Administration |
| HPC | High Performance Concrete |
| UHPC | Ultra High Performance Concrete |
| HSC | High Strength Concrete |
| AFGC | Association Française de Génie Civil |
| SETRA | Service d'études techniques des routes et autoroutes |
| RILEM | Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux |
| UHSC | Ultra High Strength Concrete |
| ACI | American Concrete Institute |
| UHPRFC | Ultra High Performance Reinforced Fibre Concrete |
| CV | Cinzas Volantes |
| BSI | Béton Spécial Industriel |
| BCV | Béton Composite Vicat |

| | |
|--------|---|
| FRC | Fibre Reinforced Concrete |
| SFRC | Steel Fibre Reinforced Concrete |
| HPFRCC | High Performance Fibre Reinforced Cement Composites |
| BPEL | Béton Précontraint aux États-Limites |
| BAEL | Béton Armé aux Etats Limites |
| RPC | Reactive Powder Concrete |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Segundo Almeida, 2001, Mehta anunciou numa palestra no Rio de Janeiro em 1997, que a Federal Highway Administration (FHWA) previa, no início da década de oitenta, que até ao ano 2000 seriam gastos 100 biliões de dólares na recuperação e reforço de pontes americanas. Dez anos volvidos, esta estimativa foi aumentada para 200 biliões de dólares, haviam sido constatados 253 mil problemas de durabilidade em tabuleiros de pontes nos Estados Unidos da América até 1987, um número que indicou que este problema tinha um crescimento de 35 mil casos anuais, Almeida, 2001.

A estes dados foram acrescentados e actualizados outros por Monteiro nas XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural no ano 2000 no Uruguai, onde afirma que metade das pontes existentes nos Estados Unidos da América (cerca de 300 000), apresentam problemas. É referido pelo mesmo ainda que os Estados Unidos da América apresentam maiores custos na recuperação das suas pontes do que propriamente na construção de novas, facto que já ocorre em Inglaterra desde 1995 e no Canadá desde 1999, Monteiro, 2000.

Estes dados levantam preocupações a nível da durabilidade das construções e contrariam qualquer teoria existente de uma construção auto-sustentável, questionando-nos sobre quais as soluções para garantir um maior tempo de vida para as estruturas de betão armado com um estado de conservação aceitável.

Na actualidade, em que as cidades têm uma grande densidade de construção e tendem a expandir-se para outros ambientes, ambientes agressivos do ponto de vista de “ataque” às estruturas, que incluem desertos, regiões polares e marítimas, existe a necessidade de elevar a resistência à compressão do betão, mas além disso e tão importante como o último, fabricar o betão com características de durabilidade que permitam as estruturas resistir aos ambientes adversos, aumentando o seu tempo de vida útil e retardando intervenções avultadas nestas.

O betão na actualidade é o material mais utilizado em termos de construção de estruturas, por isso interessa verificar quais as possíveis melhorias a realizar neste, para se obter uma maior durabilidade das estruturas.

1.2 OBJECTIVOS

A grande evolução dos betões nos últimos anos, levou ao aparecimento dos betões de elevado desempenho, sendo de uso corrente para se referir a estes as siglas das palavras na língua inglesa, HPC-High Performance Concrete e UHPC-Ultra High Performance Concrete. Estes betões vieram impor acima de tudo grande durabilidade às estruturas.

Além do incremento de durabilidade a possibilidade da diminuição do uso do cimento no HPC utilizando adições minerais, reduz em parte a libertação de dióxido de carbono para atmosfera, proveniente da produção do cimento, factor que vai de encontro às medidas desejadas para a protecção do planeta.

Este trabalho tem o objectivo de averiguar a fase de desenvolvimento actual destes betões, verificando quais as suas características intrínsecas inovadoras, os seus espaços de aplicação e a sua constituição nomeadamente de UHPC's patenteados e utilizados nas maiores obras realizadas com este material a nível mundial.

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído por nove capítulos incluindo o presente capítulo introdutório, organizados e com o conteúdo seguidamente apresentado.

No capítulo 2 - durabilidade, são apresentadas definições de vários autores de durabilidade, bem como agentes agressores das estruturas de betão armado. São referidos ensaios que possibilitam caracterizar as capacidades de durabilidade dos betões.

São referidas mais valias trazidas pelo HPC e UHPC para o aumento da durabilidade nas estruturas de betão armado.

No capítulo 3 – desenvolvimento do HPC e UHPC, são referidas, numa primeira parte, medidas adoptadas ao longo dos anos na fabricação dos betões para atingir uma maior durabilidade. Mais adiante é feita a diferenciação entre

High Strength Concrete (HSC), HPC e UHPC, tal como classes divisórias entre o betão convencional, HPC e UHPC através de várias das suas características.

O quarto capítulo – constituição, destina-se a indicar os materiais que compõem os HPC e UHPC, salientando as características que devem ser preservadas para obtenção de um produto com boa qualidade. Neste capítulo é também apresentado um método de mistura dos constituintes anteriormente discutidos, tendo em vista determinar quantidades necessárias para atingir a resistência à compressão pretendida.

No quinto capítulo - vantagens de aplicação dos HPC e UHPC, numa primeira fase são indicadas características intrínsecas do UHPC, relacionando-as com possíveis aplicações em estruturas. Adiante, são enumeradas e discutidas as capacidades inovadoras deste material em diversos tipos de estruturas. No final do capítulo, é abordada a questão ambiental, com valores de um teste exemplificativo das emissões de dióxido de carbono (CO_2) emitidas no fabrico do UHPC em comparação com outros materiais construtivos. O custo da utilização do UHPC nas estruturas é também abordado.

Exemplos de UHPC patenteados são descritos no sexto capítulo - HPC/UHPC patenteados, indicando algumas das suas constituições, características e especialidades de aplicação. Numa parte inicial é ainda feita a distinção da constituição de um HPC em relação a um UHPC.

No capítulo sete - recomendações para a aplicação estrutural de HPC/UHPC, é abordado um tema que tem grande importância na difusão da aplicação dos HPC/UHPC a nível estrutural. São descritos os conteúdos de várias recomendações nacionais, internacionais e associativas.

No oitavo capítulo – aplicações realizadas, são apresentadas diversas obras realizadas com HPC e UHPC, tentando demonstrar na prática as vantagens da sua aplicação numa grande variedade de estruturas, bem como algumas obras emblemáticas protagonizadas por estes materiais.

No último capítulo – conclusões, é feito um resumo das principais aplicações do UHPC, bem como a fase actual da aplicação deste material e ainda possíveis contribuições para a expansão futura do UHPC.

Capítulo 2

DURABILIDADE

2.1 GENERALIDADES

Azevedo, 2002, citando Andrade, Alonso e Neville, define a durabilidade do betão como a capacidade deste manter as suas características salvaguardadas ao longo da sua vida útil, que é definida como o período de tempo em que uma estrutura conserva os requisitos de segurança, funcionalidade e estéticos definidos em projecto sem custos de manutenção adicionais, Azevedo, 2002.

Pela definição acima apresentada, dificilmente um betão poderá ser definido como de alta durabilidade em laboratório. Em laboratório apenas se pode verificar algumas características, tais como permeabilidade, ataque de cloretos, abrasão, entre outras, que nos levem a acreditar que irá ter uma maior ou menor longevidade.

Assim só um betão desempenhando o papel na estrutura e no meio que lhe foi atribuído é que será possível verificar o seu estado. Além disto, um betão poderá ter uma boa durabilidade numa determinada estrutura, conjugado com um determinado meio, enquanto que se este mesmo betão for aplicado numa outra estrutura e meio diferente pode ser pouco durável.

Além do período de vida útil definido anteriormente, Coutinho citando, Andrade e Alonso em 1996, definem o tempo de vida residual de uma estrutura de betão armado como sendo o período de tempo em que o desempenho da estrutura é inaceitável e carece de intervenção. Contudo após as reparações a estrutura nunca irá adquirir o desempenho máximo já obtido na sua fase inicial, catapultando para um grau de importância elevado a obtenção de uma boa durabilidade do material que irá estar presente na estrutura. A figura seguinte indica o descrito anteriormente.

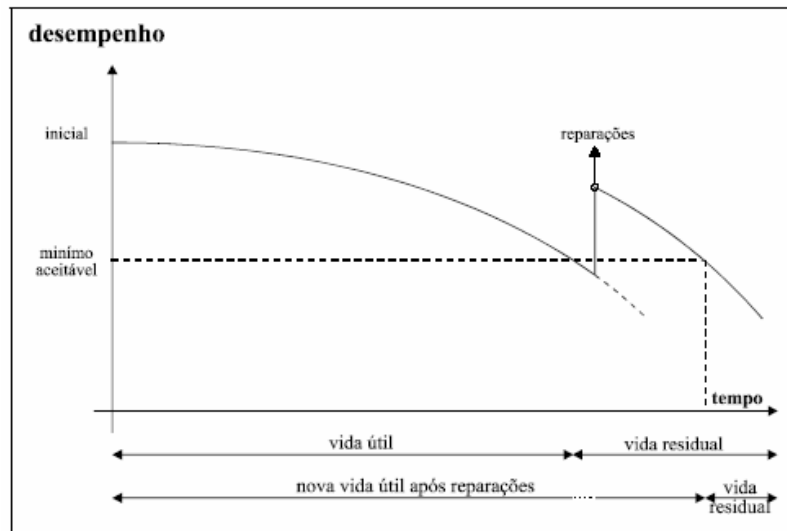


Figura 2. 1 - Vida útil e vida residual de uma estrutura, Coutinho, 1998

2.2 MEDIDAS DE DURABILIDADE

Assim segundo Almeida, 2001, o ataque pode ter origem interna ou externa ao betão. Interiormente, a degradação do betão está relacionada com a expansão deste devido a ataques sobre os agregados por parte de substâncias como os cloretos ou sulfatos.

Externamente, os ataques destas substâncias poderão também ocorrer, com particular efeito sobre as armaduras existentes ou outros factores como elevadas cargas aplicadas, movimentação das fundações, fadiga, variações de temperatura, ciclos de gelo-degelo, carbonatação entre outras. Estas acções actuando conjuntamente ou separadas poderão provocar fissuração, corrosão das armaduras, diminuição da capacidade de carga e até mesmo o colapso da estrutura.

É difícil quantificar a durabilidade devido à larga natureza, intensidade e mecanismos possíveis de ocorrer nos diferentes ataques; sendo que existem várias características possíveis de ensaiar que podem ajudar a prever o comportamento de um determinado betão no ambiente e estrutura ao qual vai estar submetido.

Uma das principais características para definir a durabilidade de um betão é a sua permeabilidade, visto que quanto mais permeável for o material maior capacidade terão os agentes exteriores de deteriorar o betão, penetrando na sua composição. A água é um excelente

meio de transporte dos elementos nocivos à estrutura, por isso a impermeabilização de uma estrutura reveste-se de capital importância para protecção ao ataque dos agentes exteriores.



Figura 2. 2 - Protecção das estruturas à introdução de água, Almeida, 2001

Para Aïtcin, 1998, garantir uma boa impermeabilização da estrutura é sinónimo de existir uma baixa relação entre a água e o ligante utilizado (A/L), porque promove uma pasta compacta reduzindo a capacidade de entrada de agentes agressores. Na quadro seguinte, segundo dados da Associação Francesa de Engenheiros Cívicos e as Estradas Francesas e Agência de Tráfego Governamental (AFGC-SETRA), verifica-se a baixa permeabilidade à água dos UHPC em relação aos outros betões, quantificando-se a percentagem de poros acessível à água.

Quadro 2. 1 - Porosidade à água das várias classes de betões, AFGC-SETRA, 2002

| Tipos de betões | Betão convencional | HPC | UHPC |
|-----------------------|--------------------|------|-------|
| Porosidade à água (%) | 12-16 | 9-12 | 1,5-9 |

O grande factor para a durabilidade dos HPC e UHPC é a sua microestrutura, apresentando todas as partículas muito mais próximas umas das outras do que um betão convencional devido a possuir uma razão entre a água e o cimento (A/C) baixa, permitida pela adição de superplastificantes. Este facto permite uma menor quantidade de elementos de hidratação, tornando a pasta muito compacta e menos porosa, aumentando a sua impermeabilidade em relação aos betões convencionais.

O gráfico seguinte demonstra a diminuição da porosidade quando a razão A/C decresce.

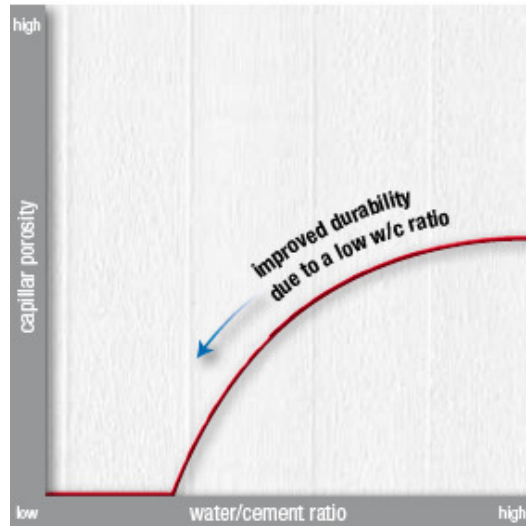


Figura 2.3 - Porosidade dos capilares em comparação com razão A/C, sítio da Sika

Devido aos elementos do ligante se encontrarem próximos, quando estes são hidratados o HPC atinge ainda uma resistência à compressão inicial elevada.

Outra característica importante tem a haver com a degradação do recobrimento. Esta acção é essencialmente protagonizada pelos cloretos e dióxido de carbono, que pela perda da protecção das armaduras actuam com uma acção corrosiva sobre as estas. Almeida, 2001, indica que a corrosão das armaduras é o estado limite mais crítico das estruturas de betão armado.

A garantia de protecção das armaduras é dada por um bom recobrimento que deve ser adequado ao local de construção da estrutura, pois este assegura uma boa protecção às armaduras devendo ser consultados os recobrimentos mínimos associados a classe de exposição da estrutura indicados na norma NP EN 206-1, 2007.

A deterioração das armaduras é devido a um inadequado recobrimento, estando as armaduras à mercê dos iões cloreto, considerado também segundo Azevedo, 2002, por Pigeon como a principal causa da deterioração de estruturas de betão armado.

É reportado na bibliografia internacional que uma baixa razão A/C e a introdução da sílica de fumo, cinzas volantes e escórias é importante para uma baixa permeabilidade e elevada resistência à penetração dos iões cloreto.

Obtendo uma permeabilidade baixa, permitirá o betão proteger-se não só da penetração da água como dos iões cloreto. Uma melhor protecção das armaduras pode ser obtida com a utilização de HPC ou UHPC, como é demonstrado no quadro seguinte.

Quadro 2. 2 - Velocidade de corrosão das armaduras de diferentes classes de betões, adaptado AFGC-SETRA, 2002

| Classe dos betões | C30/37 | C80/95 | UHPC |
|---|--------|--------|-------|
| Velocidade de corrosão das armaduras ($\mu\text{m}/\text{ano}$) | 1,2 | 0,25 | <0,01 |

A resistência à compressão de um betão poderá ser um indicador da sua durabilidade, no entanto não deverá ser tomado como uma verdade inequívoca, visto que os ensaios à compressão são realizados uniaxialmente sobre toda a secção do provete, enquanto que por exemplo a maior protecção do betão, no ataque dos cloretos é fornecida pela qualidade do recobrimento.

Não existindo uma constituição exacta que maximize a durabilidade do betão, Almeida, 2001, citando Mehta, acredita que uma boa constituição englobaria, superplastificantes, baixas relações A/C, altas dosagens de cimento e utilização de adições pozolânicas de boa qualidade.

A constituição enunciada por Almeida, 2001, vai ao encontro das características de um HPC ou UHPC. Em adição a esta constituição, a selecção criteriosa dos materiais referidos a cima e o rigoroso acompanhamento na sua elaboração deverão ser garantia de execução de um material de elevada durabilidade, dando uma vida útil às estruturas substancialmente inflacionada em relação aos betões convencionais.

Não existindo consenso em relação aos parâmetros identificativos da durabilidade, alguns autores chegaram a conclusões sobre estes. Referindo-se a Neville, 1995, Almeida refere que para um betão ter boa durabilidade é necessário que tenha uma reduzida penetrabilidade aos líquidos, tomando elevada importância as características de permeabilidade e absorção do betão.

O comité RILEM em 1999, conferiu ao ensaio de permeabilidade a gases e ao ensaio de absorção capilar, métodos que deveriam fazer parte da rotina caracterizadora da durabilidade dos betões.

A escolha destes ensaios por parte do comité deveu-se a estes estarem directamente relacionados com a corrosão das armaduras, factor considerado central tendo em vista a durabilidade das estruturas de betão armado.

A impermeabilidade de um betão e a garantia da protecção das armaduras deste são duas formas defendidas por um número elevado de autores de prevenir a fraca durabilidade das estruturas de betão, contudo existem outras formas de deterioração da estrutura, não sendo fácil quantificar no presente a durabilidade.

A resistência à compressão de um betão, segundo os diversos autores deixou de ser o parâmetro melhor caracterizador da durabilidade do betão, dando lugar à permeabilidade deste, como medida mais aproximada de caracterização da sua durabilidade.

Sendo o HPC e UHPC materiais compactos, a serem constituídos por adjuvantes que conferem uma boa trabalhabilidade, permitindo a adição de materiais finos que tornam o betão mais impermeável, são considerados bons materiais para resistir aos mais diversos ataques tanto a nível interno como externo.

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO DO HIGH PERFORMANCE CONCRETE E ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

3.1 HISTÓRIA DO HPC e UHPC

A história do desenvolvimento dos betões tem-se caracterizado pela possibilidade de ao se modificar alguma das características destes, poder-se otimizar o seu desempenho.

As primeiras tentativas de evolução estiveram relacionadas com a adição em maior ou menor quantidade dos constituintes, fazendo-se ensaios para verificar as mudanças das propriedades dos betões. Numa segunda fase não só foi dada importância às proporções dos materiais, como estudou-se o emprego de novos constituintes, dos quais se destacaram alguns subprodutos industriais como as cinzas volantes e a sílica de fumo.

A fase actual agrupa as duas anteriores com a adição de adjuvantes (plastificantes, superplastificantes, aceleradores, retardadores), de onde pode-se retirar benefícios destes para modificar as quantidades dos constituintes do betão de modo a obter-se um melhor desempenho.

Nos finais da década de sessenta, com o escassear do espaço nas grandes cidades, sentiu-se necessidade de construir em altura. Com o aumento da altura dos edifícios houve necessidade de aumentar a resistência à compressão dos pilares para o suporte de maiores cargas, rapidez na execução e com isso uma economia de custos. Segundo Caldarone, 2009, o aumento da resistência à compressão deveu-se a factores como avanços tecnológicos na mistura de químicos, aumento da disponibilidade de adições minerais e aumento do conhecimento sobre o funcionamento dos betões de elevada resistência (HSC).

Esta evolução deu-se de forma particularmente activa em Chicago, com construções de vários edifícios altos, avançando cada vez mais na resistência dos elementos estruturais.

Como exemplo desta construção tem-se o Water Tower Place 1970, na altura o edifício mais alto do mundo em betão armado, onde se obteve uma resistência máxima à compressão de 60 MPa.

Na evolução dos betões houve inicialmente a preocupação de aumentar a capacidade de resistência à compressão, com o desenrolar do tempo, passou-se não só a preocupar-se com o aumento da resistência à compressão, mas também com outras propriedades para se obter uma maior durabilidade das estruturas de betão, com esta preocupação obteve-se uma nova designação de betões, designados betões de elevado desempenho. Na figura seguinte é demonstrado o rápido crescimento da resistência à compressão dos betões.

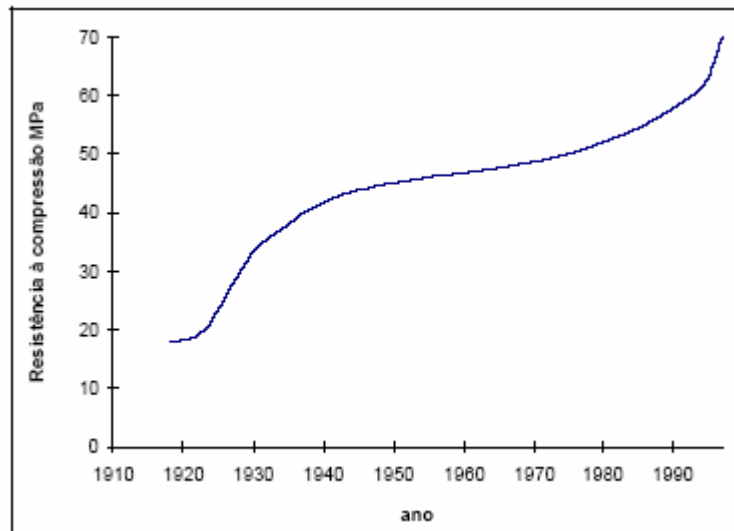


Figura 3. 1 - Evolução das resistências médias à compressão do betão aos 28 dias, Coutinho, 1998

O aparecimento de betões de elevado desempenho é uma consequência da evolução dos betões convencionais aproveitando o aparecimento de novos adjuvantes e motivados com a resolução de problemas do quotidiano, como ocupação de espaços, durabilidade dos edifícios e preocupações ambientais.

Os impulsionadores destes betões foram os adjuvantes redutores de água de alta gama (superplastificantes), que permitem uma boa trabalhabilidade do betão, permitindo adicionar a este uma maior quantidade de ligante.

Aïtcin citando Hattori e Meyer, 1981, refere que a primeira utilização de superplastificantes no betão ocorreu simultaneamente na Alemanha e no Japão em 1960, com o objectivo de facilitar a colocação do betão em obra sem o risco de ocorrer segregação (betão ficar aprisionado nas armaduras aquando do seu bombeamento) e perda de resistência.

Desde a introdução inicial dos superplastificantes, as dosagens recomendadas pelos produtores destes foram sendo incrementadas, até que na década de oitenta os superplastificantes passaram a ser vistos como uma gama de elevados redutores de água, permitindo que fosse atingida uma razão A/L inferior a 0,30.

O aumento do ritmo de construção foi um dinamizador para o desenvolvimento dos superplastificantes. Este ritmo fez nascer a indústria do betão pronto o que exigiu um aumento significativo da trabalhabilidade designadamente para o transporte do betão e respectiva bombagem. Pode-se afirmar que uma das grandes diferenças de produção entre betões convencionais e betões de elevado desempenho é o factor controlador da trabalhabilidade, nos convencionais é controlada pela água e nos HPC e UHPC pelos superplastificantes.

Em 1981 Bache, reporta que em laboratório, introduzindo não só grandes quantidades de superplastificante e um novo produto ultrafino substituto do cimento, conseguiu atingir resistências à compressão de 281 MPa e uma razão A/C de 0,16, demonstrando que esta razão poderia ainda ser bastante minimizada em relação ao que era conhecido nesta altura.

Os produtores de betão tinham no entanto relutância em introduzir materiais ultrafinos como adições minerais como a sílica de fumo, devido ao seu elevado preço. A sílica de fumo era enviada para a atmosfera como subproduto das centrais termo eléctricas. Medidas governamentais com âmbito ambiental obrigaram a dar uma nova utilização a estas.

Com a introdução da sílica de fumo foi possível elevar as resistências à compressão mantendo uma boa trabalhabilidade, podendo adquirir as propriedades actuais conferidas aos UHPC.

3.2 DIFERENCIAÇÃO ENTRE HSC E HPC

Na década de setenta a principal preocupação dos construtores era o de aumentar a resistência à compressão, permitindo a construção de edifícios de elevada altura, ficando definido sem quaisquer dúvidas que este tipo de betões utilizados designavam-se por betões de elevada resistência (HSC).

Com a evolução da indústria do betão surgiram adjuvantes como os superplastificantes e materiais provenientes de processos industriais, onde se verificou que a sua aplicação era bastante benéfica, não só permitindo aumentar a resistência à compressão do betão, mas

melhorando outras propriedades como a trabalhabilidade, resistência à flexão, maior módulo de elasticidade, maior impermeabilidade, resistência à abrasão e maior durabilidade.

Desta forma a designação de HSC, que apenas distinguia um betão convencional de outro betão com resistência à compressão elevada, tornou-se pouco abrangente para as qualidades adquiridas pelos novos betões. A preocupação central na produção de betões, motivada pela necessidade de preservar as matérias – primas, passou a ser a durabilidade e um betão com elevada resistência não é garantia absoluta de elevada durabilidade.

Tal como nos finais da década de sessenta houve preocupações, relativamente ao aumento da resistência à compressão. Na actualidade a construção de estruturas em ambientes agressivos levou a necessidades de existência de por exemplo uma maior impermeabilidade, conduzindo, os edifícios a uma maior vida útil numa época em que a escassez de recursos é preocupante. Para estas características não tão simples como o aumento da resistência à compressão, mas relacionadas com o desempenho do betão, designou-se os betões com requisitos necessários para as cumprir de betões de elevado desempenho.

A designação de HSC está a ser colocada de lado visto que, existe a necessidade de produzir betões com cada vez melhor desempenho não unicamente à compressão. Contudo a resistência à compressão continua a ser uma característica acessível para definir patamares divisórios entre os betões convencionais, HPC e UHPC.

Existindo uma ideia global de diferenciação dos tipos de betões a partir da sua classe de resistência, esta não poderá ser tomada como verdade absoluta visto que isso depende da qualidade das matérias das regiões e dos hábitos construtivos destas. Além de existir uma variação geográfica das classes de resistência, existe uma variação temporal, devido ao desenvolvimento e investigação dos constituintes do betão.

Na construção da ponte da Arrábida no Porto, concluída em 1963 atingiu-se um valor de resistência à compressão de 40 MPa, valor que hoje em dia é alcançado recorrentemente. Se compararmos o valor de resistência à compressão máximo utilizado na Ponte da Arrábida com o decidido utilizar nos Estados Unidos da América na construção do Water Tower Place (60 MPa) em 1960, verifica-se que o conceito de HSC pode variar geograficamente no mesmo espaço temporal.

Normalmente, a diferenciação da classe dos betões foi efectuada pela sua resistência à compressão, devido a ser um parâmetro que permite facilmente distinguir um betão

Capítulo 3:Desenvolvimento do HPC e UHPC

convencional de um HPC ou UHPC. Contudo vários autores têm aprofundado esta diferenciação.

Azevedo, 2002, indica que Pliskin em 1992 definiu as seguintes classes de betões considerando os intervalos de resistências características à compressão, salientando que estas resistências não descreviam as características completas da época dos HPC e UHPC

Quadro 3. 1 - Diferenciação das classes de betões segunda a sua resistência à compressão, Pliskin, 1992

| Classe betões | f_{ck} (MPa) |
|--|----------------|
| Betão convencional | 20-50 |
| Betão de elevado desempenho (HPC) | 50-100 |
| Betão de ultra elevado desempenho (UHPC) | 100-150 |
| Betão excepcional | >150 |

Harris em 2010, além de impor patamares de resistência à compressão, indica valores de resistência à tracção e módulo de elasticidade dos diferentes betões.

Quadro 3. 2 - Diferenciação das classes de betões, Harris, 2010

| Propriedade | Betão convencional (MPa) | HPC (MPa) | UHPC (MPa) |
|--------------------------|--------------------------|-----------|------------|
| Resistência à compressão | 25-55 | 76-124 | 138-228 |
| Resistência à tracção | 2-5 | 5-6 | 12 |
| Módulo de elasticidade | 25-34 | 33-44 | 55 |

Segundo Azevedo, 2002 em 2000 Shah, fez uma diferenciação mais abrangente das características diferenciadoras das classes de betões no que respeita à sua resistência (HSC e UHSC). Uma equiparação das características poderá ser feita do seguinte modo. (HPC≈HSC e UHPC≈UHSC).

Quadro 3. 3 - Diferenciação das classes de betões, Shah, 2000

| Características | Betão convencional | HSC | UHSC |
|---|--------------------|--|--|
| Resistência à compressão (MPa) | <50 | ≈100 | >200 |
| A/L | >0,5 | ≈0,3 | >0,2 |
| Adjuvante | Não necessário | Necessário plastificante ou superplastificante | Essencial a adição de superplastificante |
| Adições minerais | Não necessário | Cinzas volantes ou sílica de fumo | Essencial a inclusão de sílica de fumo |
| Fibras | Benéfico | Benéfico | Essencial |
| Agente introdutor de ar | Necessário | Necessário | Não necessário |
| Processamento | Convencional | Convencional | Tratamento térmico e pressão |
| Coefficiente de difusão de cloretos em estado estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) | 1 | 0,6 | 0,02 |

Note-se o grande aumento registado na resistência à compressão no espaço de 18 anos (quadro de Pliskin e quadro de Harris), nas classes dos betões. O que em 1992, era considerado um UHPC em 2010 é praticamente um HPC, devido à constante evolução das capacidades deste material.

Azevedo, 2002, indica que segundo as normas Europeias, Britânicas e o American Concrete Institute (ACI), um HPC é definido como um betão que tem uma performance especial e requerimentos uniformes, que não podem ser concebidos apenas com os materiais convencionais, processos de mistura e processos de cura tradicionais.

O termo HPC, pode rotular um betão que contenha novas ou melhoradas propriedades em relação às de um betão convencional, sendo que um UHPC será um betão que contenha aperfeiçoamento das propriedades do HPC.

Como o HSC contém a elevada resistência à compressão melhorada, Caldarone 2009, afirma que este é considerado parte integrante de um conjunto de betões pertencentes à classe dos HPC. Além dos HSC, os betões leves, betões de auto-consolidação, betões pesados, betões de baixa permeabilidade, betões compensadores de retracção pertencem à classe dos HPC, visto terem características novas ou melhoradas em relação aos tradicionais.

Segundo o ACI, a produção de um HPC prevê um desenvolvimento de características particulares para um determinado ambiente, algumas das características citadas são facilidade de colocação do betão em obra, compactação sem segregação, aumento da resistência numa idade

inicial, propriedades mecânicas de longa duração, permeabilidade, densidade, calor de hidratação e vida útil prolongada.

Por existirem variadas propriedades que poderão ser melhoradas, Russel em 1999, indica que, estas estão relacionadas umas com as outras. A mudança numa das propriedades do betão, poderá levar à mudança em uma ou mais propriedades. Em consequência disto deve ser especificado claramente nos documentos de contrato a particularidade a estimular no HPC.

Azevedo, 2002, citando Zia, 1993, professor da Universidade Emeritus e ex-presidente do ACI Committee 363, afirmou, que é possível existir um HPC, com baixa resistência embora satisfazendo outros requisitos. Com esta afirmação desmistifica-se a ideia de que um HPC, tem de ter necessariamente elevada resistência à compressão.

Capítulo 4

CONSTITUIÇÃO DOS BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO

4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais constituintes dos HPC são em grande maioria os utilizados na composição dos betões convencionais, contudo nos HPC a escolha da mistura tem de ser otimizada e constituída por alguns materiais adicionais de elevada qualidade sujeitos a um rigoroso controlo de produção.

Segundo Caldarone, 2009, a constituição de um HPC, depende do tipo de estrutura, características dos agregados, disponibilidade do material e métodos construtivos.

A composição de um HPC não contempla uma norma que exija a implementação de determinados constituintes, existindo apenas os regulamentos nacionais indicativos de dosagens limite. Além disso a sua constituição dependerá da região onde este é fabricado, prendendo-se este facto essencialmente aos agregados, que podem existir em abundância numa região e noutra não.

Contudo os constituintes empregues terão como objectivo maximizar a durabilidade do HPC e para isso olhando à pesquisa realizada por diversos autores existem determinadas medidas que maximizam as características para obtenção de um HPC.

4.1.1 Cimento

Segundo Aïtcin, 1998, a primeira escolha a realizar para o fabrico de HPC deverá recair no tipo de cimento, independentemente do HPC poder conter outros produtos cimentícios.

O desempenho do cimento em termos de reologia e robustez torna-se uma questão crucial para o aumento da sua resistência.

Capítulo 4:Constituição dos betões de elevado desempenho

Existindo 3 valores de classes de resistência à compressão nos cimentos comerciais 32,5 MPa, 42,5 MPa, 52,5 MPa a selecção da classe poderá ser ponderada com a razão A/C a utilizar para atingir a resistência à compressão pretendida como é demonstrado na figura seguinte.

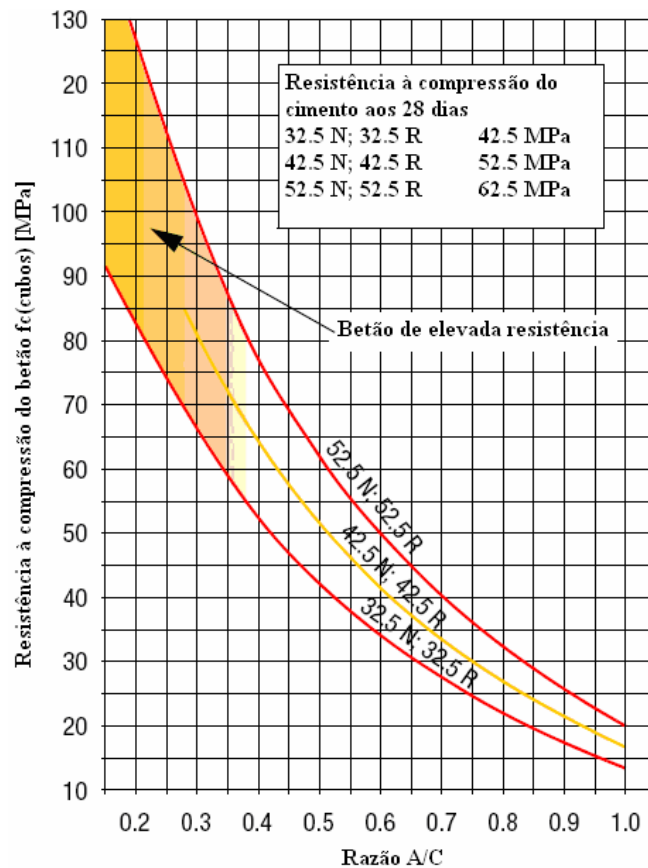


Figura 4. 1 - Resistência à compressão do betão vs razão A/C vs resistência compressão cimento, Sika 2005

Contudo como os HPC têm na sua composição adições minerais que elevam a resistência à compressão e a escolha da classe de cimento não tem efeito tão preponderante, nestes betões.

A escolha do cimento para utilização em HPC's, não terá de recair necessariamente em cimentos de características especiais, sendo de uso comum os cimentos de Portland do tipo I, II, III, no entanto alguns cimentos especiais são utilizados para a produção de HPC's, como o Norcen (Noruega) e HTS (Canadá), Teixeira e Martins, 2003.

A empresa portuguesa CIMPOR refere como sendo ideal o uso do CEM I 52,5R para betões de elevado desempenho mecânico.

Segundo Shi, Mo e Dhonde, 2008, o CEM III é o indicado para resistências iniciais elevadas e o CEM II com a adição de cinzas volantes e escórias de alto forno é normalmente a melhor opção para controlar o calor de hidratação.

O principal factor que influencia a escolha do tipo de cimento é a sua finura e a composição química. Com um cimento com partículas finas, obtém-se uma maior superfície que vai ser hidratada, ganhando resistências iniciais maiores. Este tipo de finura pode ser causador de problemas de trabalhabilidade pois o betão irá ganhar presa mais rapidamente, conduzindo ao uso de razões mais elevadas de A/C. Além disso quanto mais fino for o cimento mais tensões de retracção este sentirá provocando maior fissuração. Querendo evitar os problemas referidos causados por cimentos finos mas obtendo boas resistências iniciais a introdução de cinzas volantes será uma boa opção, já que esta tem capacidade para elevar as resistências em idades primitivas.

Quanto à sua composição química, os silicatos bicálcicos, silicatos tricálcicos e os aluminatos tricálcicos, são os principais constituintes do cimento. Os silicatos são garantes de uma boa resistência mecânica, já os aluminatos tricálcicos são garantes de uma boa resistência inicial. Contudo o excesso de aluminatos tricálcicos, pode provocar perda de fluidez e absorver grande quantidade de adjuvante retirando a capacidade de actuação nas funções que lhes estão atribuídas. De referir que na composição dos cimentos Norcen e HTS a quantidade de aluminatos tricálcicos é reduzida.

A dosagem de cimento, indicada pelos diferentes autores para constituição dos HPC situa-se entre os 400 e 500 kg/m³.

4.1.2 Adições minerais

Existem hoje em dia várias adições minerais possíveis para os HPC, como por exemplo cinzas volantes, sílica de fumo e o metacaulino, podendo estas em conjunto com o cimento aperfeiçoar as capacidades do betão.

A aplicação destas adições requer o estudo das suas características na reacção com os restantes constituintes dos HPC, para isso é indispensável proceder-se a várias simulações com diferentes proporções de dosagem para atingirmos as características pretendidas.

Segundo Russel, 2002, as adições minerais têm capacidade de modificar características como, elevar resistências em idades iniciais e idades avançadas, reduzir a permeabilidade, baixar o calor de hidratação, controlar as reacções dos agregados alcalinos e reduzir custos de produção.

A adição de cinzas volantes e escórias de alto forno são as mais comuns nos HPC, para se atingir as resistências do UHPC será útil o uso de sílica de fumo e partículas ultra-finas de cinzas volantes.

4.1.2.1 Cinzas volantes

A incorporação desta adição mineral no betão, teve inicialmente o objectivo de substituir o cimento, visto este ser um material dispendioso e por as cinzas volantes encontrarem-se depositadas em centrais termoeléctricas provenientes da queima do carvão sem objectivo de reutilização.

A dosagem óptima da quantidade de cinzas volantes utilizadas num HPC, depende da quantidade de resistência desejada, do tempo de vida útil que é pretendido para a estrutura, das propriedades químicas e físicas da cinza volante e dos restantes constituintes do betão.

Num betão convencional a percentagem de utilização de cinzas volantes varia entre os 15% a 25% da massa do cimento aplicado, sendo que para os HPC com necessidade de resistências especiais como à alcalis-silica ou resistência a ataques de sulfatos esta percentagem situa-se entre 30% a 40% ou mais, Caldarone, 2009.

O reduzido tamanho e forma esférica das suas partículas conduzem, a baixos coeficientes de atrito entre os elementos constituintes da mistura originando uma boa trabalhabilidade da pasta. Com o benefício da trabalhabilidade, diminui assim a quantidade de água necessária adicionar a uma pasta incorporando cinzas volantes em comparação a outra sem esta adição. Resultado directo do anteriormente descrito será a redução da razão A/C.

Segundo Shi, Mo e Dhonde, 2008, ao contrário da sílica de fumo o aumento da quantidade de cinzas volantes incorporadas na mistura faz diminuir a retracção do betão.

O preenchimento por parte das cinzas volantes dos vazios entre as partículas de cimento (efeito de filler), é uma das acções que conduzirá à existência ou não de um betão compacto e portanto com grande durabilidade. A reduzida dimensão das cinzas volantes, mais finas que as partículas

Capítulo 4: Constituição dos betões de elevado desempenho

de cimento, conduz a uma maior extensão de finos na granulometria do betão, obtendo-se um betão com menores quantidades de vazios tornando-o mais compacto e impermeável.

A presença de elementos siliciosos nas cinzas volantes permite que estes, tenham reacções pozolânicas (reacções entre a sílica e o hidróxido de cálcio presente no cimento de Portland) na presença de água adquirindo um bom relacionamento com o hidróxido de cálcio, derivado da hidratação do cimento. Resultante desta interacção os elementos siliciosos adquirem propriedades aglomerantes, originando tal como no efeito de filler um menor número de vazios e uma menor permeabilidade do betão.

Os efeitos desta reacção pozolânica poderão ser verificados em idades de cura mais avançadas, pois está dependente de duas reacções: elementos siliciosos com a água e elementos siliciosos com o hidróxido de cálcio.

Para betões com necessidade de resistências à compressão em idades avançadas mais elevadas, a incorporação das cinzas volantes em detrimento do cimento é uma boa opção.

Os elementos siliciosos presentes nas cinzas volantes são ainda benéficos para prevenção da reacção alcális-sílica. Estes elementos reduzem a quantidade de alcális presente na pasta de cimento para valores não problemáticos.

A resistência à corrosão das armaduras também sai beneficiada do emprego de cinzas volantes. Azevedo,2002 citando Alonso et al., refere que este benefício deve-se à substituição do cimento pelas cinzas volantes e o conseqüente aumento da quantidade de aluminatos que ao reagirem com os cloretos provocam uma diminuição destes, responsáveis pela corrosão das armaduras.

Uma inovação recente da aplicação das cinzas volantes é o aparecimento das ultra finas cinzas volantes, partículas de dimensões mais reduzidas que proporcionam ao HPC, um maior aumento de resistência e redução da permeabilidade.

Aspectos negativos

O local de origem das cinzas volantes, influenciará as suas características sendo necessário ter um cuidado redobrado e conhecimento aprofundado destas. Apesar de poderem ser provenientes da mesma central termoeléctrica as cinzas volantes poderão ter características diferentes.

Outro aspecto que pode ser considerado negativo e é relatada na bibliografia internacional em relação aos introdutores de ar, é que existe maior necessidade de emprego destes, à medida que a quantidade de cinzas volantes aumenta.

Devido à maior trabalhabilidade o tempo de presa aumentará, provocando um atraso no processo de desenvolvimento de resistências iniciais, provocando atrasos nomeadamente na descofragem.

4.1.2.2 Sílica de fumo

É um resíduo mineral ultra fino composto por esferas vítreas amorfas de dióxido de silicone produzida em fornos eléctricos. As suas partículas são cerca de 100 vezes inferiores aos grãos de cimento. É o material com maiores responsabilidades para o aumento da resistência à compressão no betão, sendo praticamente indispensável o seu emprego no caso dos UHPC.

Segundo Mazlom et al., 2004, um betão que inclua sílica de fumo na sua composição conseguirá uma boa resistência tanto em idades avançadas como em idades iniciais.

Citando Sobolev, 1999, Abou-Zeid, Fahmy e Massoud indicam que a sílica de fumo reduz a permeabilidade, fornece boa capacidade de resistência térmica e reforça a resistência em relação à acção gelo-degelo.

Esta adição mineral além de elevadas resistências mecânicas, segundo Caldarone, 2009, promove a coesão da pasta de cimento devido às suas minúsculas partículas, retém a água livre, previne a segregação e a exsudação. Tal como as cinzas volantes, a sílica de fumo desempenha o efeito de filler e o pozolânico.

Não existindo uma dosagem predefinida Aïtcin, 1998, sugere uma adição de sílica de fumo entre 8% a 10% da massa de cimento. A introdução de maior quantidade desta adição mineral terá de ser acompanhada por maior dosagem de superplastificante com o objectivo de dispersar a sílica de fumo adicional, mas os custos inerentes à maior dosagem têm-se revelado proibitivos para este aumento, sendo que para usufruir de todas as potencialidades da sílica de fumo Aïtcin refere que a dosagem deverá situar-se entre os 25% e 30% da massa de cimento.

Segundo AFGC-SETRA, 2002, a dosagem de sílica de fumo deverá ser inferior a 10% do peso da mistura.

No fundo a utilização da sílica de fumo como constituinte do betão, torna possível o aperfeiçoamento do que é conseguido com as cinzas volantes, mas consegue atingir resistências mecânicas muito superiores, não só em idades avançadas como em idades iniciais sendo particularmente benéfico a sua utilização na indústria da pré-fabricação.

4.1.2.3 Metacaulino

É um material com características similares à sílica de fumo, apesar de as suas dimensões serem cerca de 20 a 30 vezes superiores que a anterior. Ao contrário dos outros constituintes do betão provenientes de subprodutos industriais, o metacaulino é um material produzido.

O metacaulino é um derivado do caulino, mineral fino e branco que faz parte da constituição das argilas. Para a obtenção do metacaulino, o caulino é elevado a temperaturas compreendidas entre os 600°C e os 800°C, transformando-se numa estrutura cristalina, com propriedades altamente pozolânicas, Caldarone, 2009.

Visto as suas partículas serem maiores em relação às da sílica de fumo a produção de um betão com metacaulino, requer uma menor utilização de redutores de água, para uma mesma consistência, aumentando a trabalhabilidade e diminuindo os custos inerentes da utilização de redutores de água.

A maior dimensão das partículas do metacaulino em relação à sílica de fumo, promove uma menor fissuração, permitindo um melhor acabamento da estrutura. Além disto a sua cor mais clara que a sílica de fumo permite um desenvolvimento de betões de elevado desempenho arquitectónico.

4.1.3 Água

A origem e o modo de emprego da água nos HPC, segue as mesmas regras que os betões convencionais, tendo o objectivo de a pasta de cimento ficar moldável para adaptar-se à forma dos moldes. Todas as partículas de cimento terão de ser hidratadas para garantia de um bom processo de presa.

A água utilizada na mistura não deve conter óleo, sal, ácidos, matéria orgânica e alcális. A única água que dispensa testes suplementares para poder ser incluída na mistura é a água potável.

A única diferença entre a água adicionada aos betões convencionais e aos HPC é a sua quantidade. Pretendendo-se uma quantidade mínima de água para maximizar as resistências mecânicas do betão. A relação A/C, poderá ser de metade em relação aos betões convencionais, factor permitido pela utilização de superplastificantes.

4.1.4 Adjuvantes

Os adjuvantes, são os grandes impulsionadores do aparecimento dos HPC. Sem a sua utilização e por muito que fossem melhoradas as características dos restantes constituintes do betão, a produção do HPC seria impossível. Sem a introdução destes componentes a pasta estaria à mercê do tempo de presa, da temperatura, tornando muito mais difíceis as tarefas de transporte, colocação, consolidação e acabamento. Contudo as características destes materiais e a sua reacção química com os restantes materiais envolvidos devem ser totalmente conhecidas, com o propósito de não se obter resultados indesejados.

Citando Kosmatka et al., 2002, Caldarone, afirma que factores como o conteúdo de água, a forma dos agregados, granulometria, proporções e temperatura do betão poderão influenciar o comportamento dos adjuvantes.

4.1.4.1 Superplastificantes

A quantidade de água essencial para uma amassadura deve ser aquela que permite hidratar todas as partículas do cimento com uma adequada trabalhabilidade, a água em excesso potencia a criação de pontos frágeis no aglomerado, diminuindo a compacidade do betão e a sua resistência.

Sabendo-se dos resultados indesejados, do excessivo emprego de água na amassadura, foram desenvolvidos adjuvantes redutores de água que permitissem reduzir a quantidade de água utilizada, mantendo uma boa trabalhabilidade, designadas de superplastificantes. Para a produção de betões com elevada resistência é obrigatório o uso de superplastificantes.

Segundo Teixeira e Martins, 2003, as principais funções dos superplastificantes são aumentar a resistência, diminuindo a relação A/L e mantendo a trabalhabilidade, aumentar a trabalhabilidade mantendo a relação A/L e a resistência, reduzir a dosagem de cimento

Capítulo 4:Constituição dos betões de elevado desempenho

mantendo a resistência e diminuindo a relação A/L, aumentar a durabilidade aumentando a compactidade e diminuindo a permeabilidade.

A utilização dos superplastificantes permite utilizar a quantidade mínima possível de água, aumento do tempo de presa do betão fresco e o aumento do tempo de cura o que resultará no aumento da resistência a longo prazo, já que quanto maior o tempo de cura maior serão as resistências a longo prazo.

Segundo a AFGC-SETRA, 2002, as dosagens tipicamente utilizadas situam-se entre os 0,5% e os 2% do peso do cimento contido na mistura.

No quadro seguinte é apresentado o desenvolvimento das características destes adjuvantes patenteados pela empresa Sika, ao longo dos anos

Quadro 4. 1 - Evolução dos superplastificantes, Sika, 2005

| Data | Base do produto | Gama do produto | Características |
|------|------------------------------|----------------------|---|
| 1930 | Lignosulfonato | Plastocrete | Redução da água em mais de 10% |
| 1940 | Gluconato | Plastiment | Redução da água em mais de 10% e maior retardamento |
| 1960 | | Sika Retarder, Fro-V | Retardamento e entrada de ar |
| 1970 | Naftalina | Sikament-NN | Redução da água em mais de 20% |
| 1980 | Melanina | Sikament-300/-320 | Redução da água em mais de 20%, redução do conteúdo de ar |
| 1990 | Copolímeros de Vinil | Sikament-10/-12 | Redução da água em mais de 25% |
| 2000 | Policarboxilatos modificados | Sika ViscoCrete | Redução da água em mais de 40% e tecnologia de betões auto-compactáveis |

4.1.4.2 Outros adjuvantes

A existência de adjuvantes **estabilizadoras da hidratação** permite um maior tempo de controlo, da sua hidratação, essencialmente útil para colocações de grandes extensões do betão na estrutura.

Outro tipo de adjuvantes são os **modificadores de viscosidade**, que segundo a Federação Europeia das Associações de Aditivos para o Betão, 2006, poderão ser utilizados com as

Capítulo 4:Constituição dos betões de elevado desempenho

finalidades de reduzir a segregação em betões fluidos e auto-compactáveis, a fricção e pressão em betões bombeados, compensar a pouca quantidade de finos existentes na areia utilizada, reduzir a exsudação no betão e aumentar a coesão essencialmente benéfica em betões submersos para que estes mantenham a sua integridade quando aplicados.

Os **inibidores de corrosão** são outros dos adjuvantes utilizados essencialmente em meios onde as estruturas estão expostas à acção dos cloretos, detendo a reacção de corrosão e reduzem a taxa de propagação após o começo desta.

Os **introdutores de ar** no betão fresco, permitem que a pasta de cimento ganhe trabalhabilidade, reduza a exsudação, reduza a segregação e introduza resistência à acção do gelo. Aïtcin, 1998, citando experiências de diversos autores na quantificação da resistência à compressão aos 28 dias de betões utilizados na construção de 3 pontes no Canadá, indica que a introdução de 1% de ar no betão reduz em 5% a resistência à compressão aos 28 dias do betão. Por este motivo será necessário uma dosagem extra de cimento nos betões com introdutores de ar. Aïtcin sugere uma percentagem de ar introduzida no betão entre 3,5% a 4,5%.

Os **aceleradores de presa**, reduzem o tempo de presa acrescentando resistência inicial, enquanto os **aceleradores de endurecimento** aceleram as resistências iniciais sem modificar o tempo de presa, sendo bastante aplicados na indústria da pré-fabricação.

Os **retardadores de presa** retardam o tempo de presa prolongando a consistência da pasta, usados quando é necessário longo tempo de durabilidade nomeadamente para o transporte do betão.

Os **impermeabilizantes**, reduzem a absorção capilar de água do betão endurecido.

Os **reduzidores de retracção** reduzem a tensão capilar nos poros, durante a secagem do betão, reduzindo a retracção por secagem e a microfissuração.

A introdução dos adjuvantes descritos, isolados ou complementados uns com os outros, elevará o desempenho dos betões nas propriedades que forem mais desejadas para um determinado ambiente e estrutura. Por este motivo o desenvolvimento dos superplastificantes foi um dos grandes impulsionadores dos HPC e UHPC. A norma NP EN 934-2 (2009), indica que a quantidade de superplastificante adicionado não deve ser superior a 5% da massa de cimento da mistura, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido.

4.1.5 Agregados

Segundo Nawy, 2001, os agregados ocupam um volume de 60-80% do betão e devem ser bem graduados para que a massa de betão seja homogénea, densa e sólida, em que os agregados de menor dimensão preencham da melhor forma os espaços existentes entre as partículas maiores.

A resistência do agregado no betão é um factor importante para elevar as resistências deste. Por este motivo uma má escolha poderá diminuir a capacidade resistente do betão quando sujeito a carregamentos elevados, podendo tornar-se no ponto frágil por onde será desencadeada a ruptura.

Como os HPC são betões onde se obtém normalmente resistências à compressão elevadas, este parâmetro do agregado utilizado, terá de acompanhar a resistência à compressão pretendida do HPC em fabricação. Assim agregados com maior resistência terão vantagem na inclusão nos HPC. A quadro seguinte demonstra resistências à compressão de alguns agregados, obtidos em ensaios realizados no “Laboratoire des Ponts et Chaussées”, de onde pode-se concluir que caso tivéssemos disponíveis os agregados indicados e ponderado as condições económicas da sua aquisição a melhor escolha recairia sobre os quartzitos devido à sua elevada resistência à compressão.

Quadro 4. 2 - Resistências de diversos agregados, adaptado Universidade Nova de Lisboa, 1996

| Nº de amostras | Agregado | Resistência à compressão (MPa) | |
|----------------|-----------------------|--------------------------------|--------|
| | | Mínima | Máxima |
| 3 | Basalto | 212 | 271 |
| 12 | Quartzitos | 207 | 330 |
| 10 | Pórfiros | 172 | 281 |
| 30 | Granitos | 145 | 239 |
| 7 | Calcários muito duros | 82 | 189 |
| 4 | Calcários duros | 81 | 122 |
| 3 | Calcários brandos | 28 | 46 |

Além da resistência dos agregados Bache ao longo das suas experiências na tentativa de encontrar as melhores características constitutivas do HPC, deparou-se que ao diminuir a máxima dimensão dos agregados (dimensão do menor peneiro em que num ensaio de granulometria deixa passar pelo menos 90% do material sujeito a este ensaio), elevava a resistência à compressão do betão, Aïtcin, 1998.

Capítulo 4: Constituição dos betões de elevado desempenho

Segundo Shi, Mo e Dhonde, 2008, para uma dada resistência do betão existe uma dimensão ideal dos seus agregados, sendo que em geral um tamanho reduzido deste proporcionará resistências mais elevadas, contudo a utilização de dimensões dos agregados maiores permite a obtenção de módulos de elasticidade maiores, reduzindo a retracção e a deformação do betão.

Como não é viável nem útil conhecer a dimensão de cada partícula dos agregados, a realização de ensaios granulométricos é de grande utilidade, nomeadamente o cálculo do modo de finura de um agregado, que permite ter uma noção média das dimensões das partículas. O módulo de finura de um agregado é igual à soma das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro, da série normal (série que começa no peneiro de 0,075 mm de abertura e se estende, segundo uma progressão geométrica de razão 2, até à máxima dimensão do inerte), divididas por 100. Para obter uma dimensão média do agregado, terá de se efectuar uma contagem de peneiros de acordo com o módulo de finura obtido, partindo esta contagem do peneiro mais fino.

Shi, Mo e Dhonde, 2008, citando o ACI, referem que para betões de elevada resistência o módulo de finura dos agregados deverá situar-se entre os 2,5 e 3,2. A introdução de agregados com módulo de finura inferior a 2,5 poderá causar viscosidade e causar pouca trabalhabilidade, requerendo maior introdução de água.

A empresa Sika, 2005, indica que agregados triturados com formas cúbicas e esféricas são mais adequados que os com formas alongadas. Apesar dos agregados triturados requererem um pouco mais de água devido à sua maior área de superfície, estes conseguem transmitir maior capacidade de resistência à compressão e à tracção, devido à sua melhor interligação. Já as areias de pedreiras apesar de terem formas angulosas não conduzem a uma elevada resistência e têm geralmente bastante necessidade de água.

Em suma, atendendo às várias propriedades descritas anteriormente que podem afectar o bom desempenho dos HPC e ao relatado na bibliografia internacional o quartzo, o basalto e a bauxite são três agregados muito utilizados; Aïtcin, 1998, refere ainda que o granito, sienito, diorito, gabro e o dolerito foram também utilizados com sucesso.

Contudo a escolha dos agregados não deve ter só em conta o fornecimento de boas propriedades ao HPC, mas também a verificação da existência ou não de agentes nocivos nos agregados como argila, húmus, marga, gesso, sulfatos, cloretos e metais alcalinos.

4.1.6 Fibras

As fibras vêm-se tornando um constituinte comum dos betões de elevado desempenho, permitindo a dispensa parcial ou mesmo total das armaduras passivas e incrementando resistência à tracção do betão.

Gambarova, 2004, indica três tipos de fibras adicionadas aos betões reforçados com fibras.

Fibras poliméricas – acrílicas, aramida, nylon, poliéster, polietileno e polipropileno, são usadas para evitar a fragmentação do betão a médias temperaturas (200°C a 350°C), retracções plásticas e exsudação da água.

Fibras minerais – vidro e carbono, são destinadas a fornecer resistência à tracção ao betão.

Fibras metálicas – são as mais utilizadas por variadas razões, como o controlo da retracção na secagem do betão, resistência à tracção, absorvem grande quantidade de energia quando expostas a cargas dinâmicas e são capazes de substituir parcialmente ou na totalidade as armaduras passivas.

Quanto às suas dimensões Gambarova, 2004, refere que as fibras poliméricas e de vidro são em geral longas e finas, as fibras de carbono são curtas (comprimento 3 - 12 mm), enquanto que as fibras metálicas dos dois tipos anteriormente referidos; curtas e finas (comprimento 4 - 16 mm, diâmetro 50 – 500 µm) ou longas e espessas (comprimento 30 – 60 mm, diâmetro 0,25 – 1 mm).

No quadro seguinte são enunciadas algumas características de fibras poliméricas e de carbono utilizadas em UHPC.

Quadro 4. 3 - Características de fibras poliméricas e de carbono, adaptado Conselho de Pesquisa Nacional Italiano, 2007.

| Tipo de fibra | Diâmetro equivalente (10^{-3} mm) | Densidade (g/mm^3) | Resistência à tracção (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Temperatura de combustão |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Acrílico | 12,7-104,14 | 1,16-1,18 | 269-1000 | 13790-19306 | - |
| Aramida | 10,16-11,94 | 1,44 | 2344-2930 | 62055 | Elevada |
| Carbono | 7,62-17,78 | 1,6-2.15 | 483-3999 | 151690-482650 | Elevada |
| Nylon | 22,86 | 1,14 | 965 | 5071 | - |
| Poliéster | 19,81 | 1,34-1,39 | 227-1103 | 17237 | 593 |
| Poliétileno | 25,4-1016 | 0,92-0,96 | 76-586 | 4999 | - |
| Polipropileno | - | 0,90-0,91 | 138-689 | 3447-4826 | 593 |

A dispensa das armaduras passivas com a introdução de fibras possibilita a redução das secções dos elementos estruturais, tornando as estruturas mais leves, permitindo vencer maiores vãos e economizar no custo das obras.

Ao ocorrer uma fissuração, a introdução de fibras no betão permite a transferência da carga aplicada sobre a fenda. Caso as fibras consigam sustentar a carga adicional proveniente da fissuração existente, previnem a fendilhação gerada, caso contrário a rotura dar-se-á de forma dúctil. Esta transferência de esforços é permitida pela elevada densidade de fibras existente no volume de betão, cerca de 2% é o valor usual.

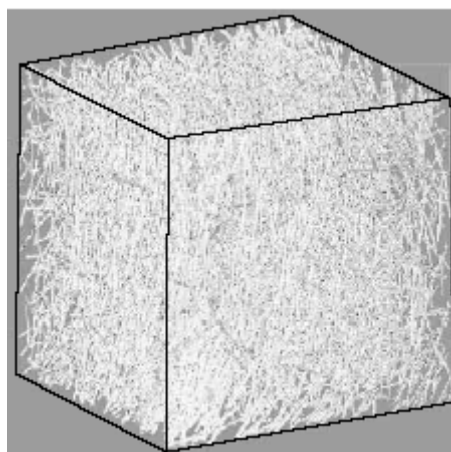


Figura 4. 2 - Densidade de fibras existente nos HPC obtida por raio- X, simulada num cubo, Acker e Behloul, 2004

Segundo Kiilu, 2002, as fibras de aço no betão previnem falhas por dois mecanismos distintos:

- Evitam o crescimento das micro-fissurações para macro-fissurações,
- Transferem o esforço actuante sobre uma fissura para evitar que esta fissura tome proporções maiores.

Segundo a Associação de Engenheiros Civis Japoneses, 2008, a transferência dos esforços deve-se ao facto de este material quando sujeito a uma tensão de deformação desenvolver várias fendas de pequena largura, não aumentando a largura destas, mas sim a sua quantidade o que contribui para uma distribuição uniforme de tensões.

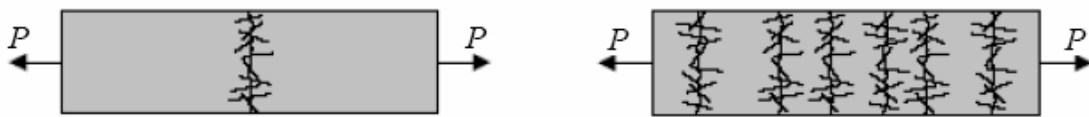


Figura 4.3 - Comparação do comportamento a um ensaio uniaxial de tracção de um betão com menor volume de fibras (<2%)(esquerda), em relação a um betão com maior volume de fibras (> 2%)(direita), Concelho de Pesquisa Nacional Italiano, 2007.

Segundo a Sika, 2005, a introdução de fibras no betão aumenta a necessidade de água, acréscimo compensado pela utilização de superplastificantes.

Não obstante as fibras estarem com maior protecção devido à menor porosidade dos UHPC quando comparadas com as armaduras passivas, estas podem sofrer alguma degradação caso fissurações possam expor as fibras ao meio ambiente, especialmente ao oxigénio e aos raios ultravioleta no caso das fibras de polímeros, no entanto segundo a AFGC-SETRA, 2002, existem produtos de protecção das fibras a estes agentes que poderão ser incorporadas na mistura.

Outro dos papéis conferidos pelas fibras aos UHPC é a resistência ao fogo, estando o UHPC classificado como um material não inflamável, que diminui a propagação do fogo, Acker e Behloul, 2004.

A baixa porosidade dos materiais evita que as pressões do vapor de água escapem em caso de incêndio, originando o fenómeno de fragmentação do material. O UHPC é um material com uma porosidade reduzida, contudo a fragmentação tem sido contornada pela introdução de fibras adequadas de origem polimérica.

As fibras ao atingirem o seu ponto de fusão, criam rotas de escape para o vapor de água aprisionado, libertando o UHPC das tensões a que estava sujeito. Segundo Gambarova, 2004, as fibras adequadas ao UHPC com necessidade de bom comportamento térmico são as poliméricas.

Da gama de UHPC DUCTAL(referida adiante), o DUCTAL-AF é tido como um UHPC com bom comportamento térmico.

Além das qualidades aos comportamentos descritos anteriormente Weiße, 2004, indica que as fibras melhoram o comportamento das estruturas de betão ao punçoamento e à torsão.

A tradicional utilização das fibras nos UHPC, criou uma nova classe destes designada de betões de ultra elevado desempenho reforçados com fibras (UHPRFC).

4.2 MÉTODO DE MISTURA DE UM BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO

A implementação de um método de mistura de um HPC não é uma implementação fácil, devido ao facto de ser difícil a criação de um método universal que inclua todos os tipos de cimento, adições minerais, adjuvantes e agregados.

O objectivo de um método de mistura é determinar uma combinação adequada e económica dos constituintes para as características do betão pretendido.

A resistência à compressão do betão é um dos parâmetros mais importantes a ter em atenção no seu fabrico e no caso dos HPC e UHPC a relevância desta medida é ainda maior devido a estes requererem um valor elevado e de este valor poder situar-se numa gama de valores com variação de cerca de 400 MPa.

A introdução de produtos de elevado custo como a sílica de fumo permite elevar a resistência dos HPC, mas o seu custo poderá constituir uma reserva na sua utilização. Assim será importante obter através de um modelo experimental com vários parâmetros envolvidos, uma optimização da composição para uma durabilidade adequada das estruturas.

O método experimental de Larrard é um método que prevê a resistência à compressão do betão através da extensão de uma fórmula, originalmente desenvolvida por Feret, nos primeiros

Capítulo 4:Constituição dos betões de elevado desempenho

tempos da tecnologia do betão. A extensão desta fórmula foi feita para betões constituídos por cimento de Portland e sílica de fumo, Aïtcin, 1998.

$$f_c = \frac{Kg \times R_c}{1 + \frac{3.1 \times w/c}{1.4 - 0.4 \exp(1.1s/c)}} \quad (4.1)$$

Onde,

- f_c , é a resistência à compressão em provetes cilíndricos aos 28 dias;
- w, c, s são a massa de água, cimento e de sílica de fumo por unidade de volume da mistura, respectivamente;
- Kg , parâmetro que depende do tipo de agregados (4,91 é aplicada usualmente à areia do rio);
- R_c , a resistência do cimento aos 28 dias.

Segundo o autor, a fórmula tem uma margem de erro de 5 MPa, quando utilizada para uma mistura com uma razão água/cimento inferior a 0,4.

A partir deste método foi desenvolvido um programa informático usado correntemente em França com o nome comercial de BETONLAB, Aïtcin, 1998 citando de Larrard, Gillet e Canitrot, 1996 e Sedran e de Larrard,1996.

Capítulo 5

VANTAGENS DE APLICAÇÃO DOS HPC E UHPC

5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Até à altura do aparecimento dos superplastificantes, era extremamente difícil reduzir a razão A/L para valores inferiores a 0,40 (mesmo utilizando os plastificantes). Com a sua utilização é possível hoje em dia obter uma razão A/L da ordem de 0,20.

Com a obtenção desta razão, foi não só possível um aumento da resistência à compressão do betão, correspondendo às preocupações até então dos construtores, mas também uma melhoria de outras qualidades do material que tornaram este mais resistente ao desgaste temporal, designando-se a durabilidade como a principal característica dos betões de elevado desempenho.

A reduzida relação A/C, diminui o número de capilares produzindo uma densa pasta de cimento. Segundo Aitcin, 1998, os HPC não possuem água suficiente para hidratar todas as partículas de cimento.

No caso de o betão fendilhar as partículas de cimento não hidratadas poderão reagir com a água penetrante contribuindo para o desagravamento das fendilhações, ao passo que em relações de A/C normais a totalidade das partículas de cimento estarão hidratadas não sendo possível preencher as fendas existentes. Este processo fornece uma capacidade de auto-cicatrização ao HPC.

O gráfico seguinte mostra a capacidade que a redução da razão A/C tem em conseguir aumentar a resistência do betão e com isso a sua durabilidade. Os resultados demonstrados foram obtidos para duas razões diferentes de A/C, empregando seis diferentes marcas de cimento do tipo I. De salientar que não foi empregue nenhum tipo de adjuvante, para realçar a relevância da razão A/C, que em regra geral a sua diminuição faz aumentar a resistência à compressão. Caso fossem bem empregues adjuvantes poderiam ajudar a elevar ainda mais as qualidades do betão.

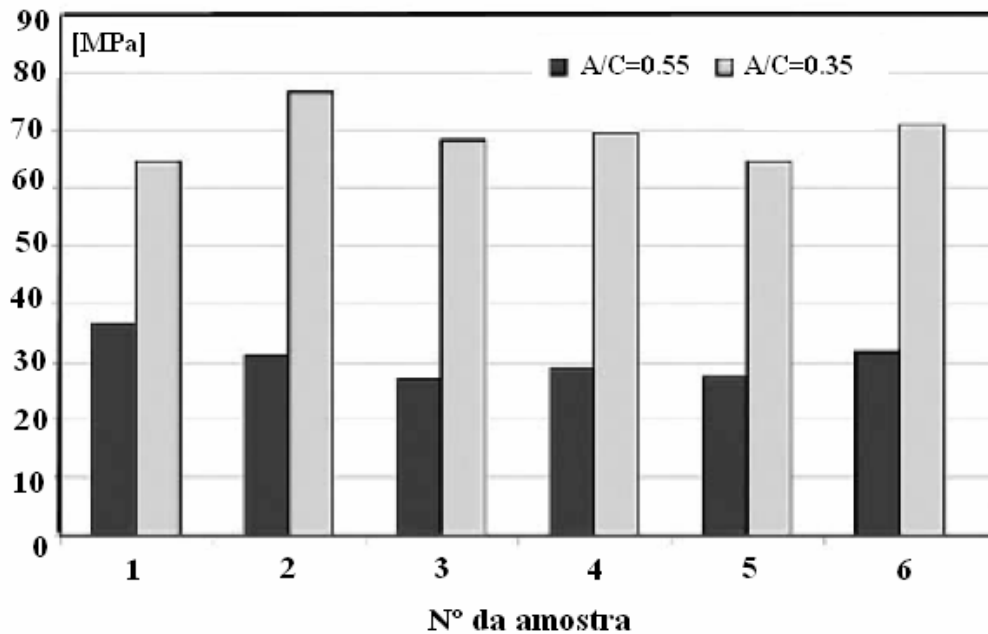


Figura 5.1 - Influência da razão A/C na resistência à compressão do betão, adaptado Caldarone, 2009

Segundo Aïtcin, 1998, com as seguintes gamas de razões A/C poderão ser atingidas as seguintes razões máximas de resistência à compressão.

Quadro 5.1 - Resistências máximas à compressão adquiridas em relação à razão A/C, Aïtcin, 1998

| A/C | Máxima resistência à compressão (MPa) |
|-----------|---------------------------------------|
| 0,4-0,35 | 50-75 |
| 0,35-0,30 | 75-100 |
| 0,30-0,25 | 100-125 |
| 0,25-0,20 | >125 |

As gamas de intervalos apresentadas são largas devido ao grande número de materiais e combinações possíveis na produção de HPC.

Outra característica importante nos HPC, é a capacidade de adquirir boas resistências iniciais motivada pelas suas adições minerais (sílica de fumo), comprovado pelo estudo realizado pela FHWA, onde no HPC ensaiado se verifica que aos 5 dias obtiveram-se cerca de 90 MPa de resistência à compressão, FHWA, 2006. Esta característica permite uma rápida reutilização das cofragens, permitindo ganho de tempo na execução da obra.

A diminuição de agregados finos diminui a água necessária no betão fresco, contribuindo deste modo para o aumento da resistência inicial.

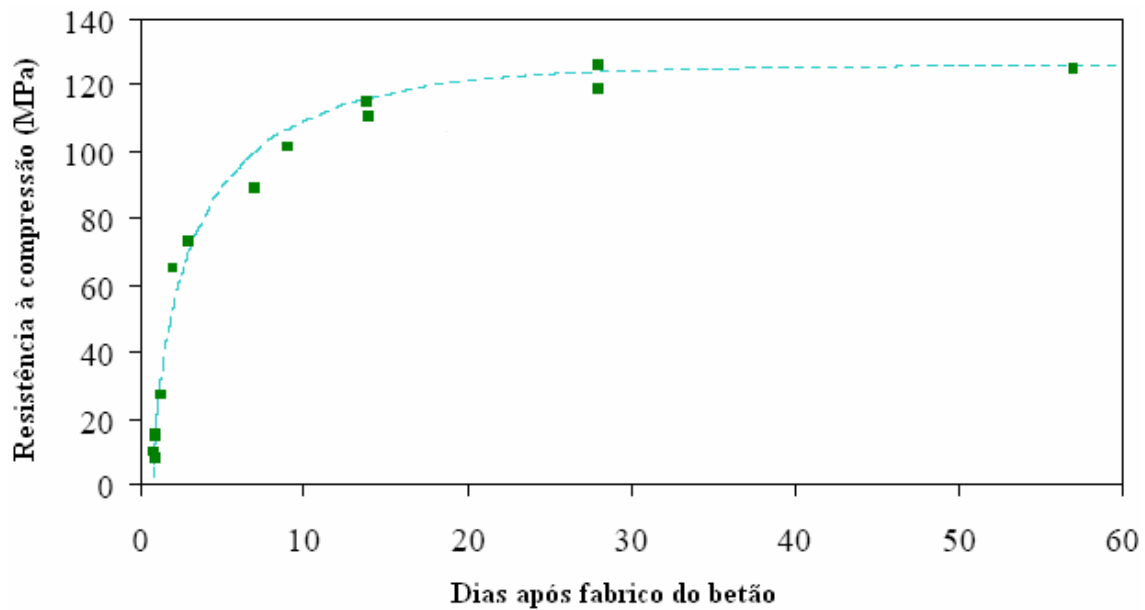


Figura 5. 2 – Aumento da resistência à compressão nos dias após fabrico do betão, FHWA, 2006

Segundo Pliskin, 1992, os HPC contêm muitas características, que os engenheiros devem aproveitar, sendo que estas capacidades provêm essencialmente da sua reduzida porosidade. Quanto menor for a porosidade, menor capacidade terão os agentes agressivos ao betão de o penetrar, aumentando a durabilidade deste.

Características dos betões de elevado desempenho:

- Resistência elevada à compressão e à tracção
- Módulo de elasticidade maior, conseqüentemente menores deformações
- Reduzida permeabilidade
- Elevada resistência à abrasão
- Elevada resistência à carbonatação
- Elevada resistência ao ataque dos cloretos e sulfatos
- Elevada resistência a ciclos de gelo-degelo
- Elevada resistência na idade inicial
- Baixa fluência e retracção
- Elevada durabilidade e tempo de vida útil em ambientes severos (polares, marítimos)
- Facilidade de colocação em obra

Com estas características, a designação de betões de elevada resistência tornou-se um tanto ao quanto incompleta, optando-se então por designar-se de betões de elevado desempenho.

Pode-se afirmar que os betões de elevado desempenho foram uma evolução dos betões de alta resistência. A expansão dos HPC foi facilitada também pelos processos de produção destes serem similares aos dos betões convencionais, apenas tendo como obrigatoriedade o emprego de superplastificantes.

5.1.1 Custos de aplicação

O custo inicial dos HPC será necessariamente maior em relação aos betões convencionais, desde logo na sua produção onde terá necessariamente de existir um esforço redobrado na preparação destes, pois erros de produção poderão por em causa a durabilidade futura do mesmo. Nas obras actuais de grandes dimensões, onde se espera um tempo de vida útil (120 anos aproximadamente nas estruturas de UHPC) sem grandes reparações de vulto, uma falha na produção do HPC que coloque em causa esta durabilidade poderia ter consequências gravosas.

Existe a dificuldade natural de perceber a importância da qualidade inicial e da realização de ensaios para verificar a qualidade do HPC, já que só se verifica a durabilidade a longo prazo. Contudo se este primeiro passo de produção for bem executado, serão economizados elevados custos de reparação ou mesmo de substituição que compensarão o investimento realizado inicialmente.

Os custos iniciais dos HPC e UHPC são mais elevados, devido às empresas não estarem optimizadas com alguns dos seus processos produtivos e devido ao elevado custo dos seus constituintes, estando nesta data o seu custo estimado em 10 vezes superior ao betão convencional. Prevê-se que com o uso mais abundante deste tipo de betões nas construções, os custos da sua produção possam diminuir e que os HPC e UHPC possam ao fim do seu tempo de vida justificar o seu emprego financeiramente. A figura apresentada pela Lafarge ilustra esta esperança.

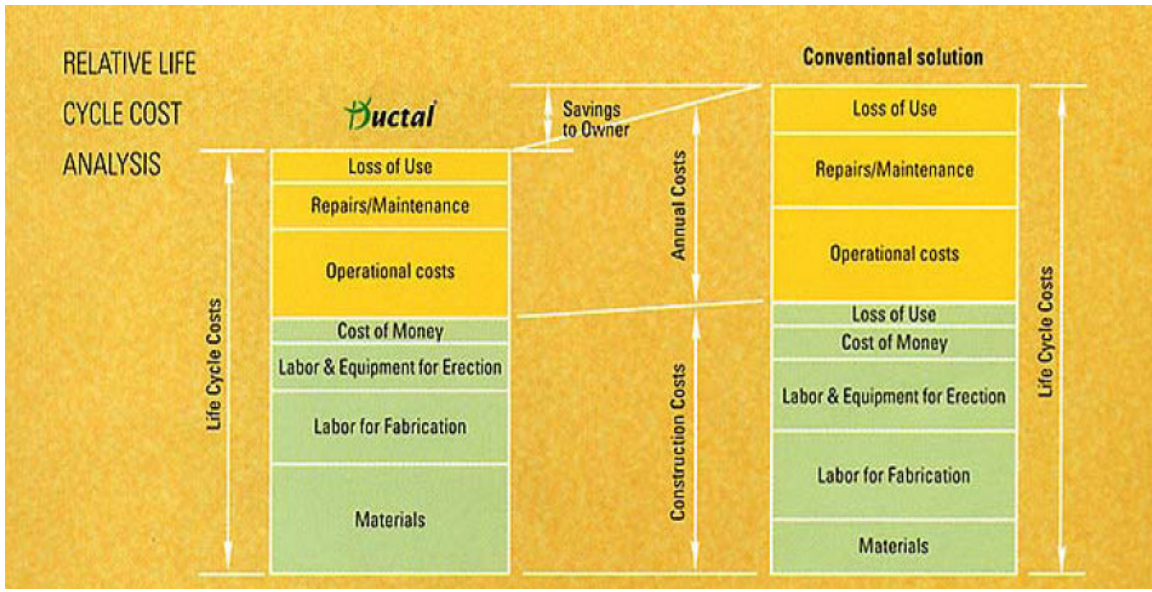


Figura 5.3 - Economia futura de custos dos UHPC em relação ao betão convencional, sítio da Lafarge

5.2 APLICAÇÃO ESTRUTURAL

A utilização deste material tem-se vindo a alargar nos mais diversos tipos de estruturas de betão armado. Estruturas impressionantes têm sido construídas, tendo-se no entanto economizado nos seus custos de obra.

O quadro seguinte ilustra de um modo resumido algumas das vantagens de aplicar HPC e UHPC em diversas estruturas, que adiante algumas delas serão demonstradas em obras realizadas.

Quadro 5. 2 - Aplicações dos HPC e UHPC, adaptado Yves Malier, 1992

| Tipos de estrutura | Propriedades melhoradas |
|---------------------------|---|
| Estruturas offshore | Durabilidade, trabalhabilidade, abrasão |
| Pontes | Trabalhabilidade, durabilidade, controlo das deformações, resistências iniciais elevadas |
| Edifícios altos | Elevada resistência à compressão, trabalhabilidade, resistências iniciais elevadas |
| Túneis | Durabilidade, elevada resistência à compressão, resistências iniciais elevadas |
| Estradas | Abrasão, gelo-degelo, durabilidade, trabalhabilidade |
| Estruturas pré-fabricadas | Resistências iniciais elevadas, trabalhabilidade |
| Drenagem | Durabilidade, abrasão, elevada resistência à compressão, trabalhabilidade |
| Fundações especiais | Elevada resistência à compressão, trabalhabilidade, resistências iniciais elevadas, deformações diferidas |

5.2.1 Edifícios

Segundo Hájek e Fiala, 2008, a utilização de HPC e UHPC nos edifícios tem as seguintes vantagens:

- A elevada resistência mecânica do material promove a construção de elementos estruturais mais leves e esbeltos,
- Permite maiores vãos nas estruturas e suporte de cargas de maior valor,
- Devido à elevada densidade do material requer menos manutenção podendo ser utilizado em ambientes agressivos, como nos pólos, ambientes marítimos, com extrema poluição e desertos,
- Os elementos estruturais mais leves transmitem menores cargas para os elementos de suporte como paredes, pilares e fundações levando à redução das dimensões destes,
- Além dos elementos estruturais serem mais resistentes, podem ser mais dúcteis devido à introdução das fibras no HPC, tornando a estrutura mais resistente no caso de sismos ou outros casos excepcionais.

5.2.1.1 Construção em altura, pilares

Uma das principais aplicações dos HPC, que é uma herança dos HSC é a aplicação nos pilares de edifícios de altura elevada. A maior capacidade de resistência à compressão permite que estes betões suportem uma determinada carga com uma menor secção em relação ao que seria necessário com a utilização de um betão convencional. Com esta redução de área é permitido uma maior disponibilidade de espaços.

A utilização dos HPC e a contínua evolução das tecnologias destes permitiu a evolução da envergadura dos edifícios, como é demonstrado no seguinte gráfico.

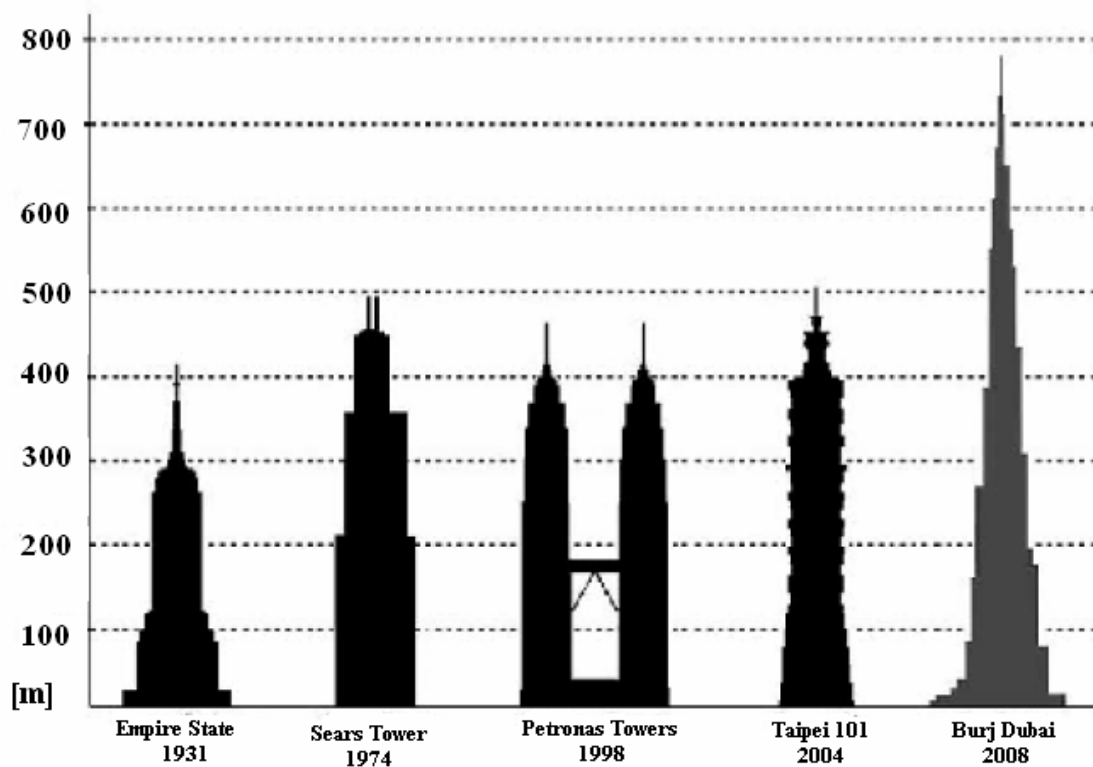


Figura 5. 4 - Avanço em altura com implementação de HPC com elevada resistência, adaptado Caldarone, 2009

A construção de edifícios como o Burj Dubai (2008) actualmente o edifício mais alto do mundo, seria muito dificultada sem a utilização de um HPC com elevada resistência. Antes do aparecimento dos HPC, a solução implementada para a construção de edifícios altos, era a utilização de aço, material com boa resistência tanto à tracção como à compressão, só com pouca durabilidade sem um revestimento. A utilização do aço para a construção de um edifício

da envergadura do Burj Dubai, encarecia de uma forma excessiva tornando proibitiva a construção deste.

5.2.1.2 Vigas

Em relação às vigas, a necessidade de uma menor quantidade de material utilizado, devido à possível dispensa parcial ou total das armaduras passivas devido à introdução de fibras, faz com que estas sejam mais esbeltas, permitindo vencer uma maior dimensão de vão, economizando no número de apoios necessários.

Todas estas alterações resultam numa diminuição do peso próprio da estrutura.

Note-se na figura seguinte como a dimensão da viga constituída por UHPC (DUCTAL) aproxima-se da viga de aço, material bastante usado para vencer grandes vãos.

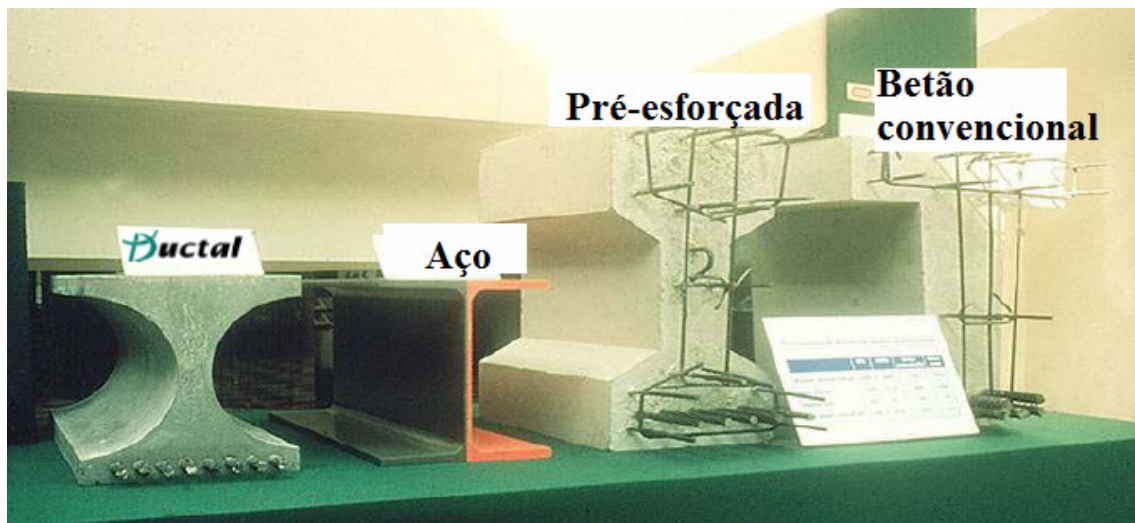


Figura 5.5 - Comparação das dimensões da viga de UHPC em relação a viga equivalente de aço, betão pré-esforçado e betão convencional, Harris, 2010

Quadro 5.3 - Razão entre a massa das restantes vigas em relação à viga de aço, Harris, 2010

| Razão da massa das vigas em relação à viga de aço | | | |
|---|-----|---------------------|--------------|
| DUCTAL | Aço | Betão pré-esforçado | Betão armado |
| 1,3 | 1 | 4,2 | 4,7 |

Note-se pela análise do quadro que para uma mesma capacidade de resistência à flexão o UHPC (DUCTAL), consegue-se aproximar muito do peso do aço, material de excelência no comportamento à flexão. Este factor poderá tornar mais rentável economicamente a utilização do UHPC em substituição do aço.

5.2.1.3 Coberturas

O uso de UHPC em coberturas permite a diminuição do peso próprio destas, mantendo competitivas em termos económicos as coberturas de betão em relação às de aço.

A utilização do UHPC poderá ser útil não só para o aumento das dimensões das coberturas sem aumentar o peso destas e fornecendo maior capacidade de armazenamento de cargas. O facto de as coberturas estarem especialmente sujeitas a todo o tipo de agressões exteriores, a sua durabilidade irá ser amplificada. Segundo Perry e Zakariasen, 2003, os vãos das coberturas constituídas por UHPC poderão ultrapassar os 20 metros de vão.

5.2.1.4 Paredes finas

A capacidade de construção de paredes com espessuras mais finas em virtude da sua maior resistência à compressão reproduzindo o efeito de paredes de gesso (bom isolador acústico), fornecendo ainda superior capacidade de defesa à corrosão e ao impacto.

Segundo Monai e Schnabl, 2008, é possível a construção de paredes de pequenos edifícios com 3 cm de espessura, dimensão que é aplicada em pequenos edifícios austríacos o que reduz de forma significativa o peso próprio da estrutura.



Figura 5. 6 - Construção de pequeno pavilhão com paredes de UHPC de 3 cm de espessura, Monai e Schnabl, 2008

5.2.1.5 Reabilitação

As intervenções de reparação de estruturas, são um processo que envolve custos e interrupções do funcionamento da estrutura indesejados. Assim as estruturas do futuro requerem o mínimo de intervenções possíveis com o menor tempo de suspensão do funcionamento desta.

Segundo Brühwiler e Denarié, 2008, a aplicação do UHPC composto por fibras designado por estes autores de betão de ultra elevado desempenho reforçado por fibras (UHPRFC), é um bom material para intervenções de reabilitação, em substituição das já usualmente utilizadas chapas metálicas ou reforço com o betão tradicional.

As estruturas após intervenção de reabilitação ficam com um misto de betão convencional com UHPRFC. O UHPRFC é utilizado apenas nas fracções sujeitas a reforço, pois estas zonas são as mais susceptíveis a ataques exteriores ou rotura devido ao carregamento por estarem danificadas.

O UHPRFC pode ser aplicado com uma camada fina de revestimento impermeável, substituindo as membranas à prova de água ou combinado com armaduras passivas, caso a intervenção seja para resistência a carregamentos.

5.2.1.6 Ambientes agressivos

A aplicação destes betões em ambientes particularmente agressivos, como por exemplo ambientes marítimos, de elevada poluição, desertos e ambientes polares deve-se ao facto dos HPC se recorrerem de outras características que não apenas a sua resistência à compressão. Estas características são particularmente importantes quando estão em causa infra-estruturas próximas do ambiente marítimo ou polar.

O facto da sua utilização melhorar a durabilidade das estruturas nestes meios está associada a ser um betão com menos poros dificultando a entrada de agentes nocivos.

Em ambientes de extracção de matérias-primas para produção de energias renováveis, é quase certa a existência de agentes agressores. A protecção das condutas cilíndricas de extracção destes produtos situados em poços contendo água é uma das soluções para auxílio destas em relação ao ataque à corrosão e ao mesmo tempo reforçar a robustez das condutas que possam

estar degradadas devido à corrosão. Em estruturas offshore os HPC também executam esta função.

5.2.2 Pontes

As pontes por serem estruturas de difícil reparação e devido ao grande transtorno causado aos seus utilizadores durante a sua reparação são estruturas que podem beneficiar em larga escala com a introdução de materiais com maior durabilidade como o UHPC.

A elevada resistência dos UHPC combinada com a elevada durabilidade que as estruturas compostas por este adquirem, potencia os UHPC para o seu uso em pontes. As primeiras pontes com a utilização de alta resistência nos seus betões foram construídas para a rede ferroviária japonesa em 1973. As razões para a utilização de um HPC, prenderam-se com reduções da carga permanente, aumento da resistência à tracção por flexão, vibrações e uma maior durabilidade prevendo contenção de custos na sua reparação.

A FHWA, 2006, define os seguintes critérios mínimos a ser cumpridos pelos HPC, para utilização destes em pontes.

- Razão máxima A/C de 0,35
- Resistência mínima de compressão de 21MPa às 4 horas
- Resistência mínima de compressão de 34MPa às 24 horas
- Resistência mínima de compressão de 69MPa aos 28 dias

A utilização dos UHPC em pontes tem em vista, segundo Calderone, 2009, a melhoria de uma ou da combinação dos seguintes atributos mecânicos: aumento do vão da ponte, aumento do espaçamento entre vigas e diminuição da espessura das secções.

Segundo Harris, 2004, a utilização de UHPC em pontes permite estruturas mais leves, secções transversais menores, maiores vãos e uma menor manutenção. A construção de estruturas mais leves resulta directamente numa diminuição da quantidade de material utilizado, tendo vantajosos benefícios para o ambiente, numa época em que as questões ambientais são debatidas em grande escala.

Na figura seguinte é apresentado um modelo tradicional totalmente em betão armado empregue em muitas pontes onde existe uma utilização conjunta de veículos e peões (esquerda), enquanto na figura da direita as vigas em caixão continuam a ser constituídas de betão armado só que a passagem pedonal encontra-se suspensa por cabos de aço num nível inferior. Este facto é possível pela constituição da passagem de peões ser de UHPC tornando estas placas com dimensões de 4 m de largura por 6 m de comprimento, suficientemente leves para estarem suspensas, sendo o seu peso de 4,5 ton cada.

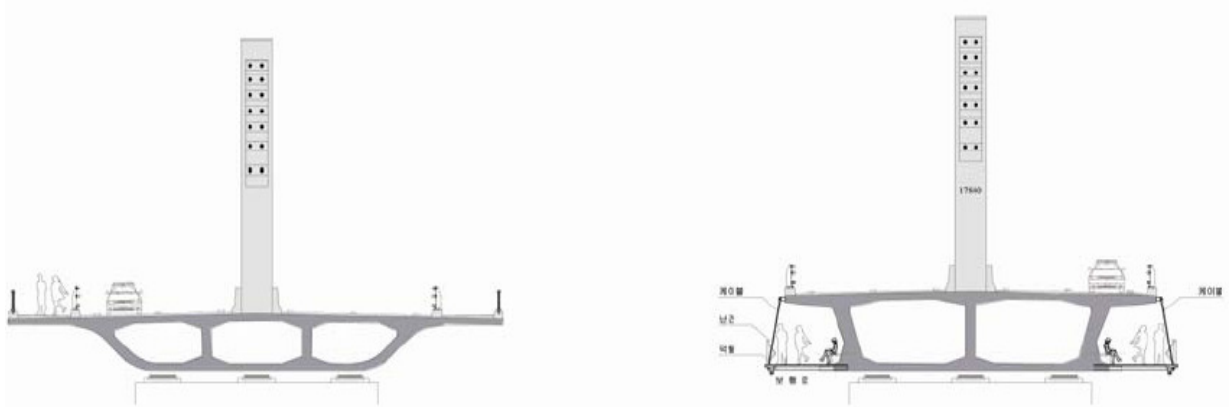


Figura 5. 7 – Representação esquemática da ponte Gyeongjae, à esquerda estrutura comum, à direita estrutura com passeio pedonal de UHPC suspenso, Reberntrost e Wight, 2008

Em estudos comparativos efectuados por Almansour e Lounis, 2008, entre a utilização de HPC e UHPC, foram ensaiadas duas pontes rodoviárias idênticas constituídas pelos materiais referidos, obtendo-se um peso global da estrutura ensaiada constituída por UHPC de menos 32%. Para esta redução de peso da estrutura, contribuiu de forma significativa as capacidades mecânicas do UHPC, pois não foi necessária a utilização do mesmo número de vigas utilizadas na ponte ensaiada com HPC e além disso foi possível reduzir as dimensões das vigas da ponte constituída por UHPC.

Segundo a Lafarge, empresa produtora do DUCTAL um dos UHPC mais comercializados nos Estados Unidos da América, as vantagens de aplicação do UHPC em pontes são as seguintes:

- Durabilidade
- Ductilidade (resistência à continua flexão nos apoios)
- Soluções mais leves, nomeadamente quando comparadas com o aço
- Grandes vãos com espessuras reduzidas
- Estabilidade dimensional
- Aumento do tempo de vida útil

- Soluções estéticas
- Rapidez de construção
- Reduzida manutenção
- Resistência à tracção por flexão

Algumas das características a cima referidas, devem-se ao facto dos UHPC terem na sua composição fibras possibilitando a diminuição das armaduras passivas introduzidas ou mesmo a dispensa total destas. As fibras adicionadas ao UHPC, conseguem transmitir capacidade equivalente de resistência à tracção e comportamento dúctil após fissuração fornecida pelas armaduras passivas dos betões convencionais.



Figura 5. 8 - Laje (1,8 m x 3 m), constituída por UHPC de 25 mm de espessura suportando um automóvel, Harris, 2010

Esta solução contribui para secções com espessuras reduzidas, permitindo vencer maiores vãos, retirar peso à estrutura, a liberdade de implementação de um design mais inovador implementando novas secções transversais

Na figura seguinte é ilustrada a elevada capacidade de resistência à tracção por flexão do UHPC, quando comparado com o betão convencional. Verifica-se uma resistência à flexão cerca de 5 vezes superior em relação ao betão convencional, o que é bastante útil para os vãos das pontes por estarem constantemente solicitadas à tracção por flexão.

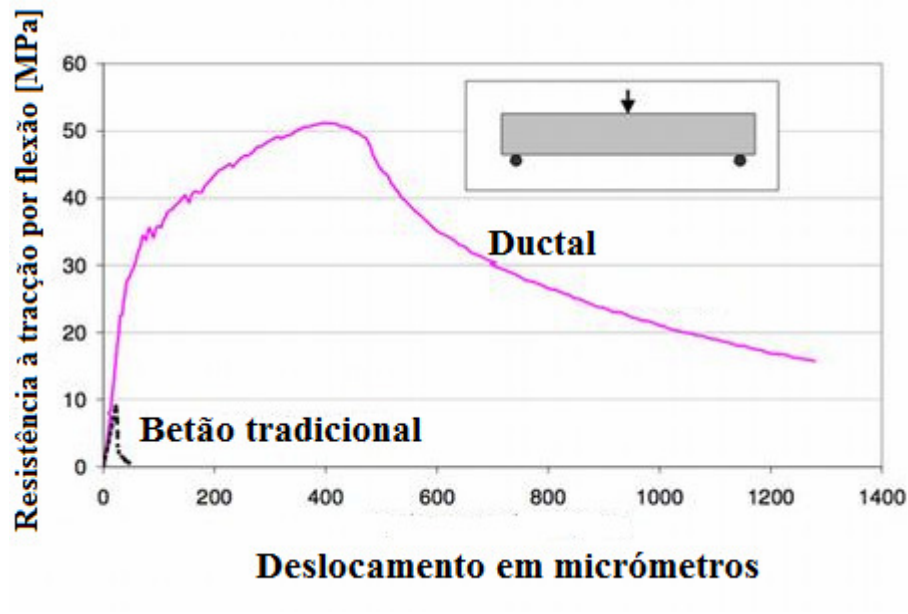


Figura 5. 9 - Comparação do comportamento à flexão do UHPC (DUCTAL) com o betão convencional, sítio da Lafarge

Os arquitectos das pontes pedonais obtiveram uma nova forma de liberdade para criação destas, podendo dar maior liberdade estética, que com o betão tradicional não era possível. As pontes pedonais podem ter uma maior liberdade de design em relação às rodoviárias porque ao contrário das últimas não são sujeitas a esforços tão elevados na sua vida útil.



Figura 5. 10 - Ponte de Sherbrooke, Canadá, primeira ponte construída em UHPC, tabuleiro com 3 cm de espessura, sítio da Lafarge

Os possíveis custos de manutenção estariam em grande parte relacionados com a protecção das armaduras degradadas pela sua corrosão, o que faz que com a não inclusão de armaduras passivas, este problema deixe de existir.

5.2.2.1 Pré-fabricação

A qualidade de controlo requerida na fabricação do UHPC é mais adequada na indústria da pré-fabricação, permitindo uma standardização de produção de secções e com os elementos como cinzas volantes e adjuvantes típicos dos betões de elevado desempenho poderem elevar as resistências em idades iniciais, tornam esta indústria aliciante para o desenvolvimento do material.

O ganho de resistências elevadas dos UHPC em tenra idade, torna possível a rápida aplicação deste em obra, permitindo uma produção económica em série.

Segundo a universidade de Memphis, a elevada resistência em idades iniciais num betão pode ser obtida segundo a utilização de um ou da combinação dos seguintes pontos:

- Utilização de cimento do tipo III ou cimento de elevada resistência inicial
- Elevado conteúdo de cimento (400 a 600 kg/m³)
- Baixa razão água/cimento
- Adjuvantes
- Adição de sílica de fumo ou outros materiais cimentícios

A resistência inicial elevada associada à redução do peso próprio, facilidade de instalação e maior longevidade, resulta numa boa solução, a implementação de elementos pré-fabricados em pontes rodoviárias e pedonais em substituição dos elementos fabricados “in situ” com o betão armado convencional.



Figura 5. 11 - Viga em “ π ”, pré-fabricada com 15 m de comprimento e 3 m de largura para aplicação em pontes pedonais, Monai e Schnabl, 2008

Com a quantidade de tráfego cotidiano que usufrui dos serviços das pontes em muitas cidades do mundo, a interrupção destas para motivo de reparação provoca graves transtornos à circulação rodoviária. Assim várias pontes em todo o mundo usufruíram desta mais valia do UHPC (elevada resistência em idades iniciais), para manter os serviços mínimos na reabilitação das pontes, servindo-se do tabuleiro antigo e de elementos pré-fabricados.

Vários tipos de ligações de painéis pré-fabricados têm sido utilizados como por exemplo através de pré-esforço interno introduzido nos painéis para ligação destes em algumas pontes por todo o mundo.

Kobler e Sobek 2008, sugerem outros tipos de ligações como por exemplo através de parafusos de alta resistência pré-esforçados ou com o preenchimento do espaço entre os painéis pré-fabricados, com fibras metálicas de ligação, betonadas com UHPC.

Um dos UHPC desenvolvido com a finalidade de estabelecer esta ligação foi o DUCTAL JS1000 (irá ser descrito mais adiante).

Além dos painéis outros elementos como vigas poderão ser pré-fabricados para uma construção mais eficaz e com menor interrupção dos serviços das pontes

Nos Estados Unidos foi desenvolvido um protótipo de viga pré-esforçada em UHPC para viadutos de auto-estradas pela FHWA. Esta viga permite uma redução do peso próprio em cerca de 30%, quando comparada com as vigas anteriormente utilizadas. Realce para a reduzida espessura do seu tabuleiro aproximadamente de 7,8 cm.

Ao mecanizar a produção deste protótipo, os custos de produção e o tempo de interrupção das pontes americanas será reduzido, permitindo a sua substituição durante a noite, período onde o tráfego é menor.

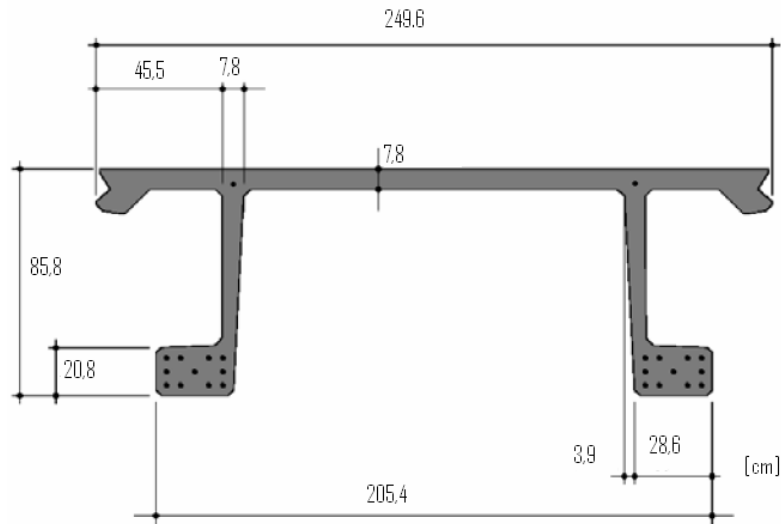


Figura 5. 12 - Viga protótipo em UHPC desenvolvida pela FHWA, adaptado Ulm e Acker, 2008

O desenvolvimento da pré-fabricação do UHPC foi mais visível em pontes, contudo outros elementos para outras estruturas também foram adoptados, como painéis de fachadas exteriores, elementos de cobertura, vigas pré-esforçadas, entre outros.

5.2.3 Substituição do cimento por produtos sub industriais – vantagem ambiental

Um HPC pode ser produzido sem adições minerais, apenas com o ligante cimento, porém a substituição do cimento por adições minerais pode ser vantajosa economicamente, em termos das características do material e por motivos ambientais.

Um desenvolvimento possível no futuro dos HPC será o emprego de maior quantidade de subprodutos industriais em substituição do cimento, o que irá contribuir da melhor forma para a expansão deste produto no mercado, visto que tornará a construção mais sustentável, aumentando a qualidade do produto utilizado.

Destas adições, destacam-se em Portugal a sílica de fumo proveniente do fabrico do silício e do ferrosilício e as cinzas volantes provenientes da combustão do carvão nas centrais termoeléctricas.

Estes subprodutos industriais serão acumulados em silos se não for dado um novo rumo à sua utilização o que trará despesas de armazenamento, problemas ambientais e paisagísticos.

Com a aplicação destes subprodutos nos HPC, dá-se um destino a estes, obtendo-se melhorias dos HPC e seguindo uma linha construção sustentável.

Esta alteração terá sobretudo em mente uma preocupação ambiental visto que, Azevedo, 2002, citando Malhotrapor indica que a produção de uma tonelada de cimento liberta para a atmosfera aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono (CO_2) e o ritmo acentuado de construção verificado nos últimos tempos faz prever a escassez de recursos no futuro. Além disso a substituição do cimento por estes produtos permite melhorias a nível da resistência do betão, trabalhabilidade, permeabilidade, abrasão e durabilidade, associando-se assim o útil ambiental à melhoria da qualidade do material. Segundo Mehta, 2008, 50% a 70% da massa do clínquer presente no cimento de Portland pode ser substituída por produtos sub industriais.

Contudo o custo elevado dos produtos acima referidos, especialmente da sílica de fumo onde o seu valor está estimado em 10 vezes mais que o valor do cimento faz com que o HPC, seja geralmente aplicado a estrutura sujeitas a meios particularmente agressivos e obras especiais. De notar que para a obtenção do UHPC o emprego da sílica de fumo é normalmente exigido.

Em contrapartida a utilização destes produtos mais dispendiosos torna o UHPC com capacidade de resistência à compressão maior, sendo possível a construção de edifícios mais esbeltos com menor utilização de material. Ao mesmo tempo os edifícios tornam-se mais duráveis devido à densidade do material.

Estruturas mais esbeltas → menor material consumido → menores emissões no transporte dos materiais → menor impacto ambiental

Hájek e Fiula, 2008, compararam as emissões de CO_2 para atmosfera na produção de diversos materiais, entre eles o betão tradicional, UHPC e o aço. Os valores de CO_2 emitidos por cada componente da mistura de betão foram retirados por Hájek e Fiula, 2008 a partir da “Okologischer Bauteilkatalog” uma das pesquisas mais utilizadas sobre o tema.

Foram elaboradas as seguintes composições de betão tradicional e de UHPC, tendo Hájek e Fiula, 2008 seguido a constituição de Teichmann e Schmidt.

Quadro 5.4 - Composição dos betões ensaiados, Hájek e Fiula, 2008

| Constituintes (kg/m ³) | Tipo de betão | |
|------------------------------------|---------------|------|
| | C30/37 | UHPC |
| Cimento | 370 | 733 |
| Pó quartzo | - | 183 |
| Areia/gravilha de quartzo | 1800 | 1008 |
| Água | 170 | 161 |
| Sílica de fumo | - | 230 |
| Fibras de aço | - | 75 |

A energia dispendida e as emissões de dióxido de carbono na produção unitária de betão tradicional, UHPC e aço revelaram-se as seguintes.

Quadro 5.5 - Parâmetros ambientais emitidos no fabrico dos materiais discriminados, segundo dados de Teichmann e Schmidt, adaptado Hájek e Fiula, 2008

| Tipo de material | Energia verificada (MJ/kg) | Emissões de CO ₂ verificadas (kg CO ₂ /kg) |
|--------------------------|----------------------------|--|
| Betão tradicional C30/37 | 0,80 | 0,130 |
| UHPC | 1,44 | 0,239 |
| Aço | 13,00 | 0,800 |

Pelos dados da tabela verifica-se facilmente que a produção do UHPC por unidade será mais prejudicial para o ambiente, no entanto com a sua utilização as estruturas poderão ser mais esbeltas levando a uma menor utilização de material reduzindo as emissões de CO₂.

Capítulo 6

ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE PATENTEADOS

6.1 CONSTITUIÇÕES GERAIS DOS HPC E UHPC

O desenvolvimento da indústria dos betões tem sido contínua ao longo dos anos, tendo várias empresas desenvolvido os seus próprios betões.

Neste capítulo serão apresentados alguns UHPC patenteados e para uma melhor visualização entre as diferenças entre o HPC e UHPC é apresentado no quadro seguinte, os seus constituintes típicos.

Quadro 6. 1 - Comparação da constituição do UHPC e HPC, adaptado Harris, 2004

| Material | UHPC ¹ (kg/m ³) | HPC ² (kg/m ³) |
|---------------------|---|--|
| Cimento de Portland | 711,6 | 445,936 |
| Agregados grossos | 0 | 990,903 |
| Areia fina | 1019,96 | 800,55 |
| Sílica de fumo | 231,27 | 44,475 |
| Grãos de quartzo | 210,515 | 0 |
| Superplastificante | 30,7174 | 0 |
| Fibras de aço | 155,959 | 0 |
| Acelerador de presa | 29,9465 | 0 |
| Redutor de água | 0 | 6,13 [L/m ³] |
| Introdutor de ar | 0 | 0,20 [L/m ³] |
| Retardador de presa | 0 | 0,74-0,89 [L/m ³] |
| Água | 109,112 | 139,355 |

1-Composição efectuada por Graybeal e Hartmann, 2003, para fins comparativos

2-Mistura utilizada na ponte Virgínia Avenue

Note-se a não utilização de superplastificante no caso do HPC, mas o seu uso é de carácter imprescindível para o UHPC. A grande diferença na quantidade de sílica de fumo, adição bastante importante para ganhos de resistência assim como os grãos de quartzo mineral.

Também para ganhos de resistência é utilizado maior quantidade de cimento no UHPC, mesmo assim a água incluída é inferior o que faz com que a razão A/C seja baixa, contribuindo deste modo para um aumento da impermeabilidade.

Para uma mistura mais compacta, o UHPC tem o contributo de agregados de menor dimensão, como os grãos de quartzo (por vezes quartzo em pó) e areia fina (em maior quantidade que nos HPC), não contemplando agregados grossos que deixariam maiores espaços na mistura.

Normalmente a adição de fibras está reservada ao UHPC e a estruturas de maior envergadura.

Ajduvantes como aceleradores e retardadores de presa, introdutores de ar, redutores de água, têm as suas funções especificadas no capítulo dos materiais constituintes, variando a sua introdução e quantidade conforme as características pretendidas.

Importa referir que para adquirir as características apresentadas pelos UHPC, a quase totalidade dos fabricantes utiliza um tratamento de cura em água quente ou vapor de água realizado nos locais de produção a uma temperatura de 90°C, num período não inferior a 48 horas. Este tratamento tem o efeito de reduzir as deformações, permitindo que a retração do material ocorra praticamente na totalidade durante esta fase e permite um aumento da resistência à tracção e à compressão em cerca de 10% em relação ao obtido aos 28 dias, AFGC-SETRA, 2002.

6.1.1 DUCTAL

O UHPC DUCTAL reforçado com fibras é um dos UHPC mais comercializados nos Estados Unidos da América fornecido pela empresa francesa Lafarge.

A sua fabricação rege-se pelo princípio de minimizar potenciais aspectos que degradem o material, nomeadamente a micro fendilhação e espaço entre os poros. Com a redução para valores mínimos dos aspectos referidos, a durabilidade será incrementada.

Capítulo 6: Ultra high performance concrete patenteados

Segundo os seus produtores este UHPC fornece uma resistência à compressão 6 a 8 vezes superior aos betões tradicionais e uma resistência à tracção 10 vezes superior aos betões comuns.

No quadro seguinte são apresentadas algumas características que comprovam a sua impermeabilidade em comparação aos betões convencionais e aos HPC.

Quadro 6. 2 - Comparação das características de durabilidade dos diferentes betões, sítio da Lafarge

| Características | Betão convencional | HPC | DUCTAL (UHPC) |
|--|---------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Acessibilidade da água nos poros (%) | 12-16 | 9-12 | 1,5-6 |
| Conteúdo de Portlandite (hidróxido de cálcio) (kg/m ³) | 76 | 86 | 0 |
| Profundidade de carbonatação (mm) | 10 | 2 | <0,1 |
| Permeabilidade ao oxigénio (m ²) | 10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹⁷ | <10 ⁻¹⁹ |

Os valores obtidos para as características enunciadas significam num aumento significativo da durabilidade do DUCTAL, em relação aos betões comparados.

O DUCTAL tem vários tipos de composição, dependendo da finalidade da sua aplicação. Uma constituição típica é a indicada no quadro seguinte.

Quadro 6. 3 - Constituição típica do DUCTAL, Dallaire et al., 1998

| Material | Quantidade (kg/m ³) | Percentagem por peso (%) |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Cimento de Portland | 705 | 27,6 |
| Areia | 1010 | 39,5 |
| Sílica de fumo | 230 | 9,0 |
| Grãos de quartzo | 210 | 8,2 |
| Superplastificante | 17 | 0,7 |
| Fibras de aço | 190 | 7,4 |
| Água | 195 | 7,6 |

As fibras utilizadas poderão ser metálicas (DUCTAL-FM), geralmente utilizadas para aplicações em estruturas que requerem um alto desempenho; de material orgânico (DUCTAL-FO), onde o seu uso é adoptado em estruturas a que é dada mais importância à aparência estética do que à robustez ou uma combinação dos dois anteriores (DUCTAL AF).

Capítulo 6: Ultra high performance concrete patenteados

A mistura é determinada com base numa optimização granular, permitindo um betão finamente graduado, altamente homogéneo e muito impermeável. No quadro seguinte são indicados os diâmetros dos constituintes do DUCTAL.

Quadro 6. 4 - Diâmetro dos constituintes do DUCTAL, sítio da Lafarge

| Material | Diâmetro (µm) |
|---------------------|---------------|
| Cimento de Portland | 15 |
| Areia fina | 150-600 |
| Sílica de fumo | 10-15 |
| Quartzo triturado | 10 |

As fibras de aço introduzidas ocupam no mínimo 2% do volume com um diâmetro de 0,2 mm e um comprimento de 13 mm.

A razão A/C nos produtos DUCTAL situa-se entre os 0,20 e 0,26 dependendo da sua aplicação.

Algumas das características mecânicas e de aferição da durabilidade do DUCTAL, são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 6. 5 - Características do DUCTAL, Gowripalan e Gilbert, 2000

| Características DUCTAL | Escala |
|--|-----------------------|
| Resistência à compressão (MPa) | 180-230 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 50-60 |
| Resistência à tracção por flexão (MPa) | 40-50 |
| Difusão de iões cloreto (m^2/s) | $0,2 \times 10^{-12}$ |
| Profundidade de penetração da carbonatação (mm) (valor de referência máximo) | <0,5 |
| Resistência ao gelo-degelo (após 300 ciclos) | 100% |
| Conteúdo de ar aprisionado | 2-4% |
| Encolhimento pós-cura | 0 |
| Coefficiente de deformação | 0,2-0,5 |
| Densidade (t/m^3) | 2,44-2,55 |

Realce para a alta resistência à compressão que o DUCTAL é capaz de atingir. O módulo de elasticidade elevado que conduzirá a menores deformações, a baixa velocidade de difusão de iões cloreto o que demonstra boa capacidade de utilização deste UHPC em zonas marítimas. A baixa profundidade de carbonatação (<0,5 mm) é garante da protecção das armaduras, visto que os recobrimentos usuais utilizados nos elementos estruturais de betão armado andam na ordem dos 30 mm em grande parte das estruturas. Seria um bom betão para zonas de formação de gelo, visto que segundo o fabricante possui total resistência a este fenómeno.

A gama de cores do DUCTAL varia entre o cinzento claro e o preto.

6.1.1.1 DUCTAL JS1000

Sendo as juntas de dilatação um dos pontos críticos das pontes, a empresa Lafarge desenvolveu um UHPC para colmatar este problema designado DUCTAL JS1000. Este produto além de conter todas as qualidades descritas do DUCTAL comum, desempenha um bom papel nas juntas de pontes visto ser um bom elo de ligação na junção de painéis pré-fabricados facilitando a colocação destes em obra. Algumas características deste produto são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 6. 6 - Características DUCTAL JS1000, sítio da Lafarge

| Características DUCTAL JS1000 | Valores |
|--|---------|
| Resistência à compressão (28 dias) (Mpa) | 140 |
| Resistência à compressão (48 horas) (Mpa) | 100 |
| Resistência à tracção por flexão (MPa) | 30 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 50 |
| Gelo/degelo (após 300 ciclos) (%) | 100 |
| Profundidade de carbonatação (mm) (valor de referência máximo) | <0,5 |

Segundo a Lafarge devido à boa resistência do DUCTAL JS1000, as juntas de ligação entre os painéis não necessitam ser de grandes dimensões.

6.1.2 RESCON

Num projecto de pesquisa nacional austríaco a companhia SW Umwelttechnik com a colaboração da empresa Forschungsforderungsgemeinschaft Áustria, a Universidade de Kassel e a Universidade de Tecnologia de Graz, desenvolveram um UHPC com a contribuição de materiais originários do seu território.

Neste projecto a resistência média à compressão verificada para o RESCON foi de 195 MPa e a resistência à tracção situou-se entre os 17 e os 20 MPa.

Os constituintes utilizados para a fabricação do produto bem como as dimensões máximas de alguns deles, são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 6. 7 - Constituintes do RESCON, adaptado Monai e Schnabl, 2008

| RESCON | |
|-------------------|----------------------|
| Constituintes | Máxima dimensão (µm) |
| Areia | 500 |
| Basalto | 2500 |
| Microsilica | 1 |
| Sílica | 60 |
| CEM I 42,5 RHS | - |
| Fibras de carbono | - |

Fazendo uma ligeira comparação com o DUCTAL, refira-se que o RESCON não é constituído por grãos de quartzo, sendo utilizado o basalto, rocha que possui elevada dureza, permitindo adquirir igualmente boa resistência à compressão.

Porém a maior dimensão dos elementos de basalto utilizados face aos grãos de quartzo, poderá contribuir para uma micro estrutura do betão menos densa tornando-o mais permeável aos agentes agressores do meio exterior.

Para uma maior rentabilidade na produção do UHPC a empresa produtora ajustou o seu equipamento para uma produção mais personalizada do produto, factor que se prevê fundamental para o crescimento do mercado dos UHPC.

Um sistema de produção em série de pequenas pontes foi desenvolvido, mais precisamente para pontes pedonais. O desenvolvimento de um molde especial foi fundamental para o rápido ajustamento às dimensões pretendidas, tornando a fabricação muito mais económica. Este processo permite a pré-fabricação de painéis para pontes pedonais com mais de 20 metros de vão, larguras superiores a 3,5 metros e com espessuras entre os 6 e 10 cm.

A empresa produtora do RESCON já implementou o seu sistema de produção na construção de uma ponte em Lienz (Áustria), construída como um todo e colocada ao serviço segundo a SW Umwelttechnik em uma hora e meia.

Além da utilização do RESCON em pontes este é capacitado segundo a empresa para ser utilizado em sistemas de tratamento e drenagem de águas.

6.1.3 DUCORIT

Patenteado pela empresa dinamarquesa Densit com o nome DUCORIT é um UHPC auto – compactável muito utilizado em estruturas offshore, na ligação estabelecida entre a torre e a fundação e também em plataformas petrolíferas, bem como para protecção ao desgaste de diversas estruturas.

Em Março de 2008 a Densit tinha instalado mais de 320 torres eólicas offshore e previa que nos próximos 12 meses instalaria mais 250 novas estruturas; tudo somado resulta na aplicação de 6000 toneladas de DUCORIT.

A sua aplicação nestas estruturas offshore, permite a total preparação das torres em terra deixando de ser necessário um dispendioso trabalho offshore.

O equipamento utilizado para bombear designa-se de UHPC Putzmeister com capacidade para bombear 12 toneladas de DUCORIT por hora, sendo que cada torre eólica offshore contém em média 20 toneladas de UHPC.

Relevantes características mecânicas são indicadas no quadro seguinte para três UHPC produzidos pela Densit, divulgando que em apenas 24 horas é atingida a resistência à compressão de idades avançadas. Os agregados utilizados são o quartzo triturado ou a bauxite.

Quadro 6. 8 - Características de vários produtos DUCORIT, adaptado Moeller, 2008

| Características dos DUCORIT (28 dias) | D4W | S5W | S1W |
|---|------|------|------|
| Resistência à compressão (MPa) | 210 | 130 | 110 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 70 | 55 | 35 |
| Resistência à tracção por flexão (MPa) | 23,5 | 18 | 13,5 |
| Densidade (kg/m ³) | 2740 | 2440 | 2250 |

Apenas o DUCORIT D4W e o DUCORIT S5W apresentam adição de fibras metálicas na sua composição verificando-se por isso a sua maior resistência à flexão em relação ao DUCORIT S1W. A percentagem de fibras em relação ao volume total é de 1,9%.

Ensaio realizados nos produtos da Densit revelaram ainda os comportamentos indicados no quadro seguinte.

Quadro 6. 9 - Características de durabilidade do DUCORIT, adaptado Moeller, 2008

| Ensaio realizado | |
|--|-----------------------|
| Profundidade de carbonatação (mm) (valor de referência máximo) | 0 |
| Permeabilidade à água (mm) (valor de referência máximo) | 1 |
| Difusão de iões cloreto (m^2/s) | $0,6 \times 10^{-13}$ |

Note-se para a profundidade a que a água é capaz de se inserir nos poros (1 mm), extremamente importante para a utilização do DUCORIT em estruturas offshore. Acrescente-se ainda que o DUCORIT tem uma resistência à fadiga 50 vezes superior ao betão convencional, característica importante para as estruturas sujeitas ao impacto das ondas marítimas.

A empresa Densit dá conta também da utilização do DUCORIT na ilha australiana de Barrow, ilha com muitas potencialidades para extracção de gás natural e de óleo. Sete condutas de extracção das matérias-primas referidas, situadas em poços de extracção contendo água encontravam-se algo danificadas devido à corrosão. A corrosão existente não justificava a completa substituição das condutas então, foi ejetado DUCORIT S5W nos anéis compreendidos entre a superfície rochosa e a conduta com resistência à compressão de 135 MPa, protegendo a conduta da corrosão e transmitindo a sua resistência para esta, devido ao bom contacto entre a injeção de DUCORIT e o aço da conduta. O bom contacto deve-se ao facto do DUCORIT não apresentar retracção no processo de cura.

Semelhante técnica de protecção e reforço foi utilizada pela companhia Brunei Shell Petroleum em plataformas petrolíferas desgastadas pela corrosão por cloretos, essencialmente no revestimento em betão dos pilares metálicos de suporte da plataforma.

A utilização deste UHPC é economicamente favorável nas plataformas em alto mar com profundidades assinaláveis, reduzindo-se a quantidade de aço utilizada nas ligações entre a fundação e os pilares metálicos devido a resistência do DUCORIT. A elevada resistência atingida em idades iniciais encurta o tempo de instalação da plataforma.

A alta viscosidade do material torna-o ideal para aplicações submersas, pois impede que as partículas de cimento se misturem com a água.

6.1.4 CERACEM

É um UHPC auto-compactável, desenvolvido desde 1996 pela Eiffage com o nome BSI (Béton Spécial Industriel) e desde 2000 em parceria com a Sika foi desenvolvido uma gama de produtos com o nome actual Ceracem.

No quadro seguinte é apresentada uma das constituições utilizadas na construção das primeiras pontes rodoviárias mundiais com recurso à tecnologia dos UHPC, situadas no Sudeste de França mais precisamente em Bourg-lès-Valence, duas passagens superiores concluídas em 2001. Nesta altura o Ceracem era ainda designado de BSI.

Quadro 6. 10 - Constituintes do BSI/ Ceracem, Hajar, Simon, Lecointre, Petit Jean, 2004

| Constituintes BSI/ Ceracem | Quantidade (kg/m ³) | Percentagem por peso (%) |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Cimento | 1114 | 39,25 |
| Sílica de fumo | 169 | 5,95 |
| Agregados (0-6 mm) | 1072 | 37,77 |
| Fibras | 234 | 8,25 |
| Superplastificante | 40 | 1,41 |
| Água | 209 | 7,36 |
| Razão A/C | 0,19 | - |

As fibras utilizadas poderão ser metálicas ou sintéticas de 20 mm de comprimento, com 0,3 mm de diâmetro, ocupando um volume entre 2% a 4%. A sua constituição não contempla agregados grossos, sendo utilizado grãos de quartzo e areia de sílica fina para aumentar a sua compacidade.

Em obras efectuadas foi possível atingir resistências à compressão na ordem dos 200 MPa, resistência à tracção de 9 MPa e um módulo de elasticidade de 70 GPa.

O superplastificante de éter de policarboxilato utilizado no Ceracem faz com que as partículas da pasta fiquem mais próximas, aumentando a sua coesão e tornando o Ceracem auto-compactável.

Ensaio visando comprovar a sua durabilidade foram efectuados obtendo-se os seguintes resultados.

Quadro 6. 11 - Características de durabilidade do Ceracem, Abdelrazing, 2008

| Características | Ordem de grandeza |
|--|-------------------|
| Porosidade à água aos 28 dias (%) | 3,6 |
| Permeabilidade aos gases (m ²) (Ensaio segundo norma interna da Sika) | 10 ⁻¹⁸ |
| Permeabilidade aos cloretos (mm) | 3/ 2 Anos |
| Profundidade de carbonatação (mm) | <0,1/ano |

Além da utilização como referido em pontes rodoviárias o Ceracem, foi utilizado com fins decorativos de fachadas (Ponte 7 em Villepinte, 2003), cascas pré-esforçadas (cobertura das portagens da ponte Millau, 2004), painéis acústicos (Teatro de Leitura de Cachans College, 2004), reforço de pilares (viaduto de Valabres, 2004), recipientes de plantas (Marselha, 2005), entre outros.

6.1.5 BCV (Béton Composite Vicat)

É um UHPC reforçado com fibras resultante da parceria estabelecida em 1998 entre o grupo Vicat e a Vinci Construction Grands Projets que levou ao desenvolvimento do BCV.

Algumas das características mecânicas do BCV indicadas pelo grupo Vicat são mencionadas na tabela seguinte. O BCV utiliza 2% de fibras metálicas em relação ao seu volume.

Quadro 6. 12 - Características mecânicas do BCV, grupo Vicat, 2004

| Características mecânicas BCV | Valores (28 dias) |
|--------------------------------|-------------------|
| Resistência à compressão (MPa) | 130-200 |
| Resistência à tracção (MPa) | 10 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 44 |

A resistência a ambientes adversos é comprovada pelas características de durabilidade indicadas pelo produtor, adquiridas com a implementação de uma razão A/C de 0,25 e uma máxima dimensão dos agregados de 3 mm, tornando a estrutura muito impermeável. A sua densidade é de 2480 kg/m³.

Quadro 6. 13 - Características de durabilidade do BCV, grupo Vicat

| Características de durabilidade do BCV | Valores |
|---|-----------------------|
| Resistência ao gelo/degelo (56 ciclos) (%) | 100 |
| Permeabilidade ao ar (m^2) (valor de referência máximo) | 10^{-19} |
| Difusão dos iões cloreto (m^2/s) | $3,5 \times 10^{-14}$ |
| Resistência à reacção da alcális (%) | 100 |

O BCV além de ser aplicado a estruturas que precisam de elevadas resistências, tem também uma vasta gama de cores levando-o a ser aplicado com fins estéticos.



Figura 6. 1 - Gama de cores do BCV, grupo Vicat

A imagem seguinte ilustra a aplicação do BCV, em painéis pré-fabricados, realçando-se a pequena espessura utilizada e a cor preta adquirida pelo betão, pretendo adquirir a aparência de outro material.



Figura 6. 2 - Instalação de painel de varanda com BCV (cor preta), grupo Vicat

O BCV já foi utilizado na construção de estações de tratamento de água das chuvas (Les Houches, França), em blocos de fundações da cobertura de portagem (Cluses, França) e pavimento de pontes pedonais (Lauterbrunnen, Suíça).

6.1.6 CARDIFRC

É um UHPC patenteado desenvolvido na Universidade de Cardiff (País de Gales). Foi utilizado em estudos para verificação da viabilidade do seu uso para reforço de vigas de betão armado sujeitas a temperaturas elevadas.

Esta temática surgiu devido aos problemas existentes no usual reforço externo destas vigas com placas de aço na face exposta à tração e nas duas faces laterais para reforço ao esforço transversal. Alguns dos problemas a quando do reforço com placas de aço mencionados por Farhat e Karihaloo, 2004, autores desta experiência foram corrosão das placas causando deterioração na ligação entre a placa e o betão, falhas no reforço ao esforço transversal, dificuldade de manipulação de chapas pesadas, a necessidade de colocação de sistemas de ligação e problemas de longa exposição a variações de temperatura.

Os constituintes e as quantidades que compõem o CARDIFRC na mistura são enunciados no quadro seguinte.

Quadro 6. 14 - Constituintes do CARDIFRC, Farhat e Karihaloo, 2004

| Constituintes do CARDIFRC | Quantidade (kg/m ³) | Porcentagem por peso (%) |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Cimento | 855 | 31,75 |
| Areia de quartzo (9-300µm) | 470 | 17,45 |
| Areia de quartzo (250-600µm) | 470 | 17,45 |
| Microsílica | 214 | 7,95 |
| Água | 188 | 6,98 |
| Superplastificante | 28 | 1,94 |
| Fibras (comprimento 6 mm) | 390 | 14,48 |
| Fibras (comprimento 13 mm) | 78 | 2,9 |
| Razão A/C | 0,22 | - |

As fibras utilizadas foram de origem metálica, sendo possível através de tomografia computadorizada (técnica que utiliza os raios X) confirmar a produção de uma mistura homogênea com uma distribuição uniforme das fibras, destaque para a grande quantidade de fibras deste UHPC.

As propriedades mecânicas tipicamente atingidas pelo CARDIFRC são as seguintes.

Quadro 6. 15 - Propriedades mecânicas do CARDIFRC, Farhat e Karihaloo, 2004

| Propriedades CARDIFRC | |
|--------------------------------|-----|
| Resistência à compressão (MPa) | 207 |
| Resistência à tração (MPa) | 30 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 46 |

O CARDIFRC foi produzido em moldes de aço bem oleados em tiras com 1030 mm de comprimento, 100 mm de largura e 16 mm de espessura, que foram deixadas em cura nos moldes durante 24 horas a 20°C. Após terem sido retiradas dos moldes foram sujeitas a um tratamento térmico de 90°C durante 7 dias.

O material de reforço produzido foi adicionado às vigas de betão armado através de um adesivo epoxi (Sikadur 31). Para garantia de um bom contacto entre o CARDIFRC e o material a reparar, este foi limpo e enrugado com uma rebarbadora. Dois tipos de configuração de reforço foram testados; apenas uma tira colocada na face de flexão e além desta tira na face de flexão a colocação de tiras em ambos os lados da viga, para reforço ao esforço transversal.

As vigas ensaiadas tinham uma dimensão de 1,1 m, foram expostas entre 30 a 90 ciclos térmicos de elevação e diminuição da temperatura desde a temperatura do laboratório (25°C) até aos 90°C e em seguida testadas à flexão carregando-as em quatro pontos. Para comparação do carregamento a aplicar 8 vigas sem reforço foram também carregadas e sujeitas aos mesmos ciclos térmicos. As vigas reforçadas foram carregadas até 75% da carga de ruptura das vigas comparativas.

Na análise de resultados Farhat e Karihaloo, verificaram que a capacidade de resistência à tracção por flexão após o reforço com CARDIFRC foi aumentada, bem como o bom estado da viga devido aos ciclos térmicos.

Em relação ao esforço transversal, a sua resistência pode ser aumentada em 86% e as roturas obtidas tiveram características dúcteis.

Verifica-se que o CARDIFRC é um bom material para climas quentes, é uma boa solução aos materiais actuais de reforço e tem características mecânicas capazes para ser aplicado desde raiz em estruturas com necessidade de durabilidade e sujeitas a grandes variações de temperatura.

Capítulo 7

RECOMENDAÇÕES PARA A APLICAÇÃO ESTRUTURAL DO HPC/UHPC

7.1 GENERALIDADES

Algumas das recomendações proferidas neste capítulo não se aplicam especificamente aos HPC ou UHPC, mas sim para o Fibre Reinforced Concrete (FRC), Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC), Ultra High Performance Reinforced Fibre Concrete (UHPRFC) ou High Performance Fibre Reinforced Cement Composites (HPFRCC).

Estes termos, têm o seu aparecimento associado à evolução do UHPC, pela adição de fibras à grande maioria destes, prevendo-se no futuro o desuso do termo UHPC em detrimento dos termos acima referidos.

Para uma aplicação em larga escala do UHPC, as recomendações terão de ser aceites pela generalidade dos projectistas. Com este objectivo a Federação Internacional do Betão tem vindo a trabalhar com o intuito de criar o primeiro código internacional de regras de dimensionamento do UHPRFC. Dois grupos estão particularmente empenhados, o designado “Task Group 8.3” para betões reforçados com fibras (FRC) com resistência à compressão inferior a 120 MPa e o “Task Group 8.6” para os UHPRFC com resistência à compressão superior a 120 MPa. Estes grupos irão dar continuidade às recomendações proferidas pelo comité técnico da RILEM TC162-TDF referido adiante neste capítulo. Os capítulos com maior importância nestas recomendações serão o de descrição das propriedades dos materiais (capítulo 4) e o de dimensionamento (capítulo 5). O capítulo 4 irá descrever as propriedades do UHPRFC em termos da resistência à compressão, à tracção, à tracção por flexão, relações de tensão e deformação, relações de tensão e abertura de fendas, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, efeitos da fadiga, efeitos da temperatura, penetração dos iões cloreto, porosidade e permeabilidade, carbonatação, conteúdo de portlandite (hidróxido de cálcio) e orientação de fibras.

Quanto ao capítulo de dimensionamento será dada relevância ao comportamento à flexão, corte, torção, bem como informação detalhada sobre controlo da deformação e abertura de fendas, vibrações e estados limites de serviço, Walraven, 2008.

Neste momento existem algumas recomendações de dimensionamento de elementos estruturais constituídos por adição de fibras. Seguidamente irão ser descritas o conteúdo de algumas das mais importantes recomendações deste material.

7.1.1 Recomendações da RILEM

Com o objectivo da criação de um código internacional sobre o material, um comité técnico da RILEM (TC 162-TDF), começou em Abril de 1995 uma pesquisa denominada “ Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete ”. A maioria dos membros constituintes deste comité técnico, encontravam-se já em pesquisa sobre o assunto no seu país.

Os dois principais objectivos do referido comité eram desenvolver métodos de dimensionamento para avaliar o comportamento do betão reforçado com fibras metálicas (SFRC) e enunciar recomendações de ensaios apropriados para caracterização de parâmetros, nomeadamente em relação à resistência mecânica do material, que sejam influentes no futuro dimensionamento de estruturas constituídas por SFRC.

O comité técnico publicou durante 2000 e 2001 no jornal da RILEM, “Materials and Structures” alguns dos resultados atingidos durante as investigações.

O ensaio de resistência à flexão de vigas simplesmente apoiadas foi um dos visados, com o intuito de determinar o momento resistente máximo da viga a meio vão, através do relacionamento da energia absorvida pelas fibras quando sujeitas a carregamento, comprimento e secção transversal destas.

O ensaio de tracção uniaxial foi efectuado para verificação do comportamento das fibras, em especial no que diz respeito à relação entre a tensão e os deslocamentos correspondentes obtidos. Foram identificadas fibras sem um comportamento efectivo, devido a estarem num plano paralelo à fenda.

O comité a partir das normas europeias vigentes, nomeadamente o Eurocódigo 2 e de vários estudos experimentais como os referidos anteriormente estabeleceu um método de dimensionamento designado de “ σ - ϵ design method”, efectuando adaptações nas fórmulas do código europeu referido, tendo em visto a contribuição das fibras, referindo que estas fórmulas são aplicáveis quando as fibras são utilizadas com uma função estrutural e não para melhorar outras resistências, sendo de uso exclusivo para betões de classes superiores ao C50/60.

Assim são enunciadas pela RILEM fórmulas de cálculo da resistência à tracção por flexão, largura de fendas, resistência ao esforço transversal e armaduras para cumprimento dos estados limites de serviço.

7.1.2 Recomendações francesas

As recomendações francesas surgiram em 2002, preparadas em conjunto pela Associação Francesa de Engenheiros Civis (AFGC) e pelas Estradas Francesas e Agência de Tráfego Governamental (SETRA) denominadas de “*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete-Interim Recommendations*” Estas recomendações, tiveram como base os códigos franceses de dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado existentes, adaptando-as ao novo material. Foram escritas durante a construção da primeira ponte rodoviária de UHPRFC (Bourg Lès Valence), baseando-se em dez anos de pesquisa e em obras realizadas com UHPRFC.

As recomendações francesas são compostas por três partes; a primeira parte caracteriza as capacidades mecânicas do material e recomendações para as obter, bem como indicações sobre os processos de cura, transporte e colocação em obra. São descritos e exemplificados os benefícios dos processos de cura do UHPRFC, métodos de caracterização da resistência à tracção e à compressão, recomendações dos valores a utilizar para o modo de elasticidade, coeficiente de Poisson e de expansão térmica. Em relação à retracção do UHPRFC são indicados valores a ter em conta no dimensionamento, para quando o material tenha sido sujeito a tratamento térmico, visto nessa situação a retracção ser praticamente nula.

Ainda nesta primeira parte são dadas indicações para a mistura dos UHPRFC, nomeadamente valores limites da quantidade dos constituintes na mistura (agregados, cimento, água, sílica de fumo e outras adições) bem como valores de tolerância para os constituintes do material. Indicações para o transporte, vibração e colocação do material em obra (recomendações para diferentes temperaturas do ambiente a quando da colocação) são também fornecidas.

Finalmente, nesta primeira parte são enunciados testes de resistência mecânica do produto, que deverão ser realizados para verificação da sua qualidade.

A segunda parte das recomendações refere-se ao dimensionamento e análise das estruturas de UHPRFC, baseadas nos códigos franceses BPEL (Béton Précontraint aux États Limites), 1985 e BAEL (Béton Armé aux États Limites), 2000, sendo utilizado um coeficiente de segurança relativamente às fibras para prevenir defeitos de fabrico destas. Este coeficiente toma o valor de

1,3 nas combinações fundamentais e 1.05 nas combinações de acidente, além disso são indicadas fórmulas para garantir uma quantidade mínima de fibras introduzidas, permitindo obter uma suficiente ductilidade à flexão.

São apresentados valores limites de tensão tanto para secções apenas com armaduras passivas quer para secções contendo pré-esforço. Podendo a utilização do UHPRFC dispensar armaduras passivas, são indicados valores máximos de largura de fendas para estes casos. Quanto às deformações nos apoios de pontes, estas são calculadas segundo os códigos BPEL e BAEL sem relacionamento com a resistência das fibras, desde que estas não façam parte dos apoios das pontes.

Muitas das verificações em relação aos estados limites últimos são análogas aos códigos BPEL e BAEL, contudo algumas delas diferem e recomendações são descritas para o UHPRFC.

O dimensionamento de zonas sujeitas a cargas concentradas é alvo de destaque por parte dos autores seguindo regra geral os regulamentos do BPEL e BAEL, introduzindo-se a contribuição das fibras e caso o seu efeito seja suficiente, as armaduras passivas poderão ser dispensadas.

A terceira parte destas recomendações refere-se à durabilidade do UHPRFC, comparando-o com outros tipos de betões, factores como a porosidade à água, permeabilidade ao oxigénio, factor de difusão dos iões cloreto e conteúdo de portlandite (hidróxido de cálcio). Um sub - capítulo em relação à corrosão das fibras é descrito, enunciando testes laboratoriais efectuados bem como exemplos comparativos entre diferentes classes de betões em relação à corrosão das armaduras.

Por último é discutido o comportamento do UHPRFC ao fogo.

7.1.3 Recomendações italianas

As recomendações italianas são da autoria do Concelho Nacional de Pesquisa, foram aprovadas em Novembro de 2007 designando-se de “*Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures*”. As recomendações tiveram por base o código europeu vigente de dimensionamento de estruturas de betão (EC2).

Após uma ligeira introdução no primeiro capítulo sobre os benefícios da utilização deste material, no segundo capítulo é dada particular atenção às fibras sendo descritas formas de medição de diâmetros e comprimentos, módulos de elasticidade e resistência à tracção. São

especificadas as características comuns de vários tipos de fibras como as metálicas, poliméricas e de carbono. São enunciados os comportamentos trazidos pelas fibras ao FRC, como em relação à retracção, comportamento à compressão e tracção, módulo de elasticidade, resistência a agentes exteriores agressivos.

No terceiro capítulo são indicados conceitos básicos de dimensionamento, como carga máxima a suportar pela estrutura proporcionalmente ligada à carga do aparecimento da primeira fenda, resistência de elementos estruturais, coeficientes de segurança associados ao FRC e ao aço e recomendações de escolha do tipo de fibras metálicas de acordo com a classe de exposição bem como o tipo de betão em utilização.

No quarto capítulo são mencionadas recomendações de dimensionamento aos estados limites últimos com indicação de armaduras mínimas, bem como de indicações de dimensionamento de placas e lajes com e sem introdução de armaduras passivas.

No capítulo 5 são referidas indicações para o dimensionamento aos estados limites de serviço, indicando entre outros o cálculo de largura de fendas e armadura mínima para controlo destas.

O capítulo 6 fornece indicações de pormenores construtivos como espaçamento de armaduras, espessura mínima de elementos estruturais e o seu recobrimento.

O capítulo 7 destina-se à avaliação da capacidade dos elementos estruturais do FRC, sujeitos à acção do fogo, sendo mesmo apresentado um gráfico com a demonstração da variação de um coeficiente de degradação mecânica com a temperatura para FRC com fibras metálicas. Num anexo é descrito o cálculo do referido coeficiente.

Num último capítulo é indicado testes a realizar durante a produção do FRC, para confirmação das características assumidas no dimensionamento. Os ensaios previstos realizar é em relação à verificação da correcta mistura do material, conteúdo de fibras do FRC e resistência do FRC à primeira fenda. Estes ensaios são descritos em anexos.

7.1.4 Recomendações japonesas

As recomendações japonesas foram elaboradas pela Associação Japonesa de Engenheiros Civis e editadas em Março de 2008, denominando-se de *“Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine*

Cracks”. A adição ao título das recomendações de “Fine Cracks” é explicada devido ao facto de este material quando sujeito a uma tensão de deformação desenvolver várias fendas de pequena largura, não aumentando a largura destas, mas sim a quantidade o que contribui para uma distribuição uniforme de tensões. Como outros regulamentos indicados neste capítulo a recomendação japonesa recorre-se várias vezes de normas de dimensionamento de estruturas de betão tradicional.

Para o HPFRCC é aplicado um coeficiente de segurança de 1,3 no dimensionamento aos estados limites últimos, podendo este coeficiente tomar o valor de 1,0 no dimensionamento aos estados limites de serviço.

Após dois capítulos iniciais introdutórios ao material o terceiro capítulo enuncia e demonstra resultados de ensaios para determinação da resistência à tracção, resistência à compressão, coeficiente de Poisson, retracção do material, bem como fórmulas para o cálculo do módulo de elasticidade, de deformação, resistência à fadiga e valores exemplificativos da condutividade térmica do HPFRCC.

Em relação à largura de fendas é apresentada uma tabela indicativa da dimensão média das fendas que poderão ser obtidas para diferentes estados de deformação, bem como a largura máxima que estas fendas poderão obter para os respectivos estados de deformação. A largura de fendas, resistência à tracção e compressão apresentados são resultado de ensaios efectuados, cujos métodos são descritos em anexo. É efectuada ainda uma comparação entre fibras de polietileno e fibras de álcool polivinílico para controlo da largura de fendas.

O capítulo 4 indica que a consideração das cargas não deverá ser diferente de um dimensionamento com betão tradicional, tendo-se apenas de ter em atenção que o peso por unidade de volume do HPFRCC difere do betão tradicional, variando entre os 17 e 19 kN/m³.

O quinto capítulo aborda a redistribuição do momento flector nos apoios de vigas contínuas, lajes contínuas e estruturas rígidas.

No capítulo 6 são enunciadas verificações em relação ao esforço axial, momento flector, esforço transversal, esforço de corte resistente ao punção, bem como indicações de colocação de estribos. Em relação à resistência à torção e à fadiga é ainda possível determinar a resistência dos elementos estruturais, sendo necessário efectuar-se testes experimentais para obter resultados conclusivos.

Capítulo 7: Recomendações para a aplicação estrutural do HPC/UHPC

No capítulo 7 são abordados os estados limites de serviço indicando-se limites máximos de compressão devido ao momento flector, forças axiais e tensões de tracção das armaduras. Para os estados limites de serviço a largura máxima das fendas poderá ser considerada de um modo conservativo a especificada para o betão tradicional, já que devido ao comportamento das fibras a largura das fendas nos UHPC são inferiores aos betões tradicionais.

No capítulo 8 são indicados valores de detalhe estrutural como valores mínimos de recobrimento, espaçamentos mínimos de armaduras e comprimentos de amarração de armaduras.

No capítulo 9 são indicados ensaios e valores característicos em relação a possíveis ataques do meio exterior, para validação do bom estado do HPFRCC. Os meios de degradação especificados são a carbonatação, corrosão das armaduras pelos iões cloreto, acção do gelo e degelo, impermeabilidade à água e resistência ao fogo.

O capítulo 10 fornece indicações da constituição do material, dosagens e dimensões indicadas dos constituintes do HPFRCC, exemplos de constituições, fórmula de verificação da resistência, tensão do material após mistura, processos de cura, transporte e colocação em obra.

Finalmente o capítulo 11 é idêntico ao anterior mas destinado a HPFRCC projectado.

7.1.5 Recomendações da VSL Austrália para vigas pré-esforçadas compostas por DUCTAL

Um outro guia, mas não generalista de recomendações foi editado em Maio de 2000 no que concerne à concepção de vigas pré-esforçadas com o UHPC DUCTAL, por Gowripalan e Gilbert, 2000. Os produtores do DUCTAL têm uma grande colaboração com a empresa suíça VSL, especialistas em pré-esforço. Este guia foi preparado por Gowripalan e Gilbert, professores da Universidade de Nova Gales do Sul (Austrália) para a secção australiana da VSL, adoptando sempre que possível os requerimentos de concepção das Normas Australianas de Estruturas de Betão (AS3600- 1994).

Após os dois primeiros capítulos deste guia enunciarem o seu objectivo, incluindo a descrição dos constituintes do DUCTAL, o terceiro capítulo fornece indicações para a fase de dimensionamento quer aos estados limites últimos quer aos estados limites de serviço.

O capítulo 4 descreve o comportamento do DUCTAL à compressão e à tracção, bem como fórmulas e métodos para calcular as respectivas resistências. Fornece valores indicativos para dimensionamento em relação ao módulo de elasticidade, a sua densidade, coeficiente de Poisson e valores de deformação e retracção.

No quinto capítulo são fornecidas indicações para o dimensionamento das vigas à flexão tanto constituídas com armaduras passivas e activas como sem a inclusão de nenhuma destas. Valor mínimo da resistência à tracção é indicado.

O capítulo 6 aborda o dimensionamento das vigas em relação ao esforço transversal, sendo que o capítulo 7 aborda o dimensionamento à torção e à combinação do esforço transversal e torção.

No oitavo capítulo são apontadas formas de controlo da largura de fendas para vigas com e sem pré-esforço e no nono trata-se da retracção e deformação causadas pela flexão.

Nos capítulos 10 e 11 são tratados muito sucintamente as questões de resistência ao fogo e à fadiga, respectivamente. No que respeita à fadiga é apresentado um gráfico exemplificativo do bom comportamento do DUCTAL, designando o DUCTAL de “Reactive Powder Concrete”(RPC) em relação a outros tipos de betões.

O capítulo 12 é dedicado ao pré-esforço, sendo dada particular importância às perdas de pré-esforço. O capítulo 13 finaliza este guia de recomendações com indicações de tensões e dimensões da zona de ancoragem do pré-esforço.

Em anexos são apresentados vários exemplos de cálculos de dimensionamento de vigas pré-esforçadas com o DUCTAL.

Capítulo 8

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES REALIZADAS

8.1 GENERALIDADES

Neste capítulo serão descritas algumas obras realizadas um pouco por todo o mundo com recurso a betões de elevado desempenho. A variedade de possibilidades de aplicação do UHPC é uma realidade, bem como a imponência de algumas obras já realizadas com recurso a este material.

8.1.1 Two Union Square, Seattle (Estados Unidos da América)

Construído em 1989, composto por 58 andares apoiados numa composição inovadora do núcleo constituído por 4 tubos de aço de 3 m de diâmetro cada, preenchidos com HPC com resistência à compressão de 130 MPa, sem adição de armaduras passivas.

Estudos comprovaram que uma resistência à compressão de 90 MPa, era suficiente para o edifício, no entanto esta foi elevada até aos 130 MPa pela necessidade de elevar o módulo de elasticidade, já que este é uma grandeza proporcional à resistência à compressão do betão aos 28 dias.

O preenchimento dos tubos de aço com HPC com módulo de elasticidade de 50 GPa ajudava o edifício de 216 m de altura a suportar oscilações devido ao vento e às vibrações sísmicas, dando aos ocupantes de andares superiores um conforto equivalente aos dos primeiros andares.

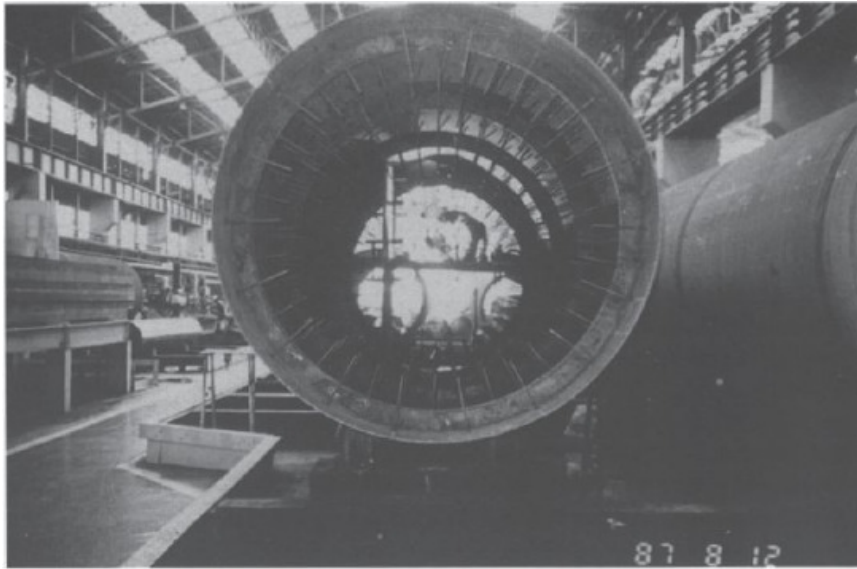


Figura 8. 1 - Interior de um tubo de aço utilizado para confinar o HPC do Two Union Square, (Estados Unidos da América), Aïtcin, 1998

O betão foi bombeado desde o topo dos tubos para a base sem necessidade de mão-de-obra para a sua compactação.

Esta solução de preenchimento dos tubos de aço com HPC, possibilitou a redução da utilização de aço, permitindo a poupança em cerca de 30% nos custos segundo engenheiros estruturais.

O cimento utilizado foi do tipo I/II, baixo em alcális e exibindo baixa actividade reológica na presença de elevadas dosagens de superplastificante, atingindo-se uma razão A/C de 0,25. Os agregados grossos utilizados na mistura tinham a máxima dimensão de 10 mm.

Na tabela seguinte são apresentadas as quantidades utilizadas no HPC da estrutura.

Quadro 8. 1 - Constituintes do HPC utilizado no Two Union Square, (Estados Unidos da América), Universidade de Memphis

| Constituinte | Quantidade |
|---------------------------------------|------------|
| Água (kg/m^3) | 150 |
| Cimento (kg/m^3) | 513 |
| Sílica de fumo (kg/m^3) | 43 |
| Agregados grossos (kg/m^3) | 1080 |
| Agregados finos (kg/m^3) | 685 |
| Superplastificante (L/m^3) | 15,7 |
| Razão Água/materiais cimentícios | 0,25 |

8.1.2 Construção da cobertura de silos, Illinois (Estados Unidos da América)

Três novos silos foram construídos numa fábrica na localidade de Joppa, Illinois. A incerteza do proprietário quanto à inclusão da nova tecnologia do UHPC poder causar atrasos na conclusão da obra levou a que o UHPC fosse aplicado apenas em um dos telhados dos silos, sendo os outros dois efectuados com aço, podendo-se assim estabelecer comparações nomeadamente em relação à duração de implementação das duas soluções.

As paredes dos silos eram constituídas por betão armado convencional, tendo o silo uma cobertura de UHPC, com diâmetro de 18 m. A cobertura deste silo, foi composta por 24 painéis pré-fabricados em UHPC, sem reforço de armaduras passivas, com uma espessura de 15 mm, actuando como uma casca fina. Cada painel tinha uma área de 11,2 m², pesando cerca de 2 t cada.

O UHPC utilizado para os painéis pré-fabricados foi o DUCTAL CS 1000 que tem a seguinte composição.

- Pré-mistura – cimento, sílica de fumo, grãos de quartzo e areia.
- Fibras metálicas - 0,2 mm de diâmetro ao longo de um comprimento de 14 mm.
- Superplastificante, alto redutor de água
- Água

Em ensaios realizados nos painéis após 48 horas obteve-se um valor de resistência à compressão de 166 MPa, após um tratamento térmico dos painéis como indicado pelo produtor do UHPC (elevação da temperatura até aos 90°C a 90% de humidade relativa durante 48 horas). A resistência à tracção por flexão adquirida às 48 horas foi de 37,9 MPa.

Segundo a AFGC-SETRA, o tratamento térmico aplicado permite o aumento da resistência tanto à tracção como à compressão do betão, retracção retardada e a durabilidade é substancialmente engrandecida. A elevada resistência adquirida em pouco tempo foi um factor que permitiu uma rápida conclusão da obra.

Os painéis foram colocados no seu local por uma grua móvel, aparafusados no seu topo a um pavimento metálico e na sua parte inferior às paredes do silo.



Figura 8. 2 - Instalação da cobertura do silo, Perry e Zakariasen, 2003

Em comparação com a cobertura metálica nos outros silos, houve uma poupança de 24 dias, como descrito no quadro seguinte.

Quadro 8. 2 - Comparação da duração de montagem das coberturas dos silos em aço e UHPC, Perry e Zakariasen, 2003

| Trabalhos | Cobertura metálica (dias) | Cobertura UHPC (dias) |
|---|---------------------------|-----------------------|
| Avaliação da montagem da cobertura | 2 | 1 |
| Material para montagem (grua e andaimes) | 5 | 1 |
| Instalação pavimento metálica no topo cobertura | 1 | 1 |
| Instalação dos painéis | - | 3 |
| Enchimento entre painéis e membrana impermeável | - | 5 |
| Instalação do esqueleto da cobertura metálica | 12 | - |
| Instalação de membrana da cobertura metálica | 10 | - |
| Enchimento das placas de base para as vigas no topo das paredes dos silos | 1,5 | - |
| Instalação de anel de fecho para a membrana da cobertura metálica | 3,5 | - |
| Total (dias de construção) | 35 | 11 |

Além da poupança significativa de tempo, a junção entre as paredes do silo e a cobertura é mais facilitada com a utilização dos painéis de UHPC, devido a permitir pequenos reajustamentos.

8.1.3 Fundações de turbinas eólicas offshore a Sul da Ilha de Samsøe (Dinamarca)

Em 2002 foram instaladas 10 turbinas eólicas a Sul da ilha de Samsøe, utilizando um UHPC auto-compactável para estabelecer a ligação entre a fundação e a torre das respectivas turbinas eólicas.

A montagem destas turbinas consistiu na condução da fundação até ao fundo do mar com o topo desta situando-se acima da superfície, tendo aproximadamente 4 m de diâmetro. Em seguida a torre, com um diâmetro ligeiramente superior ao da fundação foi colocada sobre esta, obtendo-se um comprimento de sobreposição de 6 m.

A ligação completou-se com o bombeamento de UHPC (Ducorit D4) com 200 MPa de resistência à compressão, nos anéis de 110 mm de diâmetro, formados pela sobreposição da torre à fundação, através de mangueiras pré-instaladas com 75 mm de diâmetro para estabelecer a ligação entre a torre e a fundação. Devido ao DUCORIT ser auto-compactável, tem facilidade em mover-se sob acção do seu peso próprio, não sendo necessária mão-de-obra para o seu acoplamento à fundação permitindo o preenchimento de zonas estruturais congestionadas.

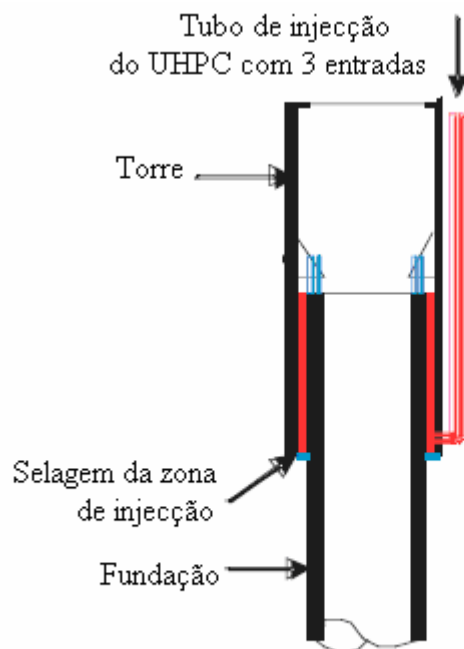


Figura 8.3 - Instalação das turbinas eólicas a Sul da ilha de Samsøe (Dinamarca), adaptado Densit, 2005

Além do enunciado acima o Ducorit D4 apresenta uma grande viscosidade impedindo que as suas partículas se misturem com a água, grande resistência à fadiga e desenvolvimento de elevadas resistências em idades iniciais.

A instalação e a injeção de UHPC em cada uma das torres eólicas teve a duração de aproximadamente 3 horas.

A aplicação de UHPC neste tipo de obras além do enunciado anteriormente, garante uma protecção ao ataque de iões cloreto.

8.1.4 Ponte pedonal, Seoul, (Coreia do Sul)

Inaugurada em Abril de 2002, a denominada Ponte da Paz é a mais longa ponte pedonal do mundo construída com o UHPC DUCTAL.

A ponte situa-se sobre o rio Han e é formada por uma arco que não contém qualquer suporte vertical, com um vão de 120 m e 4,30 m de largura, constituído totalmente por UHPC e duas rampas de acesso a este constituídas por aço.

A escolha do UHPC para constituição do arco da ponte deveu-se às extremas variações climáticas verificadas em Seoul, conferindo durabilidade à ponte pela robustez fornecida pelo material e pela liberdade estética permitida pelo UHPC.

Segundo a empresa Lafarge produtora do UHPC DUCTAL utilizado na obra, não contendo qualquer suporte vertical a estabilidade do arco da ponte foi adquirida devido ao seu formato e à espessura do seu tabuleiro, de 3 cm na secção mais fina (tornou o arco mais leve).

O tabuleiro do arco da ponte foi constituído por painéis pré-fabricados de 20 m de comprimento e a sua ligação foi efectuada por cabos de pré-esforço colocados internamente. Foram utilizados 12 toneladas de cabos de pré-esforço, 220 de UHPC e não foram necessárias armaduras passivas.



Figura 8. 4 - Ponte da Paz, Seoul, Coreia do Sul, sítio da Lafarge

8.1.5 Placas de ancoragens, Calgary, (Canadá)

Em 2002 foi construída um muro de contenção de uma auto-estrada com recurso a ancoragens, para resistir aos impulsos do solo. Devido ao difícil acesso ao local o engenheiro da obra decidiu utilizar painéis pré-fabricados de betão convencional no muro de contenção para uma construção mais acelerada.

Foram inseridas ancoragens no solo e aparafusadas a placas construídas no muro de contenção, feitas por aço galvanizado e UHPC.

O muro de contenção que assentava sobre uma laje de pequenas dimensões era constituído por 42 painéis pré-fabricados com a espessura a variar entre os 30 e 50 cm e uma altura de 3,1m. Cada painel depois de ser colocado no seu lugar era fixo às ancoragens de aço do solo. As ancoragens de aço foram realizadas por placas de ancoragens pré-fabricadas em UHPC, que com a ajuda de uma porca faziam a ligação às ancoragens do solo.



Figura 8.5 - Placa de ancoragem de UHPC instalada no muro de contenção de terras, Perry e Zakariasen, 2003

Nas placas das ancoragens de 50,6 cm x 50,6 cm x 28,0 cm foram utilizados 4m³ de UHPC, sendo o seu peso individual de 160 kg. Foi obtida uma resistência à compressão de 188 MPa em cada bloco, demorando a produção total destes 11 dias, sendo necessário uma Bobcat e dois homens para a instalação de cada uma.

A implementação destas placas de ancoragem permite visualizar que a aplicação do UHPC, não é só destinado a pontes ou edifícios, mas também a elementos geotécnicos como é o caso, fornecendo todas as suas capacidades de durabilidade.

8.1.6 Cobertura em casca das portagens do viaduto Millau (França)

Na cobertura das portagens do viaduto Millau, aberto à circulação em 2004, foi adoptada uma casca similar a uma folha de papel retorcida, tendo 98 m de comprimento, 28 m de largura e uma espessura de 10 cm.



Figura 8.6 - Cobertura das portagens do viaduto Millau (França), Abdelrazig, 2008

A estrutura é constituída por 53 segmentos de 2 m pré-fabricados e ligados entre si através de pré-esforço interno longitudinal. Ao todo foi utilizado 1000 m³ de UHPC (Ceracem), com um peso total deste constituinte de 2800 toneladas.

A resistência à compressão verificada aos 28 dias foi de 199 MPa, sendo que aos 8 dias após conclusão da obra 80% desta resistência já tinha sido adquirida. A resistência à tracção verificada foi de 8,8 MPa e o módulo de elasticidade de 71 GPa.

Na estrutura não foram incluídas armaduras passivas o que possibilitou a diminuição da espessura e do peso da casca.

A possibilidade de não introduzir armaduras passivas nas estruturas dá a oportunidade, aos arquitectos de projectar estruturas futuristas e com um aspecto visual agradável, visto estas possuírem uma menor espessura e um peso próprio menor.

8.1.7 Ponte rodoviária the Saint-Pierre-La-Cour (França)

Foi a primeira ponte rodoviária construída em França com recurso ao UHPC patenteado DUCTAL, efectuada para atravessar uma linha-férrea com um vão de 19 m e uma largura de 12,6 m, ostentando duas faixas de rodagem e um passeio pedonal.

O tabuleiro da ponte em betão armado construído no local com uma espessura de 20 cm, foi suportado por 10 vigas pré-esforçadas e 83 lajes pré-fabricadas de 25 mm de espessura, ambas com o UHPC DUCTAL – FM.

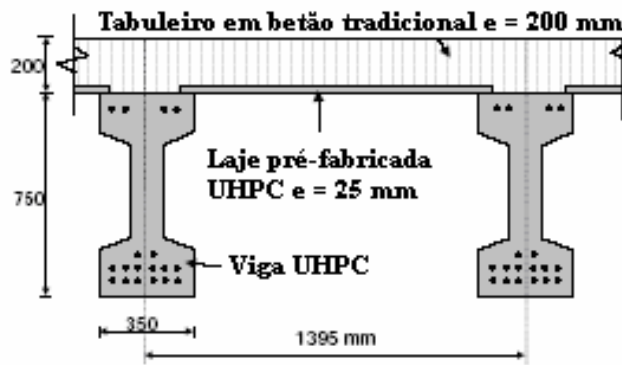


Figura 8.7 - Descrição da solução implementada, na Ponte rodoviária the Saint-Pierre-La-Cour (França), Behloul e Batoz, 2008

Devido às boas características do UHPC para a pré-fabricação, a colocação tanto das vigas como das lajes demorou apenas 2 dias.

Numa comparação feita, caso a ponte fosse realizada com betão tradicional obteve-se um factor de redução do peso do tabuleiro de 2.2, tendo a implementação das lajes pré-fabricadas em UHPC fornecido uma protecção às armaduras passivas colocadas, promovendo uma maior durabilidade da estrutura e o economizar de custos de manutenção. A ponte de Saint-Pierre-La-Cour foi concluída em 2005.



Figura 8.8 - Ponte rodoviária de Saint-Pierre-La-Cour sobre uma linha-férrea, Behloul, Bayard, Resplendino, 2006.

8.1.8 Reforço de barreiras de embate com camada de UHPRFC em ponte rodoviária, Zurique (Suíça)

A utilização de UHPC não se destina somente a elementos estruturais de grande envergadura. As barreiras de embate nas auto-estradas estão sujeitas a grande poluição devido ao ambiente envolvente, como a impactos de diversa ordem no seu tempo de vida, revelando em certos casos durabilidade insuficiente quando construídos com betão armado convencional.

Em Setembro de 2006, foram aplicadas camadas de UHPRFC em barreiras de embate pertencentes a uma ponte rodoviária com elevada intensidade de tráfego em Zurique. A aplicação desta camada protectora teve como intenção reduzir as deformações devido a impacto, beneficiando da capacidade de deformação introduzida pelas fibras e a diminuição da permeabilidade reduzindo a capacidade de infiltração de água e cloretos.

A camada protectora aplicada teve uma espessura de 3 cm, que segundo estudos anteriores levaria a uma capacidade de resistência à tracção de 10 MPa com uma durabilidade 20 vezes superior ao betão armado convencional em bom estado.

O UHPRFC utilizado continha 1100 kg/ m³ de cimento, 26% de sílica de fumo em relação à quantidade de cimento, quartzo esmagado, 6% de fibras metálicas em relação ao volume total, superplastificante, verificando-se uma razão A/C de 0,17.

Quatro meses após a aplicação, não foi verificada qualquer tipo de fendas nas barreiras.



Figura 8. 9 - Barreiras protectoras de embate reabilitadas com UHPRFC, Brühwiler e Denarié, 2008

8.1.9 Reforço estrutural de membros de plataformas petrolíferas

A plataforma Sabah Shell em Agosto de 2006 precisava de um maior poder de suporte de cargas e de resistência à força das ondas devido à implementação de novas funcionalidades. Para tornar possíveis os novos métodos produtivos, era indispensável o aumento da resistência de alguns membros situados entre 30 a 50 metros abaixo do nível das águas do mar.

O material para reforço utilizado foi o UHPC designado de Ducorit S5 com 130 MPa de resistência à compressão e um módulo de elasticidade de 55 GPa. Para a injeção do UHPC de reforço foram perfurados os elementos a reforçar onde foram inseridas mangueiras com elementos de monitorização, para verificação da eficiência do reforço.

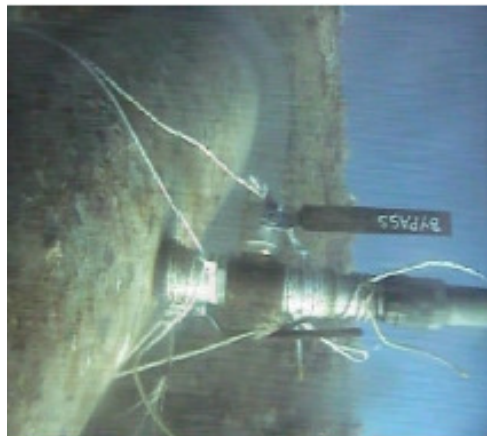


Figura 8. 10 - Injecção de UHPC nos elementos de suporte da plataforma Sabah Shell (Malásia), Densit, 2006

O trabalho de enchimento de cada elemento reforçado era dado como finalizado quando o completo preenchimento deste era verificado num orifício previamente efectuado e monitorizado no topo do elemento.

A alta viscosidade do UHPC empregue previne a possível mistura das partículas de cimento com a água.

Outro modo de utilização do UHPC neste tipo de estruturas evitando os furos nos membros é o recurso ao encamisamento dos elementos a reforçar, colocando cofragens metálicas para posterior enchimento com UHPC entre a cofragem e o membro, técnica que foi utilizada na

Venezuela em 1991 para protecção ao ataque de cloretos no lago de Maricaibo, num pontão de extracção de petróleo. Antes da colocação das cofragens o material deteriorado foi decapado. Doze anos depois desta reparação foram feitas inspecções e a estrutura não mostrava sinais de degradação.



Figura 8. 11 - Elementos de suporte revestidos com UHPC contra a corrosão, Densit

8.1.10 Reabilitação de pilar de uma ponte, Zurique (Suíça)

O pilar de uma ponte em betão armado, adjacente a uma estrada movimentada na Suíça, sujeito à acção de sais no descongelamento do gelo e a diversos impactos após 40 anos de utilização foi reabilitado em 2007, utilizando o material UHPRFC nas zonas mais expostas, garantindo durabilidade e resistência mecânica.



Figura 8. 12 - Pilar reabilitado na Suíça, Brühwiler e Denarié, 2008

Para a protecção do pilar foram utilizadas várias placas pré-fabricadas de UHPFRC com 4 cm de espessura concedendo ao pilar um escudo protector, para que uma futura reabilitação não seja necessária visto que este apoio da ponte situa-se nas proximidades de auto-estrada muito movimentada.

Depois de ser removido uma camada superficial de 10 cm do pilar contaminada com cloretos, as placas pré-fabricadas com altura máxima de 4 m foram coladas umas às outras através de resina epoxi e os restantes espaços entre estas e o betão armado existente preenchidos com argamassa auto-compactável.

O UHPFRC utilizado continha 1300kg/m^3 de cimento e ainda sílica de fumo, grãos de quartzo, fibras de aço e uma razão A/C de 0,155.

É esperado que a baixa permeabilidade do UHPFRC, resolva os problemas de intrusão dos cloretos e de água, aumentando a durabilidade do pilar.

8.1.11 Reforço de laje industrial, Genebra (Suíça)

Uma laje com 50 anos de utilização num edifício industrial constituída por betão armado convencional e com uma área de 720 m², necessitava de ser reforçada com o objectivo de aumentar a sua capacidade resistente tanto à compressão como à tracção por flexão.

Para isso em 2007 a laje foi reforçada com uma camada de UHPRFC aplicada superiormente com uma espessura de 4 cm. A camada de reforço além de conter as fibras de aço do UHPRFC, continha armaduras passivas com objectivo da necessidade de reforço da laje não só à compressão, mas também à flexão.

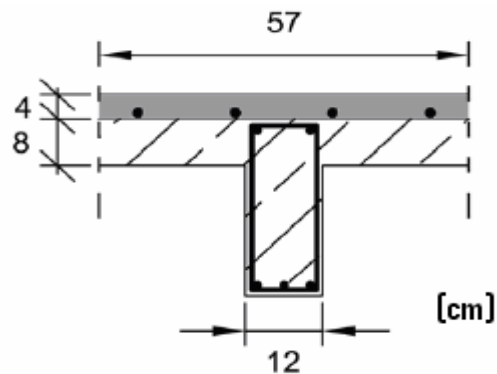


Figura 8.13 - Secção transversal da laje reforçada com a camada de UHPRFC (cinzento), Brühwiler e Denarié, 2008

8.1.12 “Carpete voadora”, Estrasburgo (Bélgica)

A diminuição de espessura dos elementos estruturais devido à não necessidade de utilização de armaduras passivas e aço pré-esforçado, não só diminui o peso da estrutura como em termos estéticos poderão ser elaboradas obras de beleza extraordinária.

Caso disso é a chamada “carpete voadora” com 4,5 cm de espessura na parte central e 2,5 cm nos bordos, que serve de entrada do Museu Ungerer, aberto ao público em 2007.



Figura 8. 14 - “Carpete voadora”, Museu Ungerer, sítio da Lafarge

A rampa de acesso a este museu é feita em UHPC, sem adição de armaduras passivas proporcionando uma espessura muito pequena. Os poucos apoios necessários para o seu suporte dão a sensação de esta estar a levitar. O comprimento total desta entrada é de 49 m, disposto ao longo de várias curvas com uma inclinação máxima de 4%, permitindo uma boa harmonia com o jardim envolvente.

8.1.13 Ampliação do aeroporto internacional de Tóquio (Japão)

É considerado um dos maiores projectos efectuados até hoje com UHPC (DUCTAL), iniciado em Julho de 2007 e aberto ao tráfego aéreo em Outubro de 2010.

A ampliação consistia na construção de uma nova pista totalmente sobre o mar, para isso foram utilizadas lajes de UHPC, suportadas por uma complexa estrutura de pilares de aço.



Figura 8. 15 - Nova pista do aeroporto internacional de Tóquio construída sobre o mar

A redução de custos na construção da estrutura de suporte deveu-se à grande redução do peso das lajes devido a serem constituídas por UHPC. Além da redução do peso das lajes, o UHPC permite uma boa durabilidade da estrutura a ataques de cloretos (devido à proximidade do mar) e uma boa resistência à fadiga (devido à constante aterragem e descolagem de aeronaves).

Foram pré-fabricadas cerca de 7000 lajes com as dimensões de 7,8 x 3,6 m, o que é equivalente aproximadamente à área de 20 campos de futebol. As lajes foram pré-esforçadas e continham uma altura efectiva de 13,5 cm.

Em testes de aferição da capacidade das lajes verificou-se uma capacidade resistente de 600 kN por roda. Em termos comparativos entre a utilização de uma laje de betão convencional pré-esforçado e a utilização adoptada, verifica-se uma redução de 64% do peso próprio.

8.1.14 Outras aplicações

Outras aplicações, uma delas bem simples mas não menos importante, são aplicadas um pouco por todo o mundo. Em seguida são apresentadas duas execuções uma delas ainda em fase de estudo.

Em 1999 na ilha da Reunião (França), para protecção da estrada paralela ao mar foram colocados 6300 tetrapodes (quebra-mares). Os tetrapodes foram constituídos por fibras de polímero, sendo garantia de durabilidade e resistência à fadiga devido ao embate das ondas do mar. A não introdução de armaduras põe de parte a corrosão destas.



Figura 8. 16 - Tetrapodes constituídos por UHPC na ilha da Reunião, Acker e Behloul, 2004

As bancadas dos estádios desportivos são normalmente compostas por betão armado convencional. Na construção dos estádios tem-se em conta o conforto em relação às vibrações e a quantidade de peso próprio é determinante para projectar a estrutura de suporte.

A utilização de UHPC nas bancadas dos estádios é uma solução que permite uma redução do peso próprio, maior durabilidade, maior tempo de vida útil sem custos de manutenção.

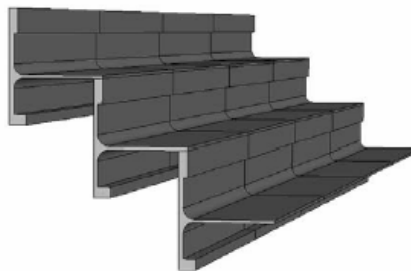


Figura 8. 17 – Representação esquemática de bancadas de estádio em UHPC, Rebentrost e Wight, 2008

A secção australiana da empresa suíça VSL efectuou testes comparativos entre protótipos de bancadas em betão armado convencional e UHPC. As características mais significantes comparadas são apresentadas no quadro seguinte, para trechos de bancadas de 13 metros.

Quadro 8.3 - Comparação de algumas características entre trechos de bancada em betão convencional e UHPC, Reberntrost e Wight, 2008

| | Betão convencional | UHPC |
|--|--------------------|---------------------------|
| Peso próprio (ton) | 8,6 | 4,2 |
| Deformação (mm) | 6,5 | 4,0 |
| Frequência do 1º Modo de vibração (Hz) | 7,6 | 12,5 |
| Durabilidade | Aceitável | Significativamente melhor |

O factor assinalável é a diminuição do peso próprio desta amostra para metade por parte do UHPC em relação ao homólogo em betão armado convencional, permitindo reduções nos custos directos da estrutura de suporte e uma mais rápida montagem das bancadas. O conforto em relação às vibrações é substancialmente aumentado como demonstra a maior frequência do 1º modo de vibração, diminuindo o período de actuação da vibração na estrutura.

Esta aplicação está em fase de desenvolvimento por parte da empresa VSL cujo UHPC empregue é o DUCTAL, para construções de raiz e reconstruções de estádios na Austrália, Nova Zelândia, Suíça e Reino Unido.

Capítulo 9

CONCLUSÕES

O HPC e UHPC são materiais a que se tem dado cada vez mais importância ao longo dos tempos nos países mais desenvolvidos em engenharia, em grande parte devido aos elevados custos de reparação de estruturas realizadas em betão armado convencional.

A introdução mais frequente deste material no mercado, pretende que custos de reparação ou mesmo de substituição das estruturas sejam evitados. Para isso esta gama de materiais, fornece um aumento da durabilidade do betão, capaz de resistir aos agentes agressores e aumentar o tempo de vida útil em cerca de 30 anos.

Apesar destas vantagens de durabilidade conferidas às estruturas e como é típico de um produto em fase de introdução no mercado, a sua utilização requer custos iniciais elevados, estando neste momento em mais larga escala aplicada a obras de arte, de maior envergadura, como é o caso das pontes.

O ascendente actual da utilização do UHPC nas pontes deve-se não só por estas exigirem um maior tempo de vida útil, como também a implementação na indústria da pré-fabricação de elementos de UHPC, originários de uma produção em série que economiza a produção do UHPC, bem como torna a sua inserção em obra mais eficaz, diminuindo o tempo de interrupção de tráfego e de construção da estrutura.

O melhor comportamento à flexão que as fibras introduzidas no UHPC trouxeram, foi também um grande impulso para a expansão do UHPC nas pontes.

Além da melhoria em relação ao comportamento à flexão promovido pelo UHPC, este material é capaz de introduzir vantagens na sua utilização tais como:

- Redução das dimensões dos elementos estruturais, permitindo um maior espaço útil disponível, reduzindo a produção de betão e a poupança de tempo na sua implementação.

- Redução do peso próprio das estruturas, resultando na diminuição dos elementos de fundação.
- Redução da quantidade de cofragens utilizadas, ganho de tempo na cofragem e descofragem dos elementos estruturais, devido à obtenção de resistências iniciais elevadas.
- Capacidade de construir edifícios altos de maior dimensão, substituindo a construção metálica utilizada nestes edifícios.
- Vãos maiores e menor quantidade de vigas para uma mesma carga actuante.
- Redução do número de apoios e fundações de suporte, devido ao aumento dos vãos.
- Baixa retracção e deformações.
- Maior rigidez, devido ao aumento do módulo de elasticidade.
- Maior resistência a ataques químicos, à acção do gelo-degelo, à propagação da largura das fendas, protecção das armaduras, resultando num material mais durável, conferindo maior tempo de vida útil às estruturas.
- Redução da manutenção e dos custos inerentes.

Observando-se a quantidade de vantagens da utilização do UHPC, prevê-se adaptações do equipamento de produção do material, para uma utilização em maior escala.

As questões ambientais cada vez mais debatidas no quotidiano, poderão ser uma ajuda para a implementação do UHPC em maior quantidade de estruturas. Na constituição do UHPC é característico figurar subprodutos industriais que possuem capacidades cimentícias. Estas capacidades tornam-lhes bons substitutos do cimento, produto responsável pela emissão de grande quantidade de CO₂ para a atmosfera. Além das propriedades cimentícias, estes subprodutos industriais em muito contribuem para as características de durabilidade e mecânicas caracterizadoras do UHPC.

A utilização de todas as capacidades do UHPC na prática ainda não é uma realidade, a implementação de códigos internacionais, nomeadamente o que se encontra em preparação pela FIB, que será o primeiro código internacional deste material, poderá ser um impulsionador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelrazing, B., 2008: “*Properties & Applicatinos of CeraCem Ultra High Performance Self Compacting Concrete*”, International Conference on Construction and Building Technology, 2008.

Aboud-Zeid, M. N.; Fahmy, E. H.; Massoud, M. T., 2002: “*Interaction of Silica Fume and Polypropylene Fibers in High Performance Concrete*”, 2º Material Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Québec, Junho, 2002.

Acker, P.; Behloul, M., 2004: “*DUCTALTechnology: a Large Spectrum of Properties, a Wide Range of Applications*”, Proceedings of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº3, Kassel, Germany, Setembro, 2004.

Aïtcin, P.-C., 1998: High - Performance Concrete, E & FN SPON, Londres e Nova Iorque, 1998.

Almansour, H.; Lounis, Z., 2008: “*Structural Performance of Precast Prestressed Bridge Girders Built with Ultra High Performance Concrete*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Almeida, I. R., 2001: “*Os materiais constituintes e as principais características de durabilidade do concreto*”, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Agosto, 2001.

ARCHES, 2009: “*Recommendations for the Use of UHPFRC in Composite Structural Members*”, Novembro, 2009, pp.4.

Azevedo, A. F. F. L. C., 2002: “*Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*”, Dissertação de Doutorado, Universidade do Minho, Julho, 2002.

“*BAEL 91 révisé 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites*”, Fasc. 62 - Titre premier, section 1 du CCTG – travaux section 1: béton armé, Fevereiro 2000.

Behloul, M.; Batoz, J.-F., 2008: “*DUCTALapplications over the last Olympiad*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Behloul, M.; Bayard, O.; Resplendino, J., 2006: “*DUCTAL Prestressed Girders for a Traffic Bridge in Mayenne, France*”, 7th International Conference on Short & Medium Span Bridges, Montere, Quebec, Canadá, Agosto, 2006, pp.9.

"*BPEL 91, révisé 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites*", Fascicule n° 62 – Titre I – Section II, Abril, 1999.

Brühwiler, E.; Denarié, E., 2008: “*Rehabilitation of concrete structures using Ultra – High Performance Fibre Reinforced Concrete*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, n°10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Caldarone, M. A., 2009: *High-Strength Concrete – a practical guide*, Taylor & Francis, Nova Iorque, 2009.

CIMPOR: “*Como utilizar a Gama Cimpor*”, sítio da Cimpor.

CNR, 2007: “*Guide for the Design and Construction of Fibre-Reinforced Concrete Structures*”, Roma, Novembro, 2007.

Coutinho, A. de S., 1988: “*Fabrico e propriedades do betão*”, Vol. I, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1998.

Coutinho J. S., 1998: “*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*”, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho, 1998.

Densit: “*Case History, Corrosion protection of piles – Ducorit S5*”.

Densit: “*Case History, Structural Upgrade of Jacket Member Strengthening with Ducorit, Sabah Shell, Malaysia*”.

Densit: “*Case History, Well Integrity Services – Barrow Island, Western Australia*”.

Densit, 2008: “*Data Sheet Ducorit – ultra high performance grout*”, Janeiro, 2008.

Densit: “*Foundation of Samsøe Offshore Wind Farm – Ducorit D4*”.

Densit, 2005: “*Offshore News*”, Newsletter n°2, Abril de 2005.

EFNARC/EFCA, 2006: “*Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete*”, Setembro, 2006.

Farhat, F. G.; Karihaloo, B. L., 2004: “*Performance of RC Beams Retrofitted with Cardifrc after Thermal Cycling*”, School of Engineering, Cardiff University, 2004.

Ferraris, C. F., 1999: “*Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report*”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, ACI, Vol. 104, n°5, Setembro-Outubro, 1999.

FHWA, 2006: “*Material Property Characterization of Ultra – High Performance Concrete*”, FHWA-HRT-06-103, Agosto, 2006.

FHWA, 2006: “*Optimized Sections for High-Strength Concrete Bridges Girders – Effect of Deck Concrete Strength*”, FHWA-HRT-05-058, Outubro, 2006.

FIB: “*Commission 8*”, 2008.

Gowripalan, N.; Gilbert, I. R., 2000: “*Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams*”, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Australia, Maio, 2000.

Graybeal, B. A.; Hartmann, J. L., 2002: “*Ultra High Performance Concrete Material Properties*”, 2003 Transportation Research Board Conference, Novembro, 2002.

Grupo VICAT: “*Béton Composite Vicat – Vicat’s composite concrete*”.

Grupo VICAT, 2004: “*Fiche technique BCV Fibres Métalliques*”, Outubro, 2004.

Hajar, Z.; Lecointre, D.; Simon, A.; Petitjean, J., 2004: “*Design and Construction of the first Ultra – High Performance Concrete road bridges*”, Proceedings of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, n°3, Kassel, Germany, Setembro, 2004.

Hájek, P.; Fiala, C., 2008: “*Environmentally optimized floor slabs using UHPC – contribution to sustainable building*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, n°10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Harris, D. K., 2010: “*Application of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for Sustainable Building Components*”, US-Israel Workshop on: Sustainable Buildings – Materials and Energy, Haifa, Julho, 2010.

Harris, D. K., 2004: “*Characterization of Punching Shear Capacity of Thin UHPC Plates*”, Dissertação de Mestrado, Virginia Polytechnic and State University, Dezembro, 2004.

<http://en.sw-umwelttechnik.com/> [consultado a 20 Maio 2011]

Japan Society of Engineers Civil, 2008: “*Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HFRCC)*”, Março, 2008.

Kiilu, B. M., 2002: “*Punching Shear in High Strength Steel Fibre Reinforced Concrete Slabs*”, Dissertação de Mestrado, University of Cambridge, Agosto, 2002.

Lafarge: “*Product Data Sheet CS1000*”.

Lafarge: “*Product Data Sheet JS1000*”.

Maeder, U.; Lallemand-Gamboa, I.; Chaignon, J.; Lombard, J.-P., 2004: “*Ceracem, a new high performance concrete: characterizations and applications*”, Proceedings of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº3, Kassel, Germany, Setembro, 2004.

Malier, Y., 1992: *High Performance Concrete – From material to structure*, E & FN Spon, Londres, 1992.

Mehta, K., 2008: “*Concreto sustentável*”, *téchne*, 139ª edição, Outubro, 2008, pp.24-28.

Moeller, A., 2008: “*Use of UHPC in offshore wind turbine foundations*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Molin, D. C. D.; Vieira, F. M. P.; Wolf, J.: “*Concreto de Alta Resistência*”.

Monai, B.; Schnabl, H., 2008: “*Practice of UHPC in Austria*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Nawy, E. G., 2002: *Fundamentals of High-Performance Concrete*, 2ª edição, John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque, 2002.

NP EN 206-1, 2007: “*Especificação, desempenho, produção e conformidade. Parte 1: Betão*” Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2007.

NP EN 934-2, 2009: “*Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem.*” Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2009.

Perry V. H.; Seibert, P. J., 2008: “*The use of UHPFRC (Ductal) for bridges in North America: The technology, applications and challenges facing commercialization*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Perry V. H.; Zakariasen, D., 2003: “*Overview of UHPC Technology, Materials, Properties, Markets and Manufacturing*”, Concrete bridge conference, 2003.

Peters, H.; Bänziger, H.; Poltera, M., 2008: “*Durable adhesive bonding with epoxy resins in civil engineering construction*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Pliskin, L., 1992: “*High performances concretes – engineering properties and code aspects*”, High Performance Concrete – From material to structure, E & FN Spon, Londres, 1992.

Prisco, M.; Lamperti, M.; Lapolla, S.; Khurana, R. S., 2008: “*HPFRCC thin plates for precast roofing*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

Rebentrost, M.; Wight, G., 2008: “*Experience and Applications of Ultra- high Performance Concrete in Asia*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

RILEM, 1999: “*Concrete durability*” – *An approach towards performance testing*”, Materials and Structures, Vol. 32, nº 32, Abril, 1999, pp. 163-173.

RILEM TC 162-TDF, 2003: “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete – Background and Experiences-*”, Proceeding of the RILEM TC 162-TDF Workshop, RILEM Publications s.a.r.l., Bochum, Alemanha, 2003, pp.2-31.

RILEM TC 162-TDF, 2000: “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete*”, Materials and Structures, Vol. 33, nº 225, Janeiro-Fevereiro, 2000, pp. 3-5.

RILEM TC 162-TDF, 2001: “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete*”, Materials and Structures, Vol. 34, nº 235, Janeiro-Fevereiro, 2001, pp. 3-6.

RILEM TC 162-TDF, 2000: “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete*”, Materials and Structures, Vol. 33, nº 226, Março, 2000, pp. 75-81.

RILEM TC 162-TDF, 2003: “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete*”, Materials and Structures, Vol. 36, nº 262, Outubro, 2003, pp. 560-567.

SETRA/AFGC, 2002: “*Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations*”, Janeiro, 2002.

Shi, C.; Mo, Y. L.; Dhonde, H. B., 2008: High - Performance Construction Materials – Science and Applications, Engineering Materials for Technological Needs – Vol. 1 World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., New Jersey e Londres, 2008, pp. 19-90.

Sika: “*Concrete Handbook*”, 2000.

Teixeira, A. C.; Martins, J. G., 2003: “*Materiais de Construção – Betões de Elevado Desempenho*”, 1ª edição, 2003.

Ulm, F.-J; Acker, P., 2008: “*Nanoengineering UHPC Materials and Structures*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.

University of Memphis: “*Design and Control of Concrete Mixtures*”, pp. 299-314.

Voo, Y. L.; Foster, S. J., 2008: “*Malaysia First Ultra-High Performance Concrete Prestressed Motorway Bridge: Experimental Verification*”, 5th Int’l Specialty Conference on Fibre Reinforced Materials, Singapura, Agosto, 2008, pp.170.

Walraven, J., 2008: “*On the Way to Design Recommendations for UHPFRC*”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, nº10, Kassel, Germany, Março, 2008.