



# Inovação em betões

## Nova normalização e produção de betões especiais



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil



Parque de Exposições de Braga  
Feiras Internacionais

Aires Camões  
Rui Miguel Ferreira

**INOVAÇÃO EM BETÕES**  
**Nova normalização e produção de betões especiais**



# **INOVAÇÃO EM BETÕES**

## **Nova normalização e produção de betões especiais**

Comunicações do Seminário

Parque de Exposições de Braga  
21 de Setembro de 2006

Editado por

**AIRES CAMÕES**  
*Departamento de Engenharia Civil*  
*Universidade do Minho*

**RUI MIGUEL FERREIRA**  
*Departamento de Engenharia Civil*  
*Universidade do Minho*

Texto elaborado a partir da reprodução directa dos originais preparados pelos autores.  
Os editores não se responsabilizam por possíveis erros ou omissões.

# Índice

Prefácio	VII
<b>NOVA NORMALIZAÇÃO</b>	<b>IX</b>
<b>1. Evolução da normalização dos betões</b>	<b>1</b>
MANUEL JOÃO ESTEVES FERREIRA (LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)	
<b>2. A Directiva comunitária dos Produtos de Construção - Perguntas frequentes sobre a directiva</b>	<b>7</b>
MARIA ODETE FERNANDES (LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)	
<b>3. Classificação requisitos e métodos de verificação</b>	<b>25</b>
ARLINDO GONÇALVES (LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)	
<b>4. Especificação, controlo da conformidade e controlo da produção</b>	<b>31</b>
JOÃO CARLOS DUARTE (APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto)	
<b>PRODUÇÃO DE BETÕES ESPECIAIS</b>	<b>47</b>
<b>5. Possibilidades e desafios do betão auto compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real</b>	<b>49</b>
JOAQUIM A.O. BARROS, EDUARDO N.B. PEREIRA, SIMÃO P.F. SANTOS, LÚCIO A.P. LOURENÇO (UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)	
<b>6. Aplicações de BAC à escala real</b>	<b>69</b>
SANDRA NUNES, HELENA FIGUEIRAS, ANA MARIA PROENÇA, JOANA SOUSA COUTINHO, JOAQUIM FIGUEIRAS (FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LABEST)	
<b>7. Betões de elevado desempenho</b>	<b>81</b>
AIRES CAMÕES (UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)	
<b>8. Projecto de durabilidade de betão</b>	<b>101</b>
RUI MIGUEL FERREIRA (UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)	



## Prefácio

Nos últimos anos, tem sido produzida nova normalização nacional e europeia no domínio dos betões. Esta actividade normativa, entre outros factores, pretende acompanhar tanto as evoluções recentes surgidas ao nível do material, com o advento dos betões de elevado desempenho e dos betões autocompactáveis, por exemplo, como as novas abordagens no sentido de propiciar a construção de estruturas de betão armado mais duráveis, capazes de cumprir eficazmente longos períodos de vida útil e novas preocupações, relacionadas com a sustentabilidade da construção, abrangendo os materiais eco eficientes.

Neste contexto, o presente Seminário pretende ser um veículo de transmissão do conhecimento acerca das inovações recentes relacionadas com o betão. Considera-se este o momento propício para divulgar junto da comunidade técnica alguns dos trabalhos efectuados por especialistas nacionais, fomentando desta forma a discussão sobre o presente e o futuro do betão na construção.

Esta publicação reúne as comunicações apresentadas, onde resultados importantes são expostos e analisados por especialistas.

Um agradecimento muito sincero e especial merecem os conferencistas e autores das comunicações, que prontamente se disponibilizaram a partilhar o seu conhecimento, demonstrando a qualidade da investigação desenvolvida neste domínio e ajudando, assim, ao cumprimento dos objectivos propostos para este evento.

Temos esperança que este Seminário venha a ser útil para os participantes e os sensibilize para as questões abordadas.

Braga, 21 de Setembro de 2006

Aires Camões  
Rui Miguel Ferreira





# **Nova Normalização**



## **Evolução da normalização dos betões**

Manuel João Esteves Ferreira <sup>1\*</sup>

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Centro da Qualidade na Construção  
Av. do Brasil, 101 – 1700-066 Lisboa, Portugal*

### RESUMO

Refere-se a estrutura geral das modernas normas europeias e nacionais, nomeadamente das normas de produto e, em relação ao betão, listam-se os aspectos evolutivos introduzidos nas normas portuguesas desde a publicação da primeira norma de betão em 1993. Perspectivam-se os próximos desenvolvimentos no seio da Comissão Técnica de Normalização Europeia CEN/TC 104-Betão.

### 1. INTRODUÇÃO

A normalização dos betões foi evoluindo com a crescente actividade do Comité Europeu de Normalização (CEN), em que Portugal participa através do Instituto Português da Qualidade (IPQ), e com a atribuição ao CEN, pela Comissão Europeia (CE), da execução das normas europeias harmonizadas na sequência da publicação em 1990 da Directiva dos Produtos da Construção (DPC), que visa, em última instância, eliminar barreiras ao comércio comunitário destes produtos.

Recorda-se que em 1971 foi publicado (Dec. N.º 404/71, de 23/9) o primeiro “Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos”, actualizado em 1989 (Dec.-Lei n.º 445/89, de 30/12), e é já em 1995 que se tornou regulamentar, pelo Decreto-Lei n.º 330/95, de 7 de Maio, a norma portuguesa NP ENV 206:1993 – “Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade”, ainda em vigor.

Recentemente, foi proposto ao Governo um projecto de legislação que, continuando a orientação geral de legislar por referência a normas, torna regulamentares as normas portuguesas NP EN 206-1:2005 – “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”, NP ENV 13670-1:2005 – “Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras gerais”, e três Emendas a estas normas, legislação que se espera seja aprovado e publicado até finais deste ano de 2006 ou princípios de 2007.

Este projecto legislativo tornou-se necessário por a NP EN 206-1 não ser norma harmonizada, isto é, por a CE não ter ainda emitido ao CEN um Mandato para a sua produção.

A norma portuguesa NP ENV 206 não foi influenciada pela DPC (a norma provisória europeia ENV 206 é de 1990); recorde-se que a primeira norma harmonizada de produtos da

---

<sup>1</sup> Engenheiro Civil e Investigador-Coordenador (LNEC); Presidente da CT 104 – Betão no ONS/ATIC.

\* [estevesterreira@sapo.pt](mailto:estevesterreira@sapo.pt) ; [cimento.atlc@atlc.pt](mailto:cimento.atlc@atlc.pt)

construção é a EN 197-1:2000 sobre cimentos correntes e é já portanto deste século XXI. Mas já a NP EN 206-1 é nitidamente influenciada pela estruturação das normas harmonizadas.

Apresenta-se a seguir a estrutura geral das normas, para depois se destacar a evolução sofrida pela normalização dos betões e perspectivar o seu próximo futuro.

## 2. A ESTRUTURA GERAL DAS NORMAS

As normas estão basicamente divididas em:

- **normas de produto**, listando fundamentalmente as propriedades que garantem a aptidão do produto para o uso estabelecido na norma;
- **normas de ensaio**, definindo os métodos para a determinação do valor das propriedades listadas nas normas de produto;
- **normas de execução**, estabelecendo as regras para a correcta utilização do produto durante a execução da obra em que ele fica inserido.

As normas de produto estão actualmente organizadas em secções, que se podem considerar agrupadas em 3 núcleos:

- num primeiro núcleo, estão as secções respeitantes ao **Preâmbulo/Introdução**, ao **Objectivo/Campo de Aplicação**, às **Referências normativas** e às **Definições**, de que o mais importante é o Objectivo/Campo de Aplicação por definir “que produto a norma serve”;
- num segundo núcleo, que se poderia considerar ser o “núcleo duro” da norma, estão os **Requisitos** (conjunto das propriedades físicas, químicas e outras que definem a aptidão do produto para o uso pretendido, respectivos métodos de determinação e, às vezes, classificação/categorização), os **Crítérios de conformidade** (a aplicar a cada propriedade) e a **Avaliação da conformidade** (conjunto de métodos que permitem verificar a conformidade do produto com a norma). Quando esta Avaliação tem um texto extenso, é em geral tratada numa Parte 2 da norma, constituindo a Parte 1 a norma de produto propriamente dita;
- num terceiro núcleo, nem sempre presente, podem existir outras secções, como Constituintes, Designação normalizada, Amostragem, Marcação e rotulagem.

Finalmente, as normas de produto, quando são harmonizadas, isto é, feitas sob Mandato da CE ao CEN, contêm ainda o **Anexo ZA**, que estabelece quais as secções que são de cumprimento obrigatório no Espaço Económico Europeu (EEE), constituído pelos Estados da União Europeia e da Associação Europeia de Comércio Livre, satisfazendo a DPC (em Portugal satisfazendo o Dec.-Lei n.º 113/93, de 10 de Abril, que transpõe a DPC)

Note-se que, antes da publicação da DPC e mesmo antes da publicação das primeiras normas harmonizadas, além deste **Anexo ZA**, também as disposições da secção **Avaliação da Conformidade** que extravasavam o controlo da conformidade pelo produtor não existiam nas normas de produto. Entendia-se que estas disposições faziam parte da certificação dos produtos, uma matéria que então se considerava não dever integrar a normalização.

Na prática, este Anexo ZA transforma a norma num regulamento, ficando a ele obrigado, primeiro, o produtor por não poder colocar no mercado produtos sem que estes tenham aposta a marcação CE, e depois os utilizadores e os organismos de inspecção e de certificação. Tal resulta da marcação CE significar que:

- o produto está conforme com a respectiva norma europeia harmonizada e é, portanto, apto para o uso pretendido;
- a responsabilidade por esta conformidade e aptidão é, exclusivamente, do produtor;
- se pode presumir, em consequência, que as obras que incorporam produtos da construção com marcação CE satisfazem as Exigências Essenciais estabelecidas na DPC, se forem devidamente projectadas, construídas e conservadas.

A listagem das propriedades que definem a aptidão ao uso dos produtos que constam do Anexo ZA é feita pela Comissão em cada Mandato, relacionando as propriedades destes com as Exigências Essenciais que as obras devem satisfazer durante a sua utilização, estabelecidas na DPC. Esta listagem contém, pelo menos, todas as propriedades que os Estados Membros do EEE têm nos seus regulamentos ou disposições normativas; podem, no entanto, não ser listadas no Anexo ZA as propriedades que não sejam necessárias para a satisfação, pelas obras, das Exigências Essenciais da DPC.

As normas portuguesas, que transcrevem normas europeias, terminam com um Anexo Nacional NA (informativo) (excepto se são normas harmonizadas, porque então o último anexo é o Anexo ZA) com a correspondência entre as normas Europeias citadas e as portuguesas se estas tiverem sido traduzidas e publicadas. De facto não é possível “traduzir” uma norma EN por NP EN, pois a NP EN correspondente pode não existir ainda. Note-se ainda que na NP ENV 206 não existe esta correspondência; embora com designação muito semelhante exista um anexo com conteúdo diferente, como abaixo se refere.

### 3. EVOLUÇÃO DAS NORMAS PORTUGUESAS DE BETÃO

#### 3.1 Normas de produto

As normas NP ENV 206 e NP EN 206-1 (como também a NP ENV 13670-1) são constituídas pela tradução da correspondente Norma Europeia, definitiva (EN) ou pré-norma (ENV), e pelo Documento Nacional de Aplicação (DNA, que na NP ENV 206 se designou por “Anexo NA (Anexo Nacional)”) com disposições nacionais que ou são expressamente permitidas pela EN (ou pela ENV) ou a completam por estas serem consideradas insuficientes.

Estes DNA fazem assim parte integrante destas NP – é como se a parte das EN que elas substituem não existisse e a parte que complementam ou completam fizesse parte da EN (ou da ENV). Note-se que se estas normas fossem harmonizadas, o DNA não era permitido, exactamente porque torneava a harmonização da normalização comunitária que a DPC fundamentalmente estabelece.

Uma primeira diferença, estrutural, entre as normas NP ENV 206 e a NP EN 206-1, é que da primeira foram retirados as secções relativas à colocação, compactação, cura e protecção do betão para integrarem a norma NP ENV 13670-1. Considerou-se assim que estas matérias não deviam fazer parte duma norma de produto, antes deviam integrar uma norma de execução. Na prática vamos ter duas normas tratando do betão – a NP EN 206-1, como norma de produto, e a NP ENV 13670-1, como norma de execução – naturalmente sobre aspectos que se complementam e que na NP ENV 206 ainda em vigor não estão separados.

Proximamente, portanto, vão ser obrigatórias, como norma portuguesa do produto betão, a NP EN 206-1:2005, com as suas Emendas A2:2006 (a Emenda A1 está integrada na NP EN 206-1) e Emenda 1:2006; a norma portuguesa de execução do produto betão (juntamente com a execução das estruturas de betão) vai ser a NP ENV 13670-1:2005, com a sua Emenda 1:2006, complementando ainda as disposições construtivas do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP), que data de 1983.

A evolução materializada na nova norma do produto betão diz respeito fundamentalmente:

- 1) à especificação dos materiais constituintes do betão, recorrendo às normas harmonizadas entretanto produzidas (excepção feita às pozolanas e à água de amassadura).
- 2) aos requisitos de durabilidade e à classificação das condições ambientais, complementarmente estabelecidos na Especificação LNEC E 464 (substituindo os da LNEC E 378, referida

na NP ENV 206) e na permissão de especificar o betão por propriedades de desempenho, concretizada na LNEC E 465, que integra os princípios, aplicáveis a esta matéria, estabelecidos na EN 1990:2002 – “Eurocode. Basis of structural design” e, no que respeita ao betão armado e pré-esforçado, na EN 1992-1-1:2004 – “Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1 – Design rules and rules for buildings”.

3) à extensão das classes de resistência à compressão do betão normal e pesado até C100/115 (a NP ENV limita a C50/60) e ao estabelecimento das classes de resistência do betão leve.

4) às regras para utilização das adições, quer do tipo I (quase inertes) quer do tipo II (pozolânicas ou hidráulicas latentes), concretizada na Especificação LNEC E 464, nomeadamente para aplicação do conceito de betão equivalente. Aperfeiçoou-se assim muito o estabelecido na LNEC E 378 da NP ENV 206 sobre adições.

5) ao estabelecimento do conceito de famílias de betões para o controlo da conformidade da resistência à compressão do betão.

6) à identificação das responsabilidades do especificador, do produtor e do utilizador do betão.

7) à reestruturação completa das matérias que a NP ENV 206 designa por “Procedimentos para o Controlo da Qualidade”, constituindo uma das mais importantes alterações introduzidas pela EN 206-1, disseminado por 3 secções: Controlo da conformidade e critérios de conformidade, Controlo da produção e Avaliação da conformidade. Basicamente, tal resulta da EN 206-1:

- considerar que o responsável pela produção do betão fresco e pela avaliação da conformidade dos requisitos especificados (pelo especificador) para o betão é o produtor, estruturando para tal, de forma exaustiva, (i) os ensaios iniciais e (ii) o controlo da produção (incluindo neste o controlo da conformidade);

- recomendar a inspecção do controlo da produção e a sua certificação por organismos para tal reconhecidos, estabelecendo as regras para a avaliação, fiscalização e certificação do controlo de produção.

Em consequência, enquanto a NP ENV 206 estabelece regras para ensaios de recepção de algumas propriedades (consistência, resistência à compressão, teor de ar, e eventualmente outras), a NP EN 206-1 apenas admite a realização do que designou por “ensaios de identidade” quando existirem dúvidas acerca da qualidade de uma amassadura, ou de uma carga ou em casos especiais requeridos pelas especificações de projecto.

A este propósito, o projecto de Dec.-Lei referido na introdução estabelece uma alteração a esta regra, alargando o âmbito de aplicação destes ensaios, que devem ser realizados, em geral, pelo utilizador, como são na ENV 206.

### 3.2 Norma de execução

A NP ENV 13670-1 é uma norma europeia nova e contém disposições relativas à execução das estruturas de betão que concretizam artigos do REBAP que eram mais desideratos que regras de execução, nomeadamente nas secções “Tolerâncias geométricas” e “Inspecção”. Quanto ao betão, a NP EN 206-1 estabelece, na secção “Betonagem”, novas regras relativas à colocação, compactação e cura do betão, a executar pelo utilizador. A norma não se limita a estabelecer regras, mas fá-las acompanhar por Guias, nomeadamente de um “Guia sobre betonagem”. Praticamente omissa no que respeita a ensaios de recepção dos aços para armaduras, corrigiu-se esta omissão na Emenda 1 a esta norma.

Na NP ENV 13670-1 foram também integrados aspectos relativos à execução provinidos das versões iniciais da EN 1992-1-1 – “Eurocódigo 2. Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regas gerais e regras para edifícios”.

Relacionadas com o betão existem ainda duas normas de execução:

- EN 14487-2:2006 – Betão projectado. Parte 2: Execução.
- NP EN 446: 2002 – Caldas de injeção. Procedimentos para injeção.

#### 4. PERSPECTIVAS DA PRÓXIMA REVISÃO

A necessidade de se complementar com disposições nacionais estas normas de betão tem sido responsável por um grande atraso na sua adopção como normas portuguesas e, consequentemente na sua regulamentação. De facto, a ENV 206 foi publicada pelo CEN em Março de 1990 e a NP ENV 206 publicada em Outubro de 1993 e tornada regulamentar pelo Dec.-Lei n.º 330/95, de 14 de Dezembro, mais de 5 anos depois. Foi a estruturação e publicação da especificação LNEC E 378 a principal responsável por este atraso, mas ele foi largamente compensado pelo avanço normativo exibido pela NP ENV 206 em relação à época em que esta foi publicada.

Também agora se passou algo semelhante, com a publicação das 3 Especificações LNEC e 461, E 464 e E 465, fundamentalmente relacionadas com a durabilidade, antecipando decisões solicitadas em boa parte pela próxima homologação e entrada em vigor da NP EN 1992-1-1 – “Eurocódigo 2. Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regas gerais e regras para edifícios” e que estão a ser integradas no DNA desta norma. Há no entanto que ser feito um esforço para encurtar bastante estas dilacões.

A próxima revisão da EN 206-1 está agendada para se iniciar em 2010 e entre as preocupações dum Comité de Coordenação do CEN/TC 104/SC1 para revisão da norma estão:

- 1) a conformidade, para melhor adequar os requisitos da CPD no que a este tema diz respeito, facilitando um próximo “betão europeu”;
- 2) normalização de novos betões, como o betão autocompactável;
- 3) a durabilidade, normalização de propriedades de desempenho do betão face às acções ambientais e utilização das adições, temas tratados naquelas Especificações de forma mais actual que na EN 206-1;
- 4) e, the last but not the least, uma resposta mais satisfatória das normas de betão às questões levantadas pela Exigência Essencial 3 da DPC – “Higiene, saúde e ambiente”.

Se as duas primeiras intenções se consideram relativamente concretizáveis, já as duas últimas não é claro que o sejam dentro de 5 anos.

A questão da durabilidade ficou mais facilitada depois da associação científica Federação Internacional do Betão Estrutural (*fib*) ter produzido este ano de 2006 um “Model Code for Service Life Design”, com conteúdo algo semelhante à E 465. Levará porém tempo até que alguns coeficientes relevantes sejam fixados, mas, pelo menos, ficaram assentes as propriedades de desempenho para as acções ambientais – que já estão na E 465.

Finalmente, as questões relativas à Exigência Essencial 3. A determinação das propriedades dos produtos que permitem às obras satisfazer a Exigência Essencial 3 - emissão de radiações, libertação de metais pesados, de compostos de carbono poliaromáticos e de substâncias perigosas - tem sido remetida, excepcionalmente, para as legislações nacionais, o que é contra o espírito da DPC. Com os Mandatos ao CEN sobre materiais em contacto com a água (M/136) e sobre substâncias perigosas (M/366) este problema encontra-se sob pressão no CEN, mas longe ainda de solução harmonizada.

#### 5. REFERÊNCIAS

Harrison, T., Concrete Standards update, *Concrete*, August 2006.



*fib*, Model Code For Service life design, *fib* Bulletin 34, February 2006.

## **A Directiva comunitária dos Produtos de Construção Perguntas frequentes sobre a directiva**

Maria Odete Fernandes

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, 101 – 1700-066 Lisboa, Portugal*

### RESUMO

Passados 17 anos sobre a publicação pela Comissão Europeia da Directiva dos Produtos de construção e 13 anos depois da sua transposição para a legislação nacional em Portugal, ainda não é possível afirmar que a directiva se encontra em pleno funcionamento.

Neste artigo, apresenta-se a directiva sob a forma de perguntas frequentes, efectuando simultaneamente um breve ponto de situação do seu estado actual de implementação.

### 1. PORQUE SURGE UMA DIRECTIVA PARA OS PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO?

Tal como todas as directivas da “Nova Abordagem”, esta directiva surge para harmonizar as exigências essenciais de segurança, saúde e ambiente dos produtos de construção e assim facilitar a sua livre circulação no Mercado Interno Europeu alargado ao Espaço Económico Europeu (EEE)<sup>1</sup>.

Os mercados nacionais dos produtos de construção basearam-se sempre em regulamentação e normalização nacionais para atingir a qualidade e segurança nas obras de construção. A regulamentação, diferente de Estado Membro para Estado Membro da União Europeia (UE), também serviu durante anos como um instrumento de protecção das indústrias nacionais de produtos de construção.

A UE instituiu vários instrumentos legais para a abertura do mercado entre os quais as directivas da “Nova Abordagem”<sup>2</sup>, e a “Abordagem Global”<sup>3</sup>, onde se inclui a directiva 89/106/CE dos produtos de construção (DPC).

As directivas que continham anteriormente referências técnicas pormenorizadas passam a estabelecer na nova abordagem, como regras básicas, o princípio da colocação do produto no mercado, o cumprimento de exigências essenciais de segurança, saúde e ambiente - remetendo para especificações técnicas europeias as características e desempenho dos produtos - e a utilização da marcação CE como evidência do cumprimento dos requisitos das directivas. A abordagem global veio complementar estas regras, definindo e estabelecendo os sistemas de comprovação a efectuar para a demonstração da conformidade e o recurso a organismos qualificados como competentes e notificados à CE para actuar neste âmbito.

---

<sup>1</sup> EEE: Países da União Europeia e a Islândia, o Liechtenstein e a Noruega, da EFTA.

<sup>2</sup> Resolução de Conselho de Ministros da UE de 7 de Maio de 1985.

<sup>3</sup> Resolução do Conselho de Ministros da UE, de 21 de Dezembro de 1989.

## 2. O QUE TRATA A DIRECTIVA DOS PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO?

A directiva regulamenta as condições para a colocação no mercado dos produtos de construção, visando a sua livre circulação no Espaço Económico Europeu.

As directivas comunitárias são de transposição obrigatória nos países membros da UE, tendo a directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988, para produtos de construção (DPC) alterada pela directiva 98/68/CEE de 22 de Julho, sido transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei 113/93 de 13 de Abril. Alterações foram introduzidas pelos Decreto-Lei nº 139/95 de 14 de Junho e Decreto-Lei nº 374/98 de 24 de Novembro bem como pela Portaria nº 566/93 de 2 de Junho.

Esta directiva aplica-se a todos os produtos de construção, abrangendo assim uma vasta gama de produtos definidos como “produtos a ser incorporados de modo definitivo numa obra de construção” e tem a particularidade única das exigências essenciais de cumprimento obrigatório não serem directamente referenciadas aos produtos objecto da directiva, mas às obras onde estes são incorporados. Parte-se do princípio que os produtos de construção por si só não têm influência na segurança dos utilizadores mas que o seu comportamento se torna relevante em termos de segurança e bem-estar apenas quando incorporados nas obras (que abrangem edificações, pontes, estradas e outras obras de engenharia civil). As exigências essenciais da DPC são:

- Resistência mecânica e estabilidade
- Segurança em caso de incêndio
- Higiene, saúde e protecção do ambiente
- Segurança na utilização
- Protecção contra o ruído
- Economia de energia e isolamento térmico

A directiva requer que estas exigências sejam satisfeitas durante um prazo economicamente razoável, pelo que se pode considerar que a directiva introduz ainda uma exigência adicional que é a durabilidade.

A nível nacional é o Instituto Português da Qualidade (IPQ) que acompanha a implementação da directiva, sendo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), organismo aprovado responsável pela emissão de Aprovações Técnicas Europeias e pelo acompanhamento das acções relacionadas com esta actividade.

## 3. O QUE SÃO AS NORMAS EUROPEIAS HARMONIZADAS?

As normas europeias harmonizadas no âmbito desta directiva são os documentos normativos que especificam as características dos produtos de modo a satisfazerem as exigências essenciais da directiva. Estas normas são elaboradas para os produtos de construção por solicitação (“mandato”) da Comissão Europeia ao CEN – Comité Europeu de Normalização.

Um dos objectivos da DPC é substituir as normas e homologações nacionais dos produtos de construção por um conjunto harmonizado a nível europeu de especificações técnicas para esses produtos.

As normas harmonizadas relativas a produtos, por princípio voluntárias, tornam-se na DPC obrigatórias *de facto*, uma vez que são o único meio de se relacionar as características dos produtos com as exigências essenciais das obras, essas sim obrigatórias.

Estas normas europeias contêm partes “harmonizadas” ou seja, as que dão resposta ao estabelecido nos mandatos da Comissão Europeia, abrangendo os conteúdos dos

regulamentos dos Estados Membros e partes “não harmonizadas” que contêm características importantes dos produtos mas que não têm carácter regulamentar. O CEN, organismo europeu de normalização, que trabalha na elaboração de normas europeias desde 1961, adaptou a estrutura das normas para dar resposta adequada aos requisitos da Comissão Europeia. Essa estrutura inclui um anexo informativo ZA (correspondente Capítulo 8 nas aprovações técnicas europeias) que relaciona os capítulos da norma com o mandatado pela Comissão Europeia através das partes:

- ZA.1: Contém quadros com as referências aos capítulos da norma (partes harmonizadas) que dão resposta ao mandato da Comissão Europeia. O cumprimento destes pontos permite pressupor que o produto está adequado para o fim a que destina.
- ZA.2: Procedimentos de Comprovação da Conformidade, isto é, metodologias estabelecidas para demonstrar a conformidade dos produtos com as especificações técnicas.
- ZA.3: Marcação e etiqueta CE que, afixadas num produto, lhe dão presunção de conformidade com os requisitos essenciais da directiva.

#### 4. O QUE É E QUANDO SOLICITAR UMA APROVAÇÃO TÉCNICA EUROPEIA?

Se um produto de construção é inovador, se não existem normas harmonizadas aplicáveis ou se não puder ser elaborada uma norma europeia para esse produto, deve ser solicitada pelo fabricante a elaboração de uma aprovação técnica europeia (ETA – *European Technical Approval*) a um organismo aprovado (em Portugal, ao LNEC). Este documento técnico (semelhante ao actual Documento de Homologação do LNEC) visa avaliar o provável desempenho do produto face às suas condições de utilização.

As ETA são elaboradas de acordo com os princípios estabelecidos em Guias de orientação preparados para famílias de produtos (ETAG) pela *European Organization for Technical Approval* -EOTA. Até Julho de 2006 foram emitidos cerca de 500 Aprovações Técnicas Europeias ao abrigo de 23 Guias. Quando não se justifica a elaboração de um Guia ETAG para uma família de produtos então a EOTA elabora um CUAP-*Common Understanding of Approval Process*, documento específico para o produto em causa.

Uma aprovação técnica é emitida uma vez, para um produto, e aplicável em todo o Espaço Económico Europeu. O LNEC tem disponível no seu sítio Internet as regras para solicitar uma Aprovação Técnica Europeia.

#### 5. O FABRICANTE É OBRIGADO A SEGUIR AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS HARMONIZADAS?

O fabricante ou o seu representante na Comunidade Europeia deve seguir as especificações técnicas harmonizadas. Como se referiu anteriormente, estes documentos harmonizados relativos a produtos, tornam-se na DPC obrigatórias *de facto*, pois são documentos normativos elaborados a partir de uma actividade estruturada e mandatada pela Comissão Europeia tornando-se o único meio de fazer a relação entre as características técnicas dos produtos e as exigências essenciais aplicadas às obras e obrigatórias pela directiva.

## 6. EXISTEM JÁ ELABORADAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS HARMONIZADAS PARA TODOS OS PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO?

Actualmente estão disponíveis 54% das normas previstas.

De um conjunto de cerca de 550 normas programadas e já em preparação para a efectiva aplicação da directiva, 300 estão publicadas e citadas no Jornal Oficial da União Europeia (JOUE), correspondendo a produtos já passíveis de cumprimento da directiva e de marcação CE e 56 estão aprovadas mas ainda não citadas no JOUE. Só após referenciadas no JOUE é que estas normas se tornam aplicáveis no âmbito da DPC.

Com base nos 23 Guias de Aprovação Técnica Europeia, foram emitidos cerca de 500 ETAs a nível europeu, documentos que são elaborados por produto e por fabricante.

Enquanto não existem especificações técnicas harmonizadas para os produtos, aplicam-se as regulamentações nacionais devendo porém as autoridades nacionais ter em conta o princípio do reconhecimento mútuo no âmbito do Tratado que instituiu a Comunidade Económica Europeia. Devem ser aceites os ensaios e inspecções efectuados aos produtos provenientes de outros Estados Membros, de acordo com as exigências da legislação nacional.

## 7. SE O PRODUTO ESTIVER CONFORME COM AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PODE SER COMERCIALIZADO EM QUALQUER ESTADO MEMBRO DA UE?

As diferentes condições geográficas e climáticas dos países europeus requerem o cumprimento de certos níveis e classes que tenham em conta a performance dos produtos para as condições particulares dos países onde os mesmos são aplicados. Para além de ter de cumprir os requisitos exigidos nesses países, a marcação CE deverá referir essa situação. Assim, o simples cumprimento das especificações técnicas, por exemplo, em Portugal, pode não dar acesso imediato ao mercado de um outro país, por exemplo, do Norte da Europa.

## 8. COMO POSSO DEMONSTRAR QUE O PRODUTO ESTÁ CONFORME COM A DIRECTIVA?

Para demonstrar que o produto está conforme com os requisitos da directiva e portanto com as especificações técnicas aplicáveis, deve ser aposta a marcação CE no produto, na etiqueta, na embalagem ou na documentação que o acompanha (estará definido na especificação técnica a opção adequada), e ser emitida pelo Fabricante uma “Declaração de Conformidade CE”.

De acordo com os requisitos da directiva, para o fabricante emitir a declaração de conformidade, deve sujeitar o produto à verificação das suas características de desempenho cumprindo satisfatoriamente o sistema de comprovação da conformidade que foi definido como o mais adequado para o produto. O sistema a adoptar e que vem referenciado na norma harmonizada, é seleccionado de entre a gama de sistemas de comprovação criados especificamente no âmbito desta directiva e que são os seguintes.

Quadro 1 Produtos de construção. Sistemas de comprovação da conformidade: tipos de sistemas, correspondentes actividades e entidades intervenientes

	<b>Designação codificada dos sistemas</b>					
	<b>1+</b>	<b>1</b>	<b>2+</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>ACTIVIDADES DOS SISTEMAS</b>						
Ensaio inicial de tipo	ON	ON	FAB	FAB	ON	FAB
Controlo de produção na fábrica	FAB	FAB	FAB	FAB	FAB	FAB
Certificação do controlo de produção na fábrica	ON	ON	ON	ON		
Acompanhamento do controlo de produção na fábrica	ON	ON	ON			
Ensaio aleatório de amostras	FAB	FAB	FAB			
Inspeção inicial do controlo de produção na fábrica	ON					

ON - Tarefas do Organismo Notificado

FAB - Tarefas do Fabricante ou do seu representante na UE

Qualquer que seja o sistema de comprovação da conformidade estabelecido, inclui sempre a realização de ensaios iniciais e a implementação pelo fabricante de um sistema de controlo de produção na fábrica. A certificação do sistema da qualidade do fabricante de acordo com a norma EN ISO 9001:2000 poderá, após análise, ser aceite pelo Organismo Notificado como prova de certificação do sistema de controlo de produção na fábrica.

Após efectuar as tarefas de comprovação da conformidade exigidas, o fabricante emite uma Declaração de Conformidade, suportado, quando for caso disso, no Certificado de Conformidade emitido pelo organismo notificado interveniente.

## 9. O QUE SÃO ORGANISMOS NOTIFICADOS?

Os organismos notificados são organismos de certificação, organismos de inspecção ou laboratórios de ensaio competentes para trabalharem no âmbito da directiva para actividades de comprovação da conformidade e que devem ser qualificados e notificados à Comissão Europeia pelas autoridades dos Estados Membros.

Em Portugal, estes organismos são notificados pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), para a respectiva actividade, por produtos e por especificação técnica harmonizada.

Esses organismos trabalham no Espaço Económico Europeu o que significa que um fabricante em Portugal pode recorrer a um organismo notificado<sup>4</sup> em qualquer Estado Membro para efectuar a necessária actividade de comprovação da conformidade tal como ensaios ao produto ou auditorias ao controlo de produção na fábrica.

## 10. COMO SE PROVA A COMPETÊNCIA DOS ORGANISMOS NOTIFICADOS?

O processo de qualificação dos organismos notificados tem por base o cumprimento dos critérios estabelecidos no Anexo III da directiva. Sendo critérios muito genéricos para a qualificação, as entidades notificadoras recorrem às normas europeias (da série de normas EN 45000) ou internacionais (da série de normas ISO 17000) que definem critérios de competência de organismos de comprovação da conformidade.

<sup>4</sup> Lista de Organismos Notificados pode ser consultada em <http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/nando/>

Alguns países como Portugal recorrem por vezes à acreditação para ter a garantia dada pelo Organismo de Acreditação, independente e autorizado para o efeito (em Portugal o Instituto Português de Acreditação - IPAC) de que os organismos notificados são competentes para a actividade que exercem no âmbito da directiva.

A fim de interpretar, harmonizar e trocar experiências sobre a actividade desenvolvida, estes organismos reúnem-se no *Group of Notified Bodies* (GNB), criado por iniciativa da CE, que desenvolve procedimentos uniformes e transparentes para o seu funcionamento. Em Portugal foi criado o seu *mirror group* com os organismos nacionais notificados no âmbito desta directiva, o Grupo dos Organismos Notificados Portugueses (GONP), coordenado pelo IPQ, também com actividades de harmonização e aproximação de critérios.

## 11. O QUE É A MARCAÇÃO CE?

A marcação CE num produto simboliza a conformidade do produto com os requisitos comunitários que lhe são aplicáveis. Sempre da responsabilidade do fabricante ou do seu representante na União Europeia, a marcação CE é um meio de evidência de que o produto foi objecto dos procedimentos de comprovação da conformidade apropriados e está adequado para o fim a que se destina por satisfazer as exigências essenciais da (s) directiva(s) e portanto as especificações técnicas aplicáveis.

Um produto sujeito a mais do que uma directiva deverá cumprir os requisitos de todas as directivas a que está sujeito para poder apor a marcação CE.

Para os utilizadores dos produtos de construção com marcação CE, a informação técnica contida na etiqueta da marcação, complementada com a restante informação constante da especificação técnica harmonizada, dará toda a informação necessária sobre a aptidão ao uso do produto para o fim a que se destina.

Graficamente, a marcação CE deverá ter as dimensões regulamentares<sup>5</sup> e conter as informações técnicas do produto referidas nas respectivas especificações técnicas harmonizadas (eg, identificação do fabricante, os últimos dois dígitos do ano de afixação da marcação CE, a referência ao número do organismo notificado quando houver, o número do Certificado CE de Conformidade, etc..).

Na Figura 1 apresenta-se um exemplo geral desta marcação.

## 12. A ETIQUETA DA MARCAÇÃO CE TEM A MESMA INFORMAÇÃO PARA QUALQUER ESTADO MEMBRO DESTINATÁRIO?

Se um Estado Membro não tem regulamentação para uma determinada característica, então a etiqueta CE nesse país poderá não declarar o valor dessa característica, apresentando no seu lugar a referência NPD (*No Performance Determined*). Assim, o conteúdo da marcação CE pode não ser o mesmo para os diferentes Estados Membros. O fabricante deverá certificar-se que os valores declarados das características dos seus produtos abrangem os níveis de exigência regulamentar nos países europeus onde os coloca.

A marcação CE pode conter mais ou menos informação, nomeadamente, conforme o tipo de produto, as propriedades regulamentares inerentes e o sistema de comprovação da conformidade aplicado. Pode ser também necessário, complementar essa informação em documentação separada, com informação suplementar por exemplo quando se tratar de substâncias perigosas.

---

<sup>5</sup> Directiva 93/68/CE de 22 de Julho transposta pelo Decreto-Lei 139/95 de 14 de Junho.

Quando solicitado, nomeadamente pelas autoridades, os documentos que suportam a marcação CE (como a Declaração e o Certificado de Conformidade CE) deverão ser apresentados na língua do País onde está a ser comercializado.

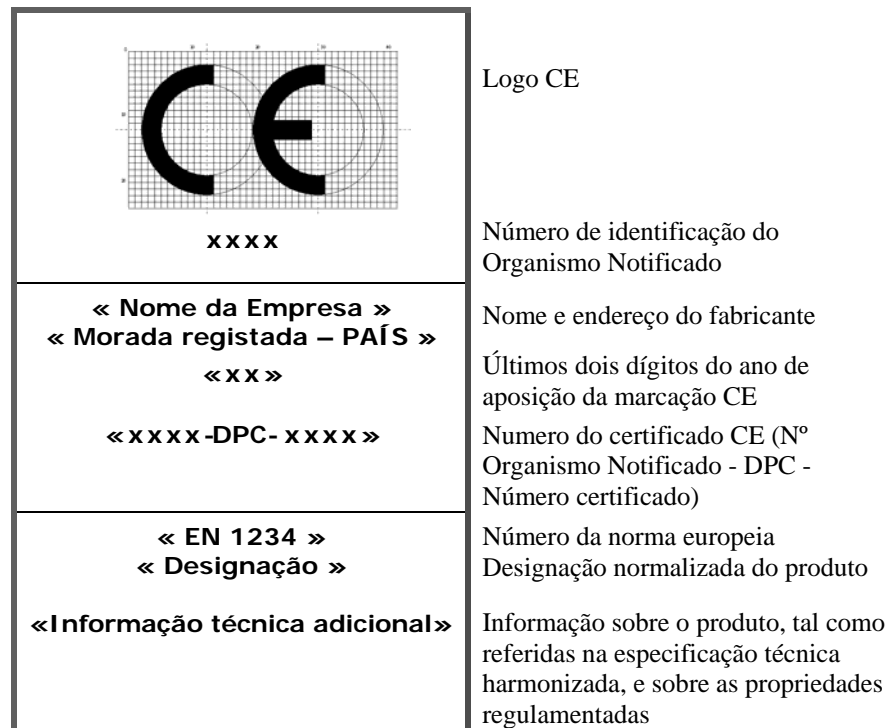


Figura 1 – Exemplo de marcação CE

### 13. QUAL O PAPEL DAS MARCAS VOLUNTÁRIAS FACE À MARCAÇÃO CE?

Uma marca de certificação voluntária pode coexistir com a marcação CE. No âmbito voluntário, a marca é concedida por um organismo de certificação de produtos e atribuída no âmbito de um processo de certificação que consiste em geral em ensaios, auditoria ao sistema da qualidade do fabricante e um acompanhamento regular ao produto e ao sistema da qualidade.

Enquanto a aposição da marcação CE no produto é da inteira responsabilidade do fabricante, é um garante do cumprimento das regras mínimas de segurança do produto, é um símbolo que se destina em primeiro lugar às autoridades para comprovação de que os produtos cumprem as disposições regulamentares das directivas comunitárias tornando-se num passaporte para a livre circulação do produto no Espaço Económico Europeu, a marca voluntária é uma marca cujo uso é autorizado por um organismo de certificação de produtos, cujas características vão para além das de uma marca de segurança é uma marca que se destina essencialmente ao consumidor directo, indicando a conformidade com normas e o envolvimento e o parecer independente de uma terceira parte (Organismo de Certificação).

Uma marca voluntária pode ser dada em conjunto com a marcação CE, desde que não o seja com base nos mesmos pressupostos legais da marcação CE, desde que não estabeleça ou sugira valores contraditórios ao da marcação CE ou desde que a sua utilização não seja passível visualmente de se confundir com a marcação CE<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> *Guidance Paper D: CE Marking under the Construction Products Directive*



Quadro 2 - Situações comparáveis nos âmbitos regulamentar e voluntário

ÂMBITO REGULAMENTAR	ÂMBITO VOLUNTÁRIO
Marcação CE é da responsabilidade do fabricante	Uso da marca de conformidade é autorizada pelo Organismo de Certificação “dono” da marca
Obrigatória conformidade com requisitos essenciais das directivas	Obrigatória conformidade com requisitos estabelecidos nas normas de referência
Procedimentos de comprovação de conformidade são estabelecidos por Decisão da CE e referenciados pelas normas europeias harmonizadas	Sistemas de certificação são estabelecidos pelo organismo de certificação (OC) e orientados por procedimentos do OC
Organismo competente é qualificado e designado pelas autoridades (Organismo Notificado)	Organismo de certificação é acreditado por um Organismo de Acreditação
Há “Notificação” dos organismos competentes	Há “reconhecimento” dos organismos competentes
Marcação CE	Marca de conformidade voluntária
Controlo de mercado efectuado e suportado pelas autoridades	Controlo do produto certificado é efectuado pelo OC tanto no fabricante como no mercado

O sucesso de uma marca voluntária depende muitas vezes do sector e até da área geográfica onde se aplica, sendo a visibilidade e o impacto das marcas o factor chave do seu sucesso. No entanto, outros factores importantes intervêm no reconhecimento das marcas voluntárias, tais como a competência, imagem e credibilidade do organismo de certificação envolvido, sendo os resultados das verificações do organismo de certificação aceites como úteis e válidos, e o impacto do seu significado reconhecido no mercado do sector.

Fabricantes e consumidores poderão ter benefícios se adquirem produtos com marcas de conformidade reconhecidas uma vez que as características do produto são confirmadas por uma entidade independente permitindo também ao consumidor distingui-los, pela qualidade evidenciada, entre a gama de produtos disponíveis no mercado.

#### 14. COMO CONTROLAR O PRODUTO NO MERCADO?

As directivas da nova abordagem visam garantir a segurança e confiança dos utilizadores prevendo uma actuação sobre o produto antes e depois da colocação deste no mercado.

Antes da colocação no mercado, através da actuação “preventiva” do fabricante e dos organismos notificados que efectuem procedimentos de comprovação da conformidade de acordo com os termos da directiva, e depois da colocação no mercado, onde as autoridades podem detectar, através de procedimentos de controlo de mercado, os produtos que não exibem a marcação CE e que portanto não se podem presumir conformes com as especificações técnicas harmonizadas ou que a exibem inadequadamente.

A marcação CE no caso da DPC, deve ser acompanhada de um conjunto de informação adicional essencial à identificação e caracterização correcta do produto, como por exemplo os valores declarados das características desse produto (eg resistência ao desgaste, reacção ao fogo, isolamento térmico, resistência à compressão e tracção, etc.) e, quando for caso disso, a referência ao organismo notificado interveniente.

A DPC prevê a actuação de organismos nacionais de controlo de mercado que devem assegurar que os produtos de construção colocados no mercado nacional cumprem os requisitos da directiva.

Em Portugal, a transposição da directiva 89/106/CE para o direito nacional foi efectuada através do Decreto-Lei 113/93 de 10 de Abril. Entre as autoridades nacionais tem existido divergência de interpretação sobre a obrigatoriedade da aposição da marcação CE nos produtos. Uma vez que a nível comunitário é clara esta obrigatoriedade, espera-se que esta situação legal fique clarificada com a revisão já em curso do Decreto-Lei referido.

A actividade do controlo de mercado, sendo uma componente essencial da estratégia da Comissão Europeia de protecção do consumidor, é uma actividade da responsabilidade dos Estados Membros (EMs) da EU, desenvolvida por autoridades nacionais, em Portugal a ASAE – Autoridade de Segurança Alimentar e Económica.

O sistema RAPEX de comunicação existente a nível comunitário, permite que os resultados do controlo de mercado de qualquer Estado Membro se repercutam nos outros EMs. Por exemplo, se um produto for retirado do mercado em França por colocar em causa a segurança na sua utilização tendo ou não aposta a marcação CE, o mesmo produto, através de informação fornecida pelo sistema RAPEX, poderá ser retirado do mercado nos outros países comunitários pelas entidades responsáveis dos outros EMs sem necessidade de qualquer outra fundamentação.

## 15. QUAL O PONTO DE SITUAÇÃO A NÍVEL EUROPEU?

Decorridos 17 anos sobre a sua publicação, não se poderá afirmar que a implementação da directiva esteja a ser totalmente eficaz e uniforme na Europa. O inquérito lançado pela Comissão Europeia (ponto 17) visa identificar pormenorizadamente os pontos críticos da sua implementação, estando no entanto desde já a ser tomadas medidas sobre situações mais evidentes e habituais como por exemplo a necessidade de maior harmonização dos critérios adoptados pelos Estados Membros para a notificação e a clarificação dos módulos e dos procedimentos para a comprovação da conformidade<sup>7</sup>.

A Comissão Europeia apoiada pelo Comité Permanente da Construção (CPC), comité criado pela directiva com representação dos Estados Membros e que acompanha todas as questões relacionadas com a execução e a aplicação prática da directiva, tem vindo a elaborar e divulgar documentação de apoio à implementação da directiva, nomeadamente:

- Foram elaborados treze “*Guidance Papers*”<sup>8</sup>, documentos orientadores e clarificadores sobre, por exemplo, a marcação CE, os níveis e classes na DPC, a classificação europeia de reacção ao fogo, a notificação de organismos;
- Foram elaborados documentos para a aplicação prática da directiva (*Position Papers*)<sup>9</sup>;
- Foram emitidos mandatos (cerca de 40) de normalização ao CEN;
- Foram preparados pela EOTA 23 ETAGs que serviram de base à elaboração de aprovações técnicas europeias e de CUAPs – Figura 2;
- Foram emitidas mais de 80 Decisões da Comissão Europeia estabelecendo os sistemas de comprovação da conformidade.

A Comissão Europeia criou ainda Comissões e Grupos de Trabalho, para desenvolvimento de actividades específicas no âmbito da directiva, dos quais se destaca o Grupo dos Organismos Notificados que, através de subgrupos específicos (SG02-

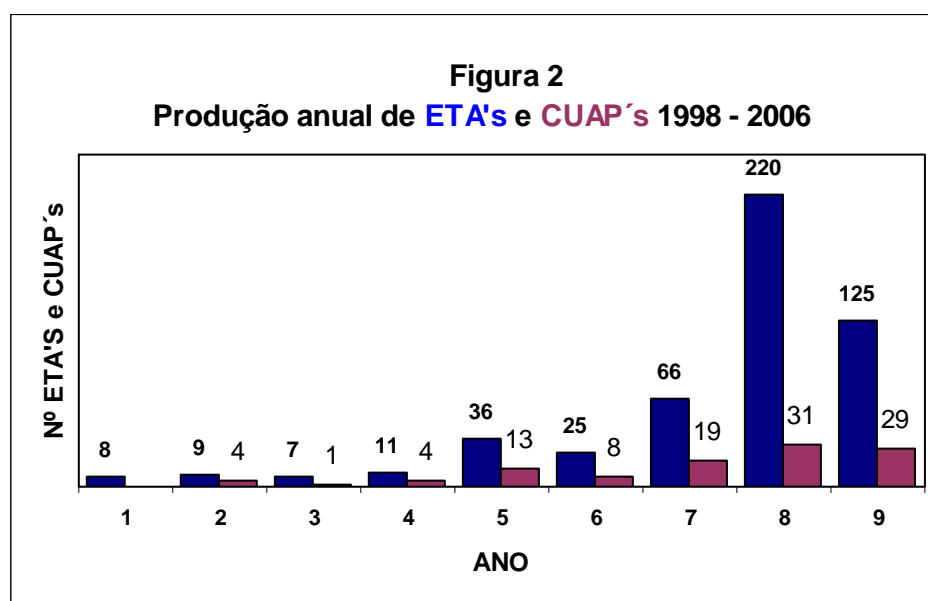
<sup>7</sup> Documentos CERTIF: [http://ec.europa.eu/enterprise/international/doc\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/international/doc_en.htm)

<sup>8</sup> [http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/outros\\_documentos\\_interesse](http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/outros_documentos_interesse)

WG5/*Concrete* no caso do betão), tem desenvolvido documentos técnicos interpretativos e de harmonização para alguns produtos.

No que diz respeito à actividade normativa que é desenvolvida a nível europeu por mais de 70 Comissões Técnicas de Normalização, estão publicadas três centenas de normas harmonizadas. Convém dizer no entanto que essas normas europeias referentes às características dos produtos são complementadas e só se tornam operacionais com as cerca de 1500 normas europeias não harmonizadas de ensaio, classificação e outras propriedades complementares, umas publicadas, outras em fase de preparação.

Existe actualmente um grande número de organismos notificados no âmbito da directiva (ver ponto 9) para efectuar a comprovação da conformidade com as normas harmonizadas já publicadas.



## 16. QUAL O PONTO DE SITUAÇÃO EM PORTUGAL?

As autoridades e organismos nacionais envolvidos têm promovido e participado largamente em acções de divulgação da directiva o que tem contribuído para um maior conhecimento por parte dos agentes económicos e dos consumidores, das implicações desta directiva, nomeadamente, do significado da marcação CE.

Cinquenta e quatro comissões técnicas de normalização nacionais acompanham a actividade normativa europeia. As normas harmonizadas são adoptadas integralmente como normas portuguesas e comercializadas pelo IPQ, Organismo Nacional de Normalização, estando 33 das 300 normas harmonizadas traduzidas para Português.

Incluídas nas normas mandatadas pela Comissão Europeia, está um conjunto normativo actualmente ainda não harmonizado, os eurocódigos estruturais, sobre concepção, projecto e execução de obras, que a médio prazo, virão a integrar o quadro legislativo nacional. Estão publicadas 33 partes destes eurocódigos e em preparação outras 25.

Foi criado o *mirror group* (GONP) do correspondente Grupo Europeu dos Organismos Notificados, coordenado pelo IPQ, que reúne os organismos notificados nacionais e que tem contribuído para uma maior harmonização a nível nacional, acompanhando e complementando a actividade de interpretação e harmonização técnica.

Estão notificados 10 organismos nacionais<sup>10</sup> para diferentes tarefas de comprovação da conformidade previstos nesta directiva.

Em termos gerais, toda esta actividade da directiva dos produtos de construção tem vindo a contribuir para uma melhoria e uma actualização do nosso fraco acervo normativo nacional e também da legislação do sector.

O LNEC, para além de acompanhar a actividade de normalização, disponibilizar as normas europeias para consulta na sua Biblioteca e fazer parte activa do GONP é também um organismo notificado para cimentos, cais, aços, produtos de isolamento térmico e cinzas para betão.

A actividade de controlo de mercado fragilizada pela legislação existente, deverá melhorar com a revisão em curso da legislação.

## 17. QUAL A AVALIAÇÃO GLOBAL DA DIRECTIVA A NIVEL EUROPEU?

A directiva dos produtos de construção foi uma das primeiras a ser objecto por parte da Comissão Europeia de um inquérito público<sup>11</sup>, durante o mês de Abril de 2006, estando a aguardar-se a avaliação dos resultados deste inquérito abrangente mas cujo objectivo primordial é identificar os pontos críticos existentes na implementação desta directiva.

Um dos pontos-chave para a competitividade e desenvolvimento das empresas é o contorno regulamentar onde as mesmas se inserem e que deve ser simples e eficaz. A política comunitária de “*better regulation*”, promove a necessidade da simplificação das legislações através da análise da sua aplicabilidade e da identificação dos pontos críticos do seu funcionamento. No decurso da implementação desta política, o sector da construção foi considerado como um dos domínios prioritários para a avaliação da eficácia global da legislação aplicável neste sector, sendo esse inquérito o primeiro passo para a melhoria da legislação e dos procedimentos deste sector.

## 18. COMO SABER MAIS SOBRE A DIRECTIVA DOS PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO?

Tanto o Laboratório Nacional de Engenharia Civil como o Instituto Português da Qualidade ([www.ipq.pt](http://www.ipq.pt)), entidade responsável por esta directiva, como os organismos notificados para actividades de comprovação da conformidade, estão aptos a dar informações sobre a DPC, gerais ou particulares dos seus sectores.

O LNEC possui um sítio Internet (<http://www.lnec.pt/qpe>) onde pode obter informação geral e específica sobre a directiva dos produtos de construção e sobre outras actividades do LNEC no âmbito da qualidade da construção (homologação, documentos de aplicação, marca de qualidade LNEC, etc.).

A nível europeu a base NANDO criada e gerida pela Comissão Europeia dá informação relevante não só da directiva dos produtos de construção como de todas as outras directivas da nova abordagem: <http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/nando/>.

## 19. REFERÊNCIAS

---

<sup>10</sup> [http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/organismos\\_notificados\\_nacionais](http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/organismos_notificados_nacionais)

<sup>11</sup> [http://ec.europa.eu/enterprise/construction/cpdrevision/cpd\\_cons\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/construction/cpdrevision/cpd_cons_en.htm)

Directiva do Conselho de 21 de Dezembro de 1988 relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-Membros no que respeita aos produtos de construção (Directiva 89/106/CEE).

PAIVA, J. Vasconcelos, Da directiva dos produtos de construção à marcação CE dos produtos prefabricados de betão, Revista ANIPC nº 23 e 24, de Engenharia, 2(2), 123-130 (1990).

Directiva 98/68/CEE do Conselho de 22 de Julho de 1993, que altera várias directivas incluindo a directiva 89/106/CEE (produtos de construção). Jornal Oficial das Comunidades Europeias L220 de 30 de Agosto de 1993, p. L 220/1-L 220/22.

Decreto-Lei 113/93 de 10 de Abril, com as alterações introduzidas pelos Decretos-Leis nº. 139/95 de 14 de Julho e nº. 374/98 de 24 de Novembro. Diário da Republica, I Série - A.

PAIVA, J. Vasconcelos, Breve balanço sobre a directiva dos produtos de construção e a sua aplicação na Europa e em Portugal, Seminário sobre “Qualidade nos materiais e no sector da construção”, Leça da Palmeira, Exponor, 2002-10-30.

European Committee for Standardization (CEN) – Snapshot of the current situation for standards to be sited in the OJ under the CPD. 2006-08-11.

<http://www.cenorm.be/cenorm/>.

Sítio internet da European Organization for Technical Approvals: [www.eota.be](http://www.eota.be)

## ANEXOS INFORMATIVOS – Dados actualizados a Agosto de 2006

### NORMAS APROVADAS E EM PREPARAÇÃO POR FAMILIAS DE PRODUTOS

MANDATO	FAMÍLIA DE PRODUTOS	NORMAS (EN) APROVADAS	NORMAS EM PREPARAÇÃO
M/100	Produtos prefabricados de betão	12	10
M/101	Portas, janelas e produtos conexos	10	2
M/102	Revestimentos de impermeabilização	8	3
M/103	Produtos de isolamento térmico	13	17
M/104	Aparelhos de apoio	5	2
M/105	Chaminés, condutas e produtos conexos	13	4
M/106	Produtos de gesso	12	6
M/107	Geotêxteis	14	2
M/108	Fachadas-cortina	1	
M/109	Sistemas fixos de combate a incêndio	43	14
M/110	Aparelhos sanitários	6	5
M/111	Dispositivos para circulação rodoviária	11	7
M/112	Produtos para estruturas de madeira	4	7
M/113	Placas de derivados de madeira	2	
M/114	Cimentos, cais de construção e outros ligantes hidráulicos	6	
M/115	Aços para betão armado e pré-esforçado	2	2

NORMAS APROVADAS E EM PREPARAÇÃO POR FAMILIAS DE PRODUTOS (cont.)

M/116	Produtos para alvenaria e produtos conexos	11	
M/118	Produtos para sistemas de drenagem de águas residuais	17	4
M/119	Revestimentos de piso	17	3
M/120	Produtos para estruturas metálicas	6	13
M/121	Revestimentos de paredes e tectos	16	8
M/122	Revestimentos de coberturas	13	6
M/124	Produtos para construção rodoviária	4	14
M/125	Agregados	9	
M/127	Colas para construção	1	2
M/128	Produtos para betão, argamassas e caldas de injeção	10	7
M/129	Aparelhos para aquecimento ambiente	6	2
M/131	Tubos, reservatórios e acessórios sem contacto com água destinada ao consumo humano	15	23
M/135	Vidro em edifícios	13	1
M/136	Tubos, reservatórios e acessórios destinados a entrar em contacto com água para consumo humano		5

GUIAS DE APROVAÇÃO TÉCNICA EUROPEIA (ETAGs)

ETAG 001 - 1	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 1: Anchors in general</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 1: Cavilhas em geral
ETAG 001 - 2	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 2: Torque-controlled expansion anchors</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 2: Cavilhas de fixação por expansão com controlo por torção
ETAG 001 - 3	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 3: Undercut anchors</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 3: Cavilhas de fixação no rebaixo
ETAG 001 - 4	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 4: Deformation-controlled expansion anchors</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 4: Cavilhas de fixação por expansão com controlo por deformação
ETAG 001 - 5	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 5: Bonded Anchors</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 5: Cavilhas de fixação por aderência
ETAG 001 - 6	<i>Metal Anchors for Use in Concrete Part 6: Anchors for multiple use for non-structural applications</i>	Cavilhas metálicas para betão Parte 6: Cavilhas para utilização múltipla em aplicações não estruturais
ETAG 002 - 1	<i>Structural Sealant Glazing Systems Part 1: Supported and unsupported systems</i>	Sistemas de vidro exterior colados Parte 1: Sistemas apoiados e não apoiados
ETAG 002 - 2	<i>Structural Sealant Glazing Systems Part 2: Coated Aluminium Systems</i>	Sistemas de vidro exterior colados Parte 2: Sistemas de alumínio lacado
ETAG 002 - 3	<i>Structural Sealant Glazing Systems Part 3: Systems incorporating profiles with thermal barrier</i>	Sistemas de vidro exterior colados Parte 3: Sistemas incorporando perfis com corte térmico
ETAG 003	<i>Internal Partition Kits</i>	Kits para divisórias
ETAG 004	<i>External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering</i>	Sistemas compósitos de isolamento térmico exterior com revestimento aplicado sobre isolante

GUIAS DE APROVAÇÃO TÉCNICA EUROPEIA (ETAGs) (cont.)

ETAG 005	<i>Liquid Applied Roof Waterproofing Kits</i>	Kits para impermeabilização de coberturas aplicada sob a forma líquida
ETAG 006	<i>Systems of Mechanically Fastened Flexible Roof Waterproofing Membranes</i>	Sistemas de membranas flexíveis fixadas mecanicamente para impermeabilização de coberturas
ETAG 007	<i>Timber Frame Building Kits</i>	Kits para edifícios prefabricados com estrutura reticulada de madeira
ETAG 008	<i>Prefabricated Stair Kits</i>	Kits para escadas prefabricadas
ETAG 009	<i>Non load-bearing permanent shuttering kits/systems based on hollow blocks or panels of insulating materials and sometimes concrete</i>	Kits/Sistemas de cofragem perdida não resistente com base em blocos vazados ou placas de materiais isolantes e eventualmente betão
ETAG 010	<i>Self supporting translucent roof kits</i>	Kits autoportantes translúcidos para coberturas
ETAG 011	<i>Light Composite Wood-based Beams and Columns</i>	Vigas e pilares aligeirados compósitos com base em madeira
ETAG 012	<i>Log Building Kits</i>	Kits para edifícios de toros de madeira
ETAG 013	<i>Post Tensioning Kits for prestressing of Structures</i>	Kits/Sistemas de pós-tensão para pré-esforço de estruturas
ETAG 014	<i>Plastic Anchors for ETICS</i>	Cavilhas de material plástico para fixação de sistemas compósitos de isolamento térmico exterior com revestimento aplicado sobre isolante
ETAG 015	<i>Three Dimensional Nailing Plates</i>	Chapas tridimensionais pregadas para estruturas de madeira
ETAG 016	<i>Self-supporting Composite Light Weight Panels - Part 1: General</i>	Painéis leves compósitos autoportantes Parte 1: Geral
ETAG 016	<i>Self-supporting Composite Light Weight Panels Part 2: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in roofs</i>	Painéis leves compósitos autoportantes Parte 2: Aspectos específicos relacionados com painéis leves compósitos autoportantes para uso em coberturas
ETAG 016	<i>Self-supporting Composite Light Weight Panels Part 3: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in external walls and cladding</i>	Painéis leves compósitos autoportantes Parte 3: Aspectos específicos relacionados com painéis leves compósitos autoportantes para uso em paredes exteriores e revestimentos contínuos de paredes exteriores
ETAG 016	<i>Self-supporting Composite Light Weight Panels Part 4: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in internal walls and ceilings</i>	Painéis leves compósitos autoportantes Parte 4: Aspectos específicos relacionados com painéis leves compósitos autoportantes para uso em paredes interiores e tectos
ETAG 017	<i>Veture kits - Prefabricated units for external wall insulation</i>	Kits para "veture" (sistemas compósitos de isolamento térmico de fachadas)
ETAG 018	<i>Fire protective products Part 1: General</i>	Produtos de protecção contra o fogo Parte 1: Produtos de protecção contra o fogo em geral
ETAG 018	<i>Fire protective products Part 2: Reactive coatings for fire protection of steel elements</i>	Produtos de protecção contra o fogo Parte 2: Revestimentos destinados à protecção contra o fogo de elementos metálicos
ETAG 018	<i>Fire protective products Part 3: Rendering and rendering kits intended for fire resisting applications</i>	Produtos de protecção contra o fogo Parte 3: Revestimentos e kits de revestimento destinados à protecção contra o fogo

GUIAS DE APROVAÇÃO TÉCNICA EUROPEIA (ETAGs) (cont.)

ETAG 018	<i>Fire protective products Part 4: Fire protective board, slab and mat products and kits</i>	Produtos de protecção contra o fogo Parte 4: Produtos e Kits de protecção contra o fogo na forma de placas e mantas
ETAG 019	<i>Pre-fabricated wood-based loadbearing stressed skin panels</i>	Painéis prefabricados resistentes com forros de derivados de madeira
ETAG 020	<i>Plastic anchors Part 1: General Part 2: For use in normal weight concrete Part 3: For use in solid masonry materials Part 4: For use in hollow or perforated masonry Part 5: For use in autoclaved aerated concrete and Annexes A,B and C</i>	Cavilhas de plástico Parte 1: Cavilhas de plástico em geral Parte 2: Para utilização em betão corrente Parte 3: Para utilização em alvenaria maciça Parte 4: Para utilização em alvenaria perfurada Parte 5: Para utilização em betão celular autoclavado e Anexos A, B e C
ETAG 021	<i>Cold storage permises kits Part 1: Cold storage room kits</i>	Kits para instalações frigoríficas Parte 1: Kits para câmaras frigoríficas
ETAG 021	<i>Cold storage permises kits Part 2: Cold storage building envelope and building kits</i>	Kits para instalações frigoríficas Parte 2: Kits para edifícios frigoríficos
ETAG 024	<i>Concrete Frame Building Kits</i>	Kits para edifícios prefabricados com estrutura reticulada de betão
ETAG 025	<i>Metal Frame Building Kits</i>	Kits para edifícios prefabricados com estrutura reticulada metálica

EUROCÓDIGOS (Ponto de situação em 2006-08-31)

EN	Título (simplificado)	N.º págs.	CEN	
			Votação/ Aprovação	Publicação (DAV)
1990	Bases de projecto	87	V/A	2002-04
1990/A1	Bases de projecto – Anexo A2: Pontes	32	V/A	2005-12
1991-1-1	Acções – Pesos próprios e sobrecargas	44	V/A	2002-04
1991-1-2	Acções – Fogo	60	V/A	2002-11
1991-1-3	Acções – Neve	56	V/A	2003-07
1991-1-4	Acções – Vento	146	V/A	2005-04
1991-1-5	Acções – Temperatura	47	V/A	2003-07
1991-1-6	Acções – Acções durante a execução	29	V/A	2005-06
1991-1-7	Acções – Acções acidentais	66	V/A	
1991-2	Acções – Tráfego em pontes	160	V/A	2003-09
1991-3	Acções – Acções devidas a gruas e outro equipamento	46	V/A	
1991-4	Acções – Silos e depósitos	103	V/A	2006-06
1992-1-1	Betão – Regras gerais	226	V/A	2004-12
1992-1-2	Betão – Fogo	106	V/A	2004-12
1992-2	Betão – Pontes	90	V/A	2005-10
1992-3	Betão – Estruturas de suporte e reservatórios	24	V/A	



EN	Título (simplificado)	N.º págs.	CEN	
			Votação/ Aprovação	Publicação (DAV)
1993-1-1	Aço – Regras gerais	90	V/A	2005-05
1993-1-2	Aço – Fogo	78	V/A	2005-04
1993-1-3	Aço – Estruturas de chapa enformada a frio	134	V/A	
1993-1-4	Aço – Estruturas de aço inox	36	V/A	
1993-1-5	Aço – Estruturas laminares sem carregamento transversal	53	V/A	
1993-1-6	Aço – Cascas	91	V/A	
1993-1-7	Aço – Estruturas laminares com carregamento transversal	39	V/A	
1993-1-8	Aço – Ligações	130	V/A	2005-05
1993-1-9	Aço – Fadiga	30	V/A	2005-05
1993-1-10	Aço – Tenacidade	13	V/A	2005-05
1993-1-11	Aço – Cabos de alta resistência	36	V/A	
1993-1-12	Aço – Até classe S 700	9	V/A	
1993-2	Aço – Pontes	106	V/A	
1993-3-1	Aço – Torres e mastros	76	V/A	
1993-3-2	Aço – Chaminés	30	V/A	
1993-4-1	Aço – Silos	111	V/A	
1993-4-2	Aço – Reservatórios	54	V/A	
1993-4-3	Aço – Conduitas	37	V/A	
1993-5	Aço – Estacas	104	V/A	
1993-6	Aço – Caminhos de rolamento para gruas e pontes rolantes	37	V/A	
1994-1-1	Mistas – Regras gerais	118	V/A	2004-12
1994-1-2	Mistas – Fogo	109	V/A	2005-08
1994-2	Mistas – Pontes	90	V/A	2005-10
1995-1-1	Madeira – Regras gerais	120	V/A	2004-11
1995-1-2	Madeira – Fogo	70	V/A	2004-11
1995-2	Madeira – Pontes	30	V/A	2004-11
1996-1-1	Alvenaria – Regras gerais	123	V/A	2005-11
1996-1-2	Alvenaria – Fogo	81	V/A	2005-06
1996-2	Alvenaria – Selecção e execução	33	V/A	2006-01
1996-3	Alvenaria – Métodos de cálculo simplificados	41	V/A	2006-01
1997-1	Projecto geotécnico – Regras gerais	167	V/A	2004-11
1997-2	Projecto geotécnico – Prospecção e ensaio	221	V/A	
1998-1	Sismos – Regras gerais	229	V/A	2004-12

EN	Título (simplificado)	N.º págs.	CEN	
			Votação/ Aprovação	Publicação (DAV)
1998-2	Sismos – Pontes	146	V/A	2005-11
1998-3	Sismos – Reforço e reparação de estruturas	89	V/A	2005-06
1998-4	Sismos – Silos, reservatórios e condutas	83	V/A	
1998-5	Sismos – Fundações e estruturas de suporte	44	V/A	2004-11
1998-6	Sismos – Torres, mastros e chaminés	47	V/A	2005-06
1999-1-1	Alumínio – Regras gerais	208	V/A	
1999-1-2	Alumínio – Fogo	59	V/A	
1999-1-3	Alumínio – Fadiga	109	V	
1999-1-4	Alumínio – Chapa enformada a frio	61	V	
1999-1-5	Alumínio – Cascas	70	V	

NOTAS:

1 - As EN 1993-1-1, 1993-1-2, 1993-1-8, 1993-1-9 e 1993-1-10 foram objecto de uma Corrigenda (AC), publicada em 2005-12.

2 - A EN 1995-1-1 foi objecto de uma Emenda (A1), já aprovada.

GUIDANCE PAPERS (Fonte: [http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/outros\\_documentos\\_interesse](http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/outros_documentos_interesse))

GP A	The Designation of Approved Bodies In The Field of The Construction Products Directive
GP B	The Definition of Factory Production Control in Technical Specifications for Construction Products
GP C	The Treatment of Kits and Systems under the Construction Products Directive
GP D	CE Marking under the Construction Products Directive
GP E	Levels and Classes in the Construction Products Directive
GP F	Durability and the Construction Products Directive
GP G	The European Classification System for the Reaction to Fire Performance of Construction Products
GP H	A Harmonized Approach Relating to Dangerous Substances under The Construction Products Directive
GP I	The Application of Article 4(4) of the Construction Products Directive
GP J	Transitional Arrangements under the Construction Products Directive
GP K	The Attestation of Conformity Systems and the Role and Tasks of the Notified Bodies in the Field of the Construction Products Directive
GP L	Application and Use of Eurocodes
GP M	Conformity Assessment under the CPD: Initial Type-testing and Factory Production Control

GUIAS DE APROVAÇÃO TÉCNICA EUROPEIA (ETAGS) E *COMMON UNDERSTANDING OF APPROVAL PROCESS* (CUAPS)

	ETAG Anual	ETAG Acumulados	CUAP Anual	CUAP Acumulados	TOTAL
1998	8				
1999	9	17	4	4	21
2000	7	24	1	5	29
2001	11	35	4	9	44
2002	36	71	13	22	93
2003	25	96	8	30	126
2004	66	162	19	49	211
2005	220	382	31	80	462
2006	125	507	29	109	616

## **Classificação Requisitos e Métodos de Verificação**

Arlindo Gonçalves<sup>1†</sup>

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa, P- 1700-066 Lisboa, Portugal*

### **RESUMO**

Com a publicação de um novo Decreto-Lei que irá revogar o DL n.º 330/95, tornar-se-á de aplicação obrigatória a NP EN 206 e um conjunto de especificações LNEC relacionadas com os constituintes do betão e com a durabilidade das estruturas de betão armado. Assim, para além dos requisitos constantes da EN 206, outros se encontram estabelecidos naquelas especificações, em particular para o betão endurecido.

Na presente comunicação apresentam-se as classificações e os requisitos previstos para o betão e seus constituintes na NP EN 206 e nas especificações LNEC, efectuando depois a sua análise tendo como referência o regulamento ainda em vigor.

### **1. INTRODUÇÃO**

Na regulamentação actual, as exigências de composição do betão constam da NP ENV 206 e, no que se refere às relacionadas com as classes de exposição ambiental, na Especificação LNEC E 378. Os requisitos para os constituintes, não considerando os cimentos (NP EN 197), as pozolanas (NP 4220) e as cinzas volantes (NP EN 450), objecto de normas portuguesas, encontram-se estabelecidos em especificações LNEC, contemplando a água de amassadura (E 372), os agregados (E 373), os adjuvantes (E 374), a escória granulada de alto-forno (E 375), o fíler calcário (E 376) e a sílica de fumo (E 377).

Este quadro regulamentar, estabelecido através do Decreto-Lei n.º 330, de 1995, encontra-se agora em revisão, em resultado da publicação da norma europeia de betões, a EN 206, duma pré-norma europeia para a execução das estruturas e betão armado, a ENV 13670, e de um conjunto de normas europeias relativas aos constituintes do betão. Estas normas dos constituintes, com excepção da referente à água de amassadura, são normas harmonizadas e, portanto, de aplicação obrigatória nos Estados Membros da União Europeia.

---

<sup>1</sup> Investigador Coordenador do LNEC

<sup>†</sup> arlindo@lnec.pt

## 2. CLASSES DA NP EN 206

A NP EN 206 estabelece no capítulo 4 uma metodologia classificativa abrangendo o ambiente, o betão fresco e o betão endurecido, como a seguir se indica:

- Classes de exposição relacionadas com as acções ambientais;
- Classes de consistência;
- Classes relacionadas com a máxima dimensão do agregado;
- Classes de resistência à compressão;
- Classes de massa volúmica do betão leve.

Analisando as principais inovações introduzidas pela nova norma europeia, relativamente à NP ENV 206, verifica-se que:

- As classes de exposição ambiental diferem claramente das constantes da NP ENV 206, mas são muito próximas das prescritas na Especificação LNEC E 378 (note-se que a Especificação LNEC E 464 apresenta outros exemplos informativos e simplifica as classes relacionadas com o gelo/degelo);

- As classes de consistência sofrem pequenos ajustes, introduzindo-se, por exemplo, uma classe adicional para o abaixamento (S5) contemplando os valores iguais ou superiores a 220 mm;

- As classes relacionadas com a máxima dimensão do agregado constituem de certo modo uma inovação formal da nova norma;

- As classes de resistência à compressão foram aumentadas, prevendo-se agora classes até C100/115 (antes a classe mais elevada era C50/60), e foram introduzidas também classes de resistência para o betão leve, contemplando classes até LC80/88;

- As classes de massa volúmica do betão leve permanecem praticamente sem alteração, exceptuando-se a classe mais baixa que se inicia agora em 800kg/m<sup>3</sup>.

No capítulo 5 da NP EN 206, secção 5.2.7, são estabelecidas ainda classes para o teor de cloretos, com introdução de duas novas classes – uma para o betão armado, outra para o betão pré-esforçado.

## 3. REQUISITOS E MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO

A NP EN 206 define os requisitos básicos para os materiais constituintes, para a composição do betão, em particular os relacionados com as classes de exposição ambiental, e para o betão fresco e endurecido.

### 3.1 Constituintes

Relativamente aos materiais constituintes, a NP EN 206 exige que tenham a sua aptidão estabelecida, o que significa que o material deve satisfazer uma Norma Europeia ou, caso não exista, uma Aprovação Técnica Europeia ou uma Norma Nacional, admitindo-se também como aceitáveis as disposições válidas no local de aplicação do betão. A NP EN 206 contempla no seu articulado principal os constituintes:

- Agregados,
- Água de amassadura;
- Adjuvantes;
- Adições (cinzas volantes e sílica de fumo);
- Fíleres e pigmentos

e, no Documento Nacional de Aplicação (DNA), os demais constituintes:

- o Pozolanas,
- o Escória granulada de alto-forno (entretanto já foi aprovada norma europeia).

Tendo como referência a NP ENV 206, verifica-se neste domínio uma introdução significativa de normas europeias, todas elas harmonizadas (com excepção da água de amassadura), substituindo as normas e especificações nacionais. A existência de normas harmonizadas para os constituintes do betão obriga os fabricantes destes produtos a terem, no mínimo, o controlo de produção certificado por um organismo independente, o que poderá simplificar o controlo a realizar pelo utilizador.

- No que se refere aos agregados, uma vez que a norma NP EN 12620 é um documento basicamente classificativo, foi necessário especificar quais as propriedades que deviam ser objecto de verificação obrigatória pelo produtor e os correspondentes limites de aceitação, o que foi realizado através da Especificação LNEC E 467 (substituindo a E 373). Para ter em conta as especificidades dos agregados reciclados, foi também publicada a Especificação LNEC E 471, de modo a impulsionar a utilização destes agregados no betão;

- A norma relativa à água de amassadura vem permitir usar águas recicladas das centrais de betão, o que não se encontrava previsto pela E 372, embora o LNEC já possibilitasse o seu uso através de Notas Técnicas relevantes;

- Relativamente aos fíleres, foi também publicada uma Especificação LNEC, a E 466, (substituindo a E 376), visando a utilização deste produto como constituinte de misturas de cimento, cuja aptidão ao uso se encontra estabelecida na Especificação LNEC E 464.

### 3.2 Composição do betão

A secção 5.2 trata da selecção e uso dos materiais constituintes, especificando regras gerais para:

- o Selecção do cimento;
- o Uso de agregados (incluindo os recuperados das centrais de betão);
- o Uso de água recuperada;
- o Uso de adições;
- o Uso de adjuvantes;
- o Teor de cloretos (fixando classes) ;
- o Temperatura do betão.

- No caso dos agregados, saliente-se a Especificação LNEC E 461, a qual veio actualizar as metodologias de prevenção da reacção álcalis-sílica. A prevenção das reacções sulfáticas internas é também tratada nesta especificação. Note-se ainda que a E 467, referida em 2.1, tem em conta a aplicação prevista para o betão no estabelecimento dos requisitos a serem observados;

- Em relação ao uso de adições, é de realçar que no DNA da NP EN 206 se faz referência a um conceito alternativo ao do factor K , reportando para a E 464, na qual, como se referiu, se encontra estabelecida a aptidão ao uso de misturas de cimento como constituintes do betão, mantendo-se assim a prática já prevista na E 378. Na especificação E 464 também se encontra estabelecida a aptidão do conceito de desempenho equivalente do betão, para o caso da sua degradação por corrosão das armaduras, identificando as propriedades e os métodos de ensaio relevantes para avaliar a equivalência de composições.

### 3.2.1 Classes de exposição

Os requisitos para a composição relacionados com as classes de exposição ambiental encontram-se descritos na secção 5.3 da NP EN 206, a qual reporta para os anexos informativos F e J. De acordo com a secção 5.3.2, os requisitos para cada classe de exposição devem ser especificados em termos de:

- Tipos e classes de materiais constituintes permitidos;
- Máxima razão água/cimento;
- Mínima dosagem de cimento;
- Mínima classe de resistência à compressão do betão (opcional);
- Mínimo teor de ar do betão (quando relevante).

No Anexo F da NP EN 206 é apresentada a título indicativo uma tabela com valores limite de composição no caso de se usar o cimento CEM I 32,5. De acordo com o DNA desta norma, estes valores limite devem ser substituídos pelos constantes da E 464, referindo-se ainda que deve seguir-se a E 465, quando se pretender usar métodos baseados no desempenho para a especificação do betão.

Tendo como referência a NP ENV 206 e a E 378, verifica-se um conjunto de alterações e de novas abordagens de que se salienta:

- O alargamento da metodologia prescritiva para uma vida útil de 100 anos;
- A variação das exigências com o tipo de cimento;
- A consideração do mínimo recobrimento nominal e das condições que permitem a sua redução;
- A apresentação do enquadramento geral para a garantia da vida útil;
- A definição de uma metodologia baseada no desempenho para a garantia da vida útil quando a degradação do betão é devida à corrosão das armaduras.

Saliente-se ainda que algumas das disposições da E 464 foram estabelecidas tendo em atenção o Eurocódigo 2, de modo a haver concordância entre os documentos, antecipando a E 464 as correspondentes secções do DNA daquele Eurocódigo.

### 3.3 Betão fresco

A norma NP EN 206 define as metodologias de ensaio a serem usadas na verificação das seguintes propriedades ou parâmetros:

- Consistência;
- Dosagem de cimento e razão água/cimento;
- Teor de ar;
- Máxima dimensão do agregado.

De salientar neste domínio que não é definido um método para a determinação da dosagem de cimento ou da razão água/cimento, no caso de estas serem medidas sobre o próprio betão fresco e não de forma indirecta, através dos registos das amassaduras.

### 3.4 Betão endurecido

A norma NP EN 206 define as metodologias de ensaio a serem usadas na verificação das seguintes propriedades do betão endurecido:

- Resistência à compressão;
- Resistência à tracção por compressão diametral;
- Massa volúmica;
- Resistência à penetração de água.

Na Especificações LNEC E 464 e E 465 são ainda estabelecidas outras propriedades que poderão ser objecto de verificação (permeabilidade ao ar, absorção capilar, difusibilidade dos cloretos, resistência à carbonatação) indicando para cada uma delas os respectivos métodos de ensaio.

Relativamente à NP ENV 206, deixou de ser expressamente referida a resistência à abrasão e de existirem limites para a penetração de água, sendo a resistência à tracção limitada à compressão diametral.

#### 4. CONCLUSÕES

As disposições normativas que em breve entrarão em vigor apresentam um conjunto de inovações em particular no que se refere às medidas para a garantia da vida útil das estruturas de betão armado, que constam fundamentalmente em especificações LNEC de apoio à NP EN 206, publicadas no âmbito das actividades do ONS/ATIC.

A generalidade dos constituintes do betão será objecto da marcação CE, o que de forma inequívoca atribui ao fabricante a responsabilidade pelo controlo de produção destes materiais, sem prejuízo de o utilizador poder efectuar ensaios de recepção.

As propriedades do betão fresco e endurecido previstas na NP EN 206 não diferem significativamente das constantes da NP ENV 206, apesar da introdução de novas classes em algumas dessas propriedades.





## **Especificação, controlo da produção e controlo da conformidade do betão**

João Carlos Duarte<sup>1, †</sup>

*APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto  
Av. Conselheiro Barjona de Freitas, 10A, 1500-204 LISBOA*

### RESUMO

A especificação do betão reveste-se de extrema importância para que o processo de construção se desenvolva adequadamente, nomeadamente no que respeita à resistência da estrutura, não só às acções estáticas e dinâmicas, mas também às acções ambientais a que poderá estar sujeito. No entanto, os intervenientes na definição da especificação são diversos, iniciando-se no promotor do empreendimento, passando pelo projectista e terminando pelo construtor.

Uma vês especificado o betão, cabe ao produtor assegurar que o produto fabricado está de acordo com os requisitos que lhe são aplicáveis, não se cingindo apenas ao controlo da conformidade da resistência, mas sim de todas as propriedades relevantes, quer tenham sido directa ou indirectamente estabelecidas na especificação.

Mas um produtor não se pode limitar a esperar que o produto satisfaça os requisitos implícitos e explícitos na especificação. Há que produzir de uma forma económica e sustentável, pelo que se torna imprescindível recorrer-se de uma ferramenta de controlo estatístico do processo, de preferência uma com provas dadas, tal como a *Cusum*.

### INTRODUÇÃO

Desde o dia 14 de Dezembro de 1995 que a produção, a colocação em obra e a verificação da conformidade dos betões de ligantes hidráulicos estão obrigadas a satisfazer as condições estabelecidas na NP ENV 206:1993 “Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade”.

Com a publicação da norma portuguesa NP EN 206-1:2005 “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”, registou-se mais um marco na história da normalização dos betões de ligantes hidráulicos, com particular relevância para o nosso país.

Resultado de um longo e árduo trabalho desenvolvido ao longo de mais de uma dezena de anos, não só ao nível internacional (no seio do CEN) mas também a nível nacional, a NP EN 206-1 reflecte não só a tradução da norma europeia EN 206-1:2000, mas também as

---

<sup>1</sup> Engenheiro Civil

<sup>†</sup> Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (jcarlos@apeb.pt)

disposições que são aplicáveis no nosso país. Estas disposições podem encontrar-se em anexo à NP EN 206-1, nomeadamente, no Documento Nacional de Aplicação.

Tal como foi efectuado em 1995 com o Decreto-Lei n.º 330/95, a nova norma portuguesa NP EN 206-1, em conjunto com a NP ENV 13670-1:2005 “Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras gerais”, vai em breve substituir a norma provisória NP ENV 206.

A norma portuguesa NP EN 206-1 por si só não pode substituir a NP ENV 206, uma vez que todos os aspectos relacionados com a colocação, compactação e cura do betão foram transferidos daquela norma para a nova NP ENV 13670-1.

A NP EN 206-1 apresenta diversas alterações e novidades face à anterior versão: NP ENV 206. De entre estas, destacamos neste artigo a nova abordagem efectuada sobre a avaliação da conformidade das propriedades do betão.

Desde já se salienta que a leitura deste artigo não dispensa uma análise cuidada sobre o texto da própria NP EN 206-1.

## 1. A ESPECIFICAÇÃO DO BETÃO

A especificação do betão é uma actividade que não deve ser encarada de ânimo leve. Isto porque qualquer erro ou omissão na especificação podem ter um impacte significativo no processo de construção.

Por outro lado, apesar de a resistência à compressão continuar a ser a propriedade rainha e muitas vezes definidora do betão, temos assistido nos últimos anos a um crescendo de importância das outras acções a que a qualquer estrutura está sujeita, nomeadamente no que respeita às agressividades ambientais. Efectivamente, de que nos vale ter uma estrutura que funciona bem em face das acções mecânicas se a mesma está sujeita a um ambiente agressivo que irá degradar o funcionamento da estrutura ou de alguns elementos estruturais, como no caso de ambientes contendo cloretos.

Desta forma, a NP EN 206-1, tal como a anterior NP ENV 206, inclui uma secção para a especificação. Neste artigo iremos apenas abordar a especificação do betão de c comportamento especificado, ficando ao leitor a iniciativa de explorar a norma no que respeita a outros tipos de betão.

A especificação do betão começa no promotor da obra, uma vez que é este quem determina, à partida, os materiais que serão utilizados. Esta especificação primária é então transmitida ao projectista que irá conceber a estrutura e efectuar o seu dimensionamento. Este dimensionamento deve então ter em conta todas as acções a que o betão vai estar sujeito, nomeadamente as acções mecânicas e as acções ambientais a que as diferentes partes da estrutura vai estar sujeita.

Para o efeito, deverá caracterizar o meio ambiente, de modo a identificar os agentes agressivos, nomeadamente:

- condições de humidade;
- existência ou não de cloretos e, em caso afirmativo, qual a sua origem;
- existência ou não de ciclos significativos de gelo-degelo;
- existência de agentes químicos agressivos.

Com base nesta caracterização, o projectista fica com as informações necessárias e suficientes para definir a(s) classe(s) de exposição ambiental para as diferentes partes da estrutura e, conseqüentemente, identificar qual ou quais as classes de resistência mínimas que devem ter os betões a utilizar na estrutura.

Só agora é possível efectuar o dimensionamento estrutural de uma forma adequada e eficaz, uma vez que as classes de resistência que forem utilizadas no cálculo da estrutura são à

partida as adequadas para que a estrutura resista não só às acções mecânicas, mas também às acções ambientais identificadas.

Agora, compete ao construtor (empreiteiro ou subempreiteiro) reunir as informações do projecto e, em face das condicionantes da obra, especificar o betão ao produtor previamente seleccionado.

Mas vejamos então quais os requisitos a que deve obedecer a especificação do betão, os quais se podem dividir em requisitos fundamentais, a indicar em todos os casos, se aplicáveis, e os requisitos adicionais, a incluir quando relevante.

### 1.1. Requisitos fundamentais

A especificação deve incluir o seguinte:

- a) referência à NP EN 206-1;
- b) classe de resistência à compressão;
- c) classe(s) de exposição ambiental;
- d) máxima dimensão do agregado mais grosso;
- e) classe de teor de cloretos;
- f) classe de massa volúmica, ou massa volúmica, em caso de betão leve;
- g) massa volúmica pretendida, em caso de betão pesado;
- h) classe de consistência ou, em casos especiais, valor pretendido para a consistência.

### 1.2. Requisitos adicionais

A especificação do betão pode ainda incluir qualquer um dos seguintes aspectos, quando relevante:

- a) tipos e classes especiais de cimento (p.e.: cimento de baixo calor de hidratação);
- b) tipos e classes especiais de agregados;
- c) características exigidas para a resistência ao ataque pelo gelo-degelo (p.e.: teor de ar);
- d) requisitos especiais para a temperatura do betão fresco;
- e) desenvolvimento da resistência;
- f) desenvolvimento de calor durante a hidratação;
- g) resistência à penetração de água;
- h) resistência à abrasão;
- i) resistência à tracção por compressão diametral;
- j) outros requisitos técnicos.

No entanto, ao especificar alguns destes requisitos, o especificador deve ter consciência da sua responsabilidade. Assim, ao especificar os tipos e classes de agregados (alínea b), o especificador fica responsável por verificar a composição quanto à reacção álcalis-sílica.

## 2. CONTROLO DA CONFORMIDADE

A norma NP EN 206-1, no que respeita ao controlo da conformidade, trata de forma distinta a resistência mecânica, quer se trate da compressão ou da tracção, das restantes propriedades. No presente artigo veremos como é efectuado o controlo da conformidade da resistência à compressão, uma vez que no respeitante à resistência à tracção a abordagem é semelhante. Da mesma forma, veremos como é efectuado o controlo da conformidade da

consistência, nomeadamente no que se refere ao abaixamento do cone de Abrams (ensaio também conhecido por *Slump*).

## 2.1. Controlo da conformidade da resistência à compressão

### 2.1.1. Generalidades

Tanto para efeitos do plano de amostragem como para a aplicação dos critérios de conformidade, a NP EN 206-1 faz uma distinção entre a produção inicial e a produção contínua, sendo que a fase de produção contínua é atingida a partir do momento em que está disponível um número mínimo de 35 resultados de ensaios num período não superior a 12 meses.

A introdução desta diferenciação justifica-se pela necessidade de obter um conjunto de dados suficientes que permitam caracterizar a distribuição dos resultados de uma determinada composição ou de uma família de composições.

Como será de esperar, o período de produção inicial será menor se a empresa tiver implementado o conceito de família de betões, pois, dessa forma, haverá mais composições a contribuir para os 35 resultados necessários para passar à fase de produção contínua.

Esta diferenciação vai obrigar a uma alteração de fundo nos programas informáticos de apoio a esta actividade, uma vez que, além de novos critérios, vai ser necessário prever a possibilidade de coexistência das duas fase numa mesma unidade de produção, na qual algumas composições ou famílias já se encontram em fase de produção contínua, enquanto outras estarão ainda em fase de produção inicial, seja por efeitos de se tratarem de composições novas ou de composições com baixas taxas de produção.

Efectivamente, poderá haver composições ou famílias de composições que, pelo facto de terem uma taxa de produção reduzida, nunca cheguem a atingir um número de resultados que lhes permita passar da fase de produção inicial.

### 2.1.2. Plano de amostragem e de ensaio

O plano de amostragem a desenvolver por cada um dos produtores do betão deve satisfazer o estabelecido no quadro 13 da NP EN 206-1 (ver Tabela 1) e tendo em conta, não só a fase de produção em que se encontra cada uma das composições ou, quando aplicável, das famílias de composições, mas também se o controlo da produção está ou não certificado.

Tabela 1 - Frequência mínima de amostragem para avaliação da conformidade

Produção	Frequência mínima de amostragem		
	Primeiros 50 m <sup>3</sup> de produção	Produção subsequente aos primeiros 50 m <sup>3</sup> a)	
		Betão com controlo da produção certificado	Betão sem controlo da produção certificado
Inicial (até se obterem, pelo menos, 35 resultados)	3 amostras	1/200 m <sup>3</sup> ou 2/semana de produção	1/150 m <sup>3</sup> ou 1/dia de produção
Contínua b) (quando estiverem disponíveis, pelo menos, 35 resultados)		1/400 m <sup>3</sup> ou 1/semana de produção	
a) A amostragem deve ser distribuída pela produção e não deve ser mais de 1 amostra por cada 25m <sup>3</sup> .			
b) Quando o desvio padrão dos últimos 15 resultados for superior a 1,37 $\sigma$ , a frequência de amostragem deve ser incrementada para a requerida para a produção inicial nos próximos 35 resultados de ensaio.			

Como se pode verificar, a frequência de amostragem a adoptar no caso de o controlo da produção se encontrar certificado, de acordo com os requisitos da NP EN 206-1, é substancialmente inferior do que no caso contrário. No entanto, esta situação depende-se do facto de um sistema de controlo da produção certificado compreender um conjunto de metodologias, incluindo a realização de amostras por um organismo independente, que aumenta a confiança nos resultados obtidos.

### 2.1.3. Critérios de conformidade da resistência à compressão

O controlo da conformidade da resistência à compressão baseia-se na aplicação dos critérios de conformidade estabelecidos na NP EN 206-1 aos resultados dos ensaios efectuados.

Estes critérios encontram-se estabelecidos no quadro 14 da NP EN 206-1 (ver Tabela 2) e, tal como referido anteriormente, é feita a distinção entre a fase de produção inicial e a fase de produção contínua.

Tabela 2 - Critérios de conformidade para a resistência à compressão

Produção	Número "n" de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo	Critério 1	Critério 2
		Média dos "n" resultados ( $f_{cm}$ ) N/mm <sup>2</sup>	Qualquer resultado individual de ensaio ( $f_{ci}$ ) N/mm <sup>2</sup>
Inicial	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Contínua	$\geq 15$	$\geq f_{ck} + 1,48 \sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Na prática, esta distinção entre produção inicial e produção contínua significa que, pelo menos, nos primeiros 35 resultados de uma determinada composição ou família de composições, se devem aplicar os dois critérios a cada grupo de 3 resultados.

No caso de a empresa ter implementado o conceito de famílias de betões, torna-se ainda necessário aplicar um terceiro critério para verificar se cada composição continua a fazer parte integrante da família, isto é, se ainda segue as suas tendências de variação.

Este critério de confirmação encontra-se estabelecido no quadro 15 da NP EN 206-1 (ver Tabela 3). No entanto, este critério apresenta-se incompleto, pois apresenta as expressões a aplicar nos casos em que uma determinada composição apresenta até 6 resultados no período que está a ser avaliado quanto à sua conformidade, sendo omissa quanto aos casos em que o número de resultados de uma determinada composição é superior, o que pode acontecer frequentemente.

Nestas situações, o produtor do betão deverá estabelecer internamente as metodologias a adoptar, no âmbito dos procedimentos do seu sistema de controlo da produção. Uma solução que poderá ter ampla aceitação é a resultante de uma interpolação linear entre o valor obtido para a expressão correspondente a 6 resultados e o valor obtido para a expressão correspondente ao critério 1 (produção contínua). Desta forma, é possível deduzir as correspondentes expressões (ver Tabela 4).

Tabela 3 - Critério de confirmação para os membros da família

Número "n" de resultados de ensaio da resistência à compressão de um dado betão da família	Critério 3
	Média dos "n" resultados ( $f_{cm}$ ) de um dado betão da família $N/mm^2$
2	$\geq f_{ck} - 1,0$
3	$\geq f_{ck} + 1,0$
4	$\geq f_{ck} + 2,0$
5	$\geq f_{ck} + 2,5$
6	$\geq f_{ck} + 3,0$

Tabela 4 - Critério de confirmação para os membros da família

Número "n" de resultados de ensaio da resistência à compressão de um dado betão da família	Critério 3
	Média dos "n" resultados ( $f_{cm}$ ) de um dado betão da família $N/mm^2$
7	$\geq f_{ck} + 0,16 \sigma + 2,67$
8	$\geq f_{ck} + 0,33 \sigma + 2,33$
9	$\geq f_{ck} + 0,50 \sigma + 2$
10	$\geq f_{ck} + 0,66 \sigma + 1,67$
11	$\geq f_{ck} + 0,82 \sigma + 1,33$
12	$\geq f_{ck} + 0,99 \sigma + 1$
13	$\geq f_{ck} + 1,15 \sigma + 0,67$
14	$\geq f_{ck} + 1,32 \sigma + 0,33$

Se o número de resultados de uma determinada composição for igual ou superior a 15, dever-se-á aplicar a expressão do critério 1 ( $f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48 \sigma$ ).

#### 2.1.4. Sobreposição de resultados

Existem dois métodos para a utilização dos resultados dos ensaios: com sobreposição e sem sobreposição.

O sistema de controlo da produção deve identificar qual o método a utilizar na aplicação dos critérios de conformidade. Melhor do que descrever os dois métodos por palavras é observar a sua aplicação.

Ora vejamos: Considerando um determinado conjunto de resultados de ensaios de um betão da classe C 25/30, em fase de produção inicial, vamos aplicar o critério 1, utilizando os dois métodos.

Como podemos verificar, a utilização da sobreposição de resultados é uma metodologia mais exigente, uma vez que o resultado de uma amostra é utilizado mais do que uma vez nos critérios de conformidade. Efectivamente, utilizando a sobreposição de resultados neste conjunto de amostras, verifica-se uma ocorrência de incumprimento do

critério de conformidade envolvendo as amostras 3, 4 e 5, quando as amostras 3 e 4 já haviam sido verificadas no grupo de amostras 2, 3 e 4, cuja média satisfaz o critério.

Tabela 5 – Exemplo de aplicação do conceito de sobreposição de resultados

N.º amostra	$f_{ci}$ (MPa)	Com sobreposição		Sem sobreposição	
		$f_{cm}$ (MPa)	Critério 1 $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$	$f_{cm}$ (MPa)	Critério 1 $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$
1	40,2	--	--	--	--
2	36,3	--	--	--	--
3	35,2	$(f_1+f_2+f_3)/3 = 37,2$	Verifica	$(f_1+f_2+f_3)/3 = 37,2$	Verifica
4	35,9	$(f_2+f_3+f_4)/3 = 35,8$	Verifica	--	--
5	30,5	$(f_3+f_4+f_5)/3 = 33,9$	Não verifica	--	--
6	36,7	$(f_4+f_5+f_6)/3 = 34,4$	Verifica	$(f_4+f_5+f_6)/3 = 34,4$	Verifica

### 2.1.5. Desvio padrão

O desvio padrão é outro aspecto da verificação da conformidade da resistência que também sofreu alterações. Na realidade, não foi a expressão de cálculo do desvio padrão que sofreu alterações, mas sim a origem dos dados utilizados na sua determinação.

Efectivamente, o desvio padrão que encontrámos anteriormente na expressão correspondente ao critério 1 (produção contínua) é uma estimativa do desvio padrão da população. Este é determinado a partir de, pelo menos 35 resultados consecutivos anteriores ao período sobre o qual está a ser efectuado o controlo da conformidade, o que se revela substancialmente diferente face ao estabelecido na anterior NP ENV 206, na qual o desvio padrão é determinado a partir dos resultados que estão a ser verificados quanto à sua conformidade, isto é: o desvio padrão da amostra.

No entanto, a estimativa do desvio padrão da população deve ser validada durante a produção subsequente, de modo a garantir a sua adequação, existindo para o efeito dois métodos (ver Tabela 6), um dos quais deve ser previamente seleccionado pelo produtor (isto é, deve constar dos procedimentos inerentes ao sistema de controlo da produção).

Tabela 6 – Métodos para a determinação da estimativa do desvio padrão da população

Método 1	Método 2
<p>O valor inicial do desvio padrão pode ser aplicado no período subsequente durante o qual se pretende verificar a conformidade, desde que o desvio padrão dos últimos 15 resultados (<math>s_{15}</math>) não divirja significativamente do desvio padrão adoptado.</p> <p>Isto é considerado válido desde que:</p> $0,63 \sigma \leq s_{15} \leq 1,37 \sigma$ <p>Quando o valor de <math>s_{15}</math> estiver fora destes limites, deve-se determinar uma nova estimativa de <math>\sigma</math> a partir dos últimos 35 resultados de ensaio disponíveis.</p>	<p>O novo valor de <math>\sigma</math> pode ser estimado a partir de um sistema contínuo, adoptando-se este valor.</p> <p>A sensibilidade do sistema deve ser, pelo menos, igual à do método 1.</p> <p>A nova estimativa de <math>\sigma</math> deve ser aplicada no período de avaliação seguinte.</p>



### 2.1.6. Exemplo de aplicação

Não há nada melhor do que um exercício para clarificar a aplicação dos conceitos apresentados. Assim, consideremos a produção de uma determinada família de composições, abrangendo não só o período de produção inicial mas também dois períodos subsequentes.

#### a) Dados de partida

Considere-se uma família de composições de betões (ver Tabela 7) que foi produzida numa central cujo sistema de controlo da produção estabelece:

- períodos de avaliação da conformidade de dois meses (em fase de produção contínua);
- a estimativa do desvio padrão é verificada quanto à sua validade pelo método 1;
- a transposição de resultados para o betão de referência é efectuada directamente com base nas diferenças face aos valores alvo;
- a verificação da conformidade é efectuada sem sobreposição de valores.

Tabela 7 – Constituição da família de composições e betão de referência

Composições da família	Resistência média alvo	Betão de referência
C20/25	31,0 MPa	
C25/30	36,0 MPa	X
C30/37	43,0 MPa	

#### b) Resultados da fase de produção inicial

Nesta fase, correspondente ao início de produção desta família de composições, foram considerados os primeiros 39 resultados (ver Tabela 8) de modo a satisfazer, não só a necessidade de incluir, pelo menos 35 resultados, mas também a de abranger um período superior a 3 meses. Desta forma é possível determinar a estimativa do desvio padrão da população,  $\sigma$ , a partir destes resultados.

Como se pode observar, os critérios estão aplicados em conjuntos de 3 amostras, de uma forma contínua, sem sobreposição de resultados. Nesta fase de produção inicial, não tem qualquer sentido aplicar-se o terceiro critério (de confirmação).

#### c) Resultados da fase de produção contínua

Neste exemplo, consideram-se os dois primeiros períodos de verificação da conformidade após a fase de produção inicial.

Com os resultados da produção inicial, pelo facto de compreenderem mais de 35 resultados num período superior a 3 meses, é possível determinar a estimativa do desvio padrão da população,  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{39} (f_{cti} - f_{cm})^2}{n - 1}} = 3,74 \text{ MPa}$$

Este será o valor a utilizar na expressão correspondente ao critério 1.

Além destes dois critérios, uma vez que estamos a tratar de uma família de composições, é necessário verificar o cumprimento do critério 3 para cada uma das composições da família.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios e verificação da conformidade da fase de produção inicial

N.º amostra	Data	Compo- sição	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cti}$ (MPa)	n	$f_{cm}$ (MPa)	Critério 1 $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$	Critério 2 $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$
1	2-Jan	C25/30	40,6	40,6	3	39,1	v	v
2	2-Jan	C20/25	29,7	34,7				v
3	2-Jan	C30/37	48,9	41,9				v
4	11-Jan	C25/30	32,5	32,5	3	37,9	v	v
5	13-Jan	C25/30	39,0	39,0				v
6	18-Jan	C30/37	49,3	42,3				v
7	19-Jan	C25/30	40,2	40,2	3	37,2	v	v
8	20-Jan	C20/25	31,3	36,3				v
9	20-Jan	C20/25	30,2	35,2				v
10	23-Jan	C20/25	31,2	36,2	3	34,5	v	v
11	27-Jan	C30/37	37,5	30,5				v
12	27-Jan	C20/25	31,7	36,7				v
13	30-Jan	C25/30	32,5	32,5	3	34,6	v	v
14	1-Fev	C25/30	33,5	33,5				v
15	2-Fev	C25/30	37,8	37,8				v
16	3-Fev	C25/30	32,2	32,2	3	36,7	v	v
17	7-Fev	C25/30	39,0	39,0				v
18	9-Fev	C25/30	39,0	39,0				v
19	13-Fev	C25/30	32,3	32,3	3	38,8	v	v
20	17-Fev	C30/37	49,2	42,2				v
21	22-Fev	C30/37	49,0	42,0				v
22	22-Fev	C20/25	31,3	36,3	3	38,3	v	v
23	27-Fev	C30/37	49,2	42,2				v
24	27-Fev	C20/25	31,3	36,3				v
25	2-Mar	C25/30	40,7	40,7	3	39,9	v	v
26	6-Mar	C30/37	48,7	41,7				v
27	7-Mar	C20/25	32,4	37,4				v
28	10-Mar	C25/30	31,1	31,1	3	33,1	nv	v
29	10-Mar	C20/25	31,1	36,1				v
30	14-Mar	C25/30	32,2	32,2				v
31	14-Mar	C20/25	31,3	36,3	3	35,9	v	v
32	15-Mar	C25/30	38,0	38,0				v
33	17-Mar	C25/30	33,4	33,4				v
34	21-Mar	C25/30	33,2	33,2	3	38,0	v	v
35	22-Mar	C25/30	40,3	40,3				v
36	24-Mar	C25/30	40,4	40,4				v
37	27-Mar	C25/30	39,0	39,0	3	35,9	v	v
38	3-Abr	C30/37	36,4	29,4				v
39	3-Abr	C25/30	39,3	39,3				v

Tabela 9 – Resultados dos ensaios e verificação da conformidade da fase de produção contínua: 1.º período de verificação da conformidade

N.º amostra	Data	Compo- sição	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cti}$ (MPa)	n	$f_{cm}$ (MPa)	Critério 1 $f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48\sigma$	Critério 2 $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$			
40	7-Abr	C30/37	37,5	30,5				v			
41	12-Abr	C30/37	49,3	42,3				v			
42	12-Abr	C25/30	39,3	39,3				v			
43	12-Abr	C20/25	30,3	35,3				v			
44	18-Abr	C20/25	32,5	37,5				v			
45	19-Abr	C30/37	37,4	30,4				v			
46	21-Abr	C25/30	33,3	33,3				v			
47	24-Abr	C25/30	31,9	31,9				v			
48	28-Abr	C30/37	37,5	30,5				v			
49	28-Abr	C20/25	31,5	36,5				v			
50	3-Mai	C25/30	40,5	40,5				v			
51	5-Mai	C30/37	36,3	29,3				v			
52	5-Mai	C25/30	37,8	37,8				v			
53	8-Mai	C20/25	32,5	37,5				v			
54	9-Mai	C25/30	40,5	40,5				v			
55	9-Mai	C20/25	31,0	36,0				v			
56	12-Mai	C30/37	37,7	30,7				v			
57	16-Mai	C25/30	40,7	40,7				v			
58	17-Mai	C20/25	32,7	37,7				v			
59	22-Mai	C30/37	36,6	29,6				v			
60	23-Mai	C20/25	29,7	34,7				v			
61	26-Mai	C25/30	32,5	32,5				v			
62	30-Mai	C25/30	40,8	40,8				v			
63	2-Jun	C30/37	49,3	42,3				24	35,8	v	v

Tabela 10 – Verificação do Critério 3: 1.º período de verificação da conformidade

Composição	n	$f_{cm}$ (MPa)	Critério 3 (ver Tabela 4)
C20/25	7	31,5	$f_{cm} \geq f_{ck} + 0,16\sigma + 2,67$ v
C25/30	9	37,5	$f_{cm} \geq f_{ck} + 0,50\sigma + 2,00$ v
C30/37	8	40,2	$f_{cm} \geq f_{ck} + 0,33\sigma + 2,33$ nv

Como se pode verificar, o betão C30/37 não cumpre com o critério 3, para este período de verificação da conformidade, o que leva a que esta composição seja retirada da família e analisado separadamente quando à conformidade.

Desta feita, devem ser retirados da Tabela 9 os resultados correspondentes ao C30/37, passando desta forma a considerar-se os resultados dos betões C20/25 e C25/30, e a verificação da conformidade deve ser efectuada separadamente para o C30/37.

Tabela 11 – Verificação da conformidade com separação do betão C30/37:  
 1.º período de verificação da conformidade

N.º amostra	Data	Compo- sição	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cti}$ (MPa)	n	$f_{cm}$ (MPa)	Critério 1 $f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48\sigma$	Critério 2 $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$
42	12-Abr	C25/30	39,3	39,3	16	37,0	v	v
43	12-Abr	C20/25	30,3	35,3				v
44	18-Abr	C20/25	32,5	37,5				v
46	21-Abr	C25/30	33,3	33,3				v
47	24-Abr	C25/30	31,9	31,9				v
49	28-Abr	C20/25	31,5	36,5				v
50	3-Mai	C25/30	40,5	40,5				v
52	5-Mai	C25/30	37,8	37,8				v
53	8-Mai	C20/25	32,5	37,5				v
54	9-Mai	C25/30	40,5	40,5				v
55	9-Mai	C20/25	31,0	36,0				v
57	16-Mai	C25/30	40,7	40,7				v
58	17-Mai	C20/25	32,7	37,7				v
60	23-Mai	C20/25	29,7	34,7				v
61	26-Mai	C25/30	32,5	32,5				v
62	30-Mai	C25/30	40,8	40,8				v
40	7-Abr	C30/37	37,5	1)	8	40,2	2)	v
41	12-Abr	C30/37	49,3	1)				v
45	19-Abr	C30/37	37,4	1)				v
48	28-Abr	C30/37	37,5	1)				v
51	5-Mai	C30/37	36,3	1)				v
56	12-Mai	C30/37	37,7	1)				v
59	22-Mai	C30/37	36,6	1)				v
63	2-Jun	C30/37	49,3	1)				v

1) Como este betão foi retirado da família, já não é necessário transpor os resultados para o betão de referência.

2) O Critério 1 não pode ser aplicado enquanto não estiverem disponíveis, pelo menos, 15 resultados desta composição.

Uma vez efectuada a verificação da conformidade, é necessário validar o valor da estimativa do desvio padrão,  $\sigma$ , utilizando o método 1 (ver Tabela 6) com os últimos 15 resultados da família (C20/25 + C25/30). Ora vejamos:

$$s_{15} = 2,97 \text{ MPa}$$

Como  $0,63 \sigma \leq s_{15} \leq 1,37 \sigma$ , então o valor inicial para a estimativa do desvio padrão da população continua válido e pode ser aplicado no próximo período de verificação da conformidade.

Quanto ao C30/37, pelo facto de ter tido um comportamento ligeiramente diferente dos restantes elementos da família, pois não passou no critério 3, deve ser controlado isoladamente. No entanto, como ainda não tem disponível um mínimo de 15 resultados de ensaio, fica a aguardar que tal aconteça.

Não se quer com isto dizer que não sejam tomadas medidas para que o mesmo volte futuramente a integrar a família. O modo como isto se processa não nos é indicado na NP EN 206-1, pelo que será necessário estabelecer os respectivos procedimentos no sistema de controlo da produção.

## 2.2. Controlo da conformidade da consistência: Ensaio de abaixamento

### 2.2.1. Generalidades

O controlo da conformidade da consistência, tal como para todas as propriedades além da resistência mecânica (compressão e tracção por compressão diametral), basea-se na contagem do número de resultados de ensaio que se encontram fora dos valores limite, dos limites da classe ou fora das tolerâncias de um valor pretendido especificado face a um número aceitável de defeitos menores (controlo por atributos).

Assim, se o número de resultados que se encontre dentro de uma faixa correspondente a desvios menores for inferior ou igual ao número aceitável de defeitos menores, então presume-se que o produto está conforme no respeitante a essa propriedade.

### 2.2.2. Plano de amostragem e ensaio

As amostras de betão devem ser efectuadas de acordo com a NP EN 12350-1, de um modo aleatório e com uma frequência apropriada (ver tabela 13).

No entanto, no que respeita à consistência é possível efectuar um pequeno desvio ao estabelecido naquela norma de ensaio, nomeadamente, efectuar a amostragem a partir de uma única toma obtida na descarga inicial da betoneira, mas nunca antes de descarregados  $0,3 \text{ m}^3$ .

Desta forma, as tolerâncias a aplicar são diferentes, tal como se pode verificar na Tabela 13.

O ensaio de abaixamento deve ser efectuado de acordo com uma outra norma de ensaio: a NP EN 12350-2.

### 2.2.3. Critérios de conformidade da consistência

A conformidade da consistência do betão, nomeadamente no que respeita ao ensaio do abaixamento, é confirmada desde que os resultados individuais de ensaio estejam dentro dos desvios máximos permitidos (ver Tabela 13) e que o número de ensaios fora dos limites da classe de consistência especificada ou, no caso de um valor pretendido, fora das tolerâncias, não seja maior do que o valor indicado na Tabela 14, tendo em conta o número total de ensaios efectuados no período de avaliação da conformidade em causa.

Tabela 13 – Critérios de conformidade para a consistência

Número mínimo de amostras	Tipo de amostra	Desvio máximo permitido dos resultados individuais de ensaio face aos limites da classe especificada ou à tolerância sobre o valor pretendido especificado	
		Valor inferior	Valor superior
i) igual à da resistência à compressão (ver Tabela 1);	Amostra efectuada de acordo com a NP EN 12350-1	- 10 mm	+ 20 mm

ii) quando se medir o teor de ar; iii) em caso de dúvida após a inspecção visual	Amostra obtida na descarga inicial da betoneira	- 20 mm	+ 30 mm
---	---	---------	---------

Tabela 14 – Número aceitável de defeitos menores

Número de resultados de ensaio	Número aceitável
1 - 2	0
3 - 4	1
5 - 7	2
8 - 12	3
13 - 19	5
20 - 31	7
32 - 49	10
50 - 79	14
80 - 100	21

#### 2.2.4. Exemplificação gráfica

Para uma classe de consistência S3, cujos limites inferior e superior são 100 mm e 150 mm (Zona A da Figura 1), respectivamente, no caso de amostras obtidas na descarga inicial da betoneira, aplica-se um desvio máximo admissível de 20 mm por valores inferiores e de 30 mm por valores superiores (Zonas B da Figura 1).

Assim, enquanto os resultados dos ensaios individuais de ensaio se enquadrarem na Zona A, o betão está claramente conforme. No caso de haver resultados a situarem-se numa das Zonas B, então o betão está em conformidade desde que satisfaça o número aceitável de defeitos menores, de acordo com a Tabela 14. Se houver um resultado numa das Zonas C, então, claramente, o betão não satisfaz os critérios de conformidade.

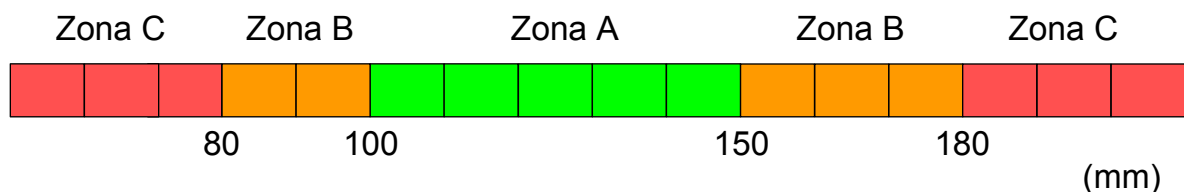


Figura 1 – Exemplificação da aplicação dos desvios máximos permitidos para a classe de consistência S3

### 3. CONTROLO DA PRODUÇÃO

O controlo da produção de betão constitui-se como um conjunto de medidas que devem ser instituídas de uma forma sistemática pelo produtor com o objectivo de manter as propriedades do betão em níveis satisfatórios e em conformidade com as exigências que lhe são aplicáveis.

Tais medidas incluem:

- a) selecção e controlo dos materiais constituintes;
- b) formulação das composições dos diversos betões;
- c) fabricação do betão;
- d) inspecções e ensaios;
- e) inspecção do equipamento de fabricação e de transporte do betão fresco;
- f) análise dos resultados das inspecções e dos ensaios efectuados;
- g) controlo da conformidade (ver Capítulo 2 deste artigo).

Estas medidas devem ser documentadas nos procedimentos e instruções que fazem parte do sistema de controlo da produção, o qual deve ser mantido permanentemente actualizado tendo em vista a sua eficácia no cumprimento dos requisitos aplicáveis, incluindo os requisitos de conformidade e os requisitos do próprio sistema de controlo da produção.

No entanto, um sistema de controlo da produção, além de satisfazer todos os requisitos que pendem sobre si e sobre o produto, deve permitir ao produtor manter a produção do betão em níveis economicamente sustentáveis.

Isto pode ser conseguido através de técnicas estatísticas comprovadas, tal como a técnica de acumulação de desvios, usualmente conhecida por *Cusum*. Esta técnica tem sido aplicada em países como a Grã-Bretanha, já com mais de 20 anos de experiência, com resultados muito satisfatórios. Em Portugal, esta ferramenta foi adoptada por algumas das empresas produtoras de betão, mas não muitas.

O princípio desta técnica, tal como o de quaisquer outras que venham a ser utilizadas, é o de utilizar os resultados de ensaios obtidos a idades jovens (p.e.: aos 2 dias), estimando a resistência aos 28 dias. Depois, utilizando as estimativas, comparam-se os valores obtidos com os valores pretendidos para a resistência média e acumulam-se os desvios. Utilizando de seguida determinados critérios de avaliação, podem identificar-se as tendências da produção e actuar sobre o sistema no sentido de manter a produção em níveis satisfatórios. Como se pode ver facilmente, um sistema deste género permite ao produtor actuar com um atraso de apenas alguns dias, quando anteriormente só poderia actuar após os 28 dias de idade.

Mas para isto poder funcionar com alguma credibilidade, será necessário manter não só a resistência média sob controlo, mas também o desvio padrão e, principalmente, o coeficiente de correlação da resistência às diferentes idade sob controlo.

Nas figuras 2 e 3 podem identificar-se uma tabela de cálculo da técnica *Cusum* e um gráfico elucidativo dos resultados da mesma tabela, respectivamente.

Como se pode verificar no gráfico da Figura 3, o betão apresenta um acumula de desvios por valores superiores, o que nos indica que a resistência estimada está sistematicamente a fornecer valores superiores à resistência média pretendida, pelo que já há algum tempo que se justificava uma revisão das composições reduzindo o teor de ligante de modo a levar os resultados para mais próximo da resistência média pretendida.



**Controlo de Betões**

Ano: 2005

Família de Betão: Betões Bombáveis

Betão de referência: C20/25 D15 S2

Dados da amostra			Cusum Valor Médio						Cusum Desvio Padrão			Cusu	
Ref.ª	Data	Tipo	$\sigma_{2dias}$	$\sigma_{Estim 28d}$	$\sigma_{28dias Refª}$	$\sigma_{Alvo}$	$\Delta I$	Acum $\Delta I$	$\Delta \Sigma$	$\Delta_{Sn Alvo}$	Acum $\Delta \Sigma$	$\sigma_R$	c
0260	11-Abr	C25/30	19.6	39.2	35.3	35.0	0.3	0.28				45.7	
0261	11-Abr	C20/25	14.2	28.4	28.4	35.0	-6.6	-6.32	6.9	1.4	1.4	39.1	
0262	12-Abr	C20/25	19.1	38.2	38.2	35.0	3.2	-3.12	9.8	4.3	5.7		
0263	13-Abr	C20/25	23.6	47.2	47.2	35.0	12.2	9.08	9.0	3.5	9.2		
0265	13-Abr	C25/30	20.7	41.4	37.3	35.0	2.3	11.34	9.9	4.4	13.6		
0266	13-Abr	C20/25	14.9	29.8	29.8	35.0	-5.2	6.14	7.5	2.0	15.6		
0278	18-Abr	C25/30	22.2	44.4	40.0	35.0	5.0	11.1	10.2	4.7	20.2		
0279	18-Abr	C25/30	20.1	40.2	36.2	35.0	1.2	12.28	3.8	-1.7	18.5		
0283	18-Abr	C20/25	17.4	34.8	34.8	35.0	-0.2	12.08	1.4	-4.1	14.4		
0290	20-Abr	C25/30	22.9	45.8	41.2	35.0	6.2	18.3	6.4	0.9	15.3		
0305	27-Abr	C20/25	18.4	36.8	36.8	35.0	1.8	20.1	4.4	-1.1	14.2		
0306	27-Abr	C25/30	15.5	31.0	27.9	35.0	-7.1	13	8.9	3.4	17.6		
0316	3-Mai	C25/30	22.0	44.0	39.6	35.0	4.6	17.6	11.7	6.2	23.8		
0317	3-Mai	C20/25	15.9	31.8	31.8	35.0	-3.2	14.4	7.8	2.3	26.1		
0319	3-Mai	C25/30	17.7	35.4	31.9	35.0	-3.1	11.26	0.1	-4.9	21.2		
0347	17-Mai	C20/25	17.8	35.6	35.6	35.0	0.6	11.86	3.7	-1.3	19.9		

Figura 2 – Extracto de uma tabela de cálculo utilizada na técnica *Cusum*

**CONTROLO DA RESISTÊNCIA MÉDIA**

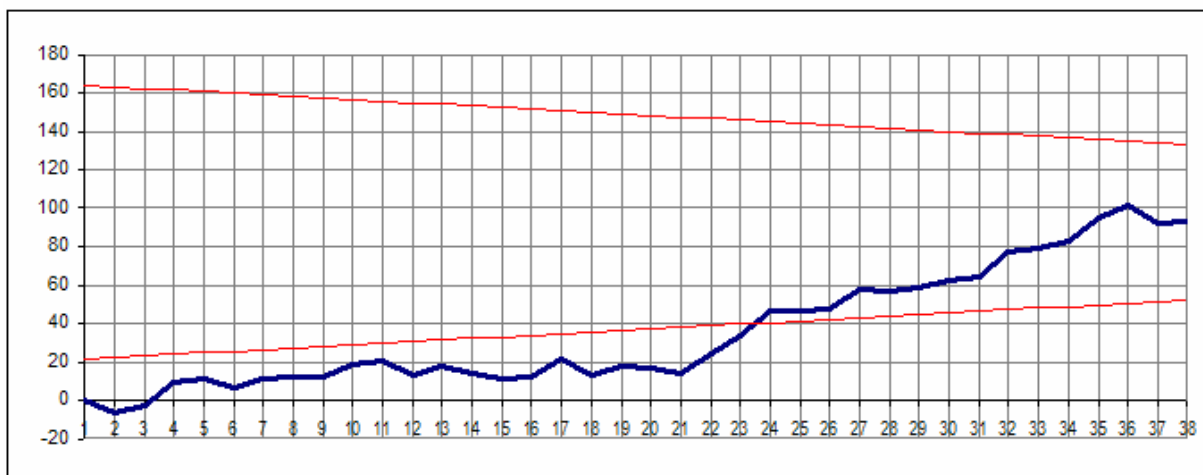


Figura 3 – Exemplo de gráfico da técnica *Cusum*

**4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A nova norma NP EN 206-1 estabelece os requisitos relacionados com a especificação do betão (secção 6), com o controlo da conformidade (secção 8) e com o controlo da produção (secção 9). Alguns destes requisitos apresentam diferenças face aos que se encontravam estabelecidos na anterior NP ENV 206. No entanto, apesar de mais desenvolvidos, mesmo assim revelam-se incompletos, cabendo a cada um estabelecer os aspectos e/ou procedimentos em falta, dos quais se salientam:

- o critério de confirmação (Critério 3), para  $n > 6$ ;
- o critério de readmissão de composições anteriormente excluídas da família para efeitos de verificação da conformidade;



- o desvio padrão a utilizar no caso de um betão que foi excluído da família pelo facto de, num determinado período de verificação da conformidade, não ter cumprido o Critério 3.

Em relação ao exercício de aplicação apresentado no âmbito do controlo da conformidade da resistência, é de referir que se tratam de dados inteiramente gerados de uma forma aleatória, com a ajuda de um computador, pelo que se deve encarar apenas como um elemento de apoio ao exposto anteriormente.

De referir ainda que, neste artigo, não foi abordado o modus operandi em caso de não conformidade. Efectivamente, no exercício apresentado, no período correspondente à produção inicial, um dos grupos de 3 resultados (ver Tabela 8, amostras 28, 29 e 30) não cumpriu com o Critério 1, pelo que na sua sequência deveriam ter sido tomadas as devidas acções, quer no que respeita aos efeitos da não conformidade, quer no que respeita às respectivas causas.

Por último, gostaríamos de sublinhar que este artigo não pretende de alguma forma substituir o estabelecido na NP EN 206-1, antes pelo contrário, devendo ser encarado como um elemento de apoio para os necessários trabalhos inerentes à implementação da referida norma portuguesa, nomeadamente no que respeita ao controlo da conformidade dos betões utilizados na construção do nosso país.

## 5. REFERÊNCIAS

NP EN 206-1, *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, IPQ (2005).

NP ENV 206, *Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*, IPQ (1993).

NP ENV 13670-1, *Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras gerais*, IPQ (2005).

NP EN 12350-1, *Ensaio do betão fresco. Parte 1: Amostragem*, IPQ (2002).

NP EN 12350-2, *Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento*, IPQ (2002).

## **Produção de betões especiais**



## **Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real**

Joaquim A.O. Barros<sup>1 †</sup>, Eduardo N.B. Pereira<sup>2</sup>,  
Simão P.F. Santos<sup>3</sup>, Lúcio A.P. Lourenço<sup>4</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

### RESUMO

Neste trabalho resume-se a investigação desenvolvida no âmbito de um projecto de investigação aplicada, que tinha como objectivo essencial o de avaliar a possibilidade de conceber um painel em betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) para painéis de fachada de edifícios, com vantagens técnicas e económicas quando se toma por base de comparação a solução em betão projectado reforçado com fibras de vidro. Para tal foi necessário desenvolver um método de concepção para o BACRFA. Posteriormente foi caracterizado o seu comportamento à compressão e à flexão, desde as 12 h aos 28 dias do BACRFA desenvolvido, e foi avaliado o desempenho do sistema estrutural proposto no que respeita ao seu comportamento à flexão e ao punçoamento. Para avaliar as dificuldades associadas à construção, em ambiente de pré-fabricação industrial, da solução proposta para o painel, foi construído um protótipo na empresa associada a este projecto. O desempenho estrutural do protótipo construído foi avaliado por intermédio de ensaio in situ.

### 1. INTRODUÇÃO

O betão projectado reforçado com fibras de vidro tem sido usado na construção de painéis para fachada de edifícios (Majumdar and Laws 1991). Contudo, se estes painéis estiverem em ambientes agressivos, a ductilidade proporcionada pelo reforço das fibras decresce significativamente ao longo do tempo (Bijen 1983). Nestes casos os benefícios proporcionados pelo reforço das fibras são marginais, colocando-se a questão da oportunidade da utilização deste tipo de fibras neste tipo de aplicações. Por outro lado, é reconhecido que as fibras de aço, quando envolvidas por betão de boa qualidade, constituem um sistema de reforço capaz de proporcionar elevada ductilidade a materiais de matriz cimentícia, tanto a

---

<sup>1</sup> Professor Associado com Agregação

<sup>2</sup> Assistente

<sup>3</sup> Investigador da Empresa Civitest – Pesquisa de Novos Materiais para a Eng<sup>a</sup> Civil, Lda

<sup>4</sup> Investigador da UM no âmbito do Projecto PABERFIA

<sup>†</sup> Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (barros@civil.uminho.pt)

curto como a longo prazo, que é uma das principais características do betão reforçado com fibras de aço (BRFA). Se o projectista dispuser de informação técnica e científica que lhe assegure um determinado nível de resistência residual ao longo da vida útil prevista para a estrutura, será possível conceber painéis com melhor desempenho em termos de durabilidade e funções estruturais. Para diminuir o peso próprio deste tipo de painéis, estes podem incorporar elementos de material leve. No entanto, a presença desses elementos poderá constituir um obstáculo sério à colocação do betão, comprometendo o aspecto final do painel.

A tecnologia do betão auto-compactável (BAC) pode ser usada para evitar estes inconvenientes, dada a sua elevada fluidez (Gomes 2002). O BAC pode ser definido como um betão capaz de fluir quando colocado num molde, escoando de uma forma natural por entre as armaduras, envolvendo-as e preenchendo o respectivo molde, apenas sob o efeito do seu peso próprio, sem que ocorram fenómenos de segregação durante a sua aplicação. Os primeiros passos, no desenvolvimento do betão com propriedades de auto-compactabilidade, foram dados na Universidade de Tóquio, no Japão, em 1986. No entanto, a primeira aplicação num protótipo realizou-se em 1988 (Okamura e Ouchi, 1999). Desde então, tem havido um esforço por parte dos investigadores no desenvolvimento, melhoria e aproveitamento das propriedades de auto-compactabilidade com novos materiais. Mais recentemente, tem sido explorada a possibilidade de desenvolver BAC demonstrando ductilidade elevada depois de endurecido, por intermédio da adição de fibras à sua composição. Trata-se de um desafio suplementar dado que, para que se assegurem os requisitos de auto-compactabilidade, o efeito das fibras na perturbação do fluxo do BAC no estado fluido tem que ser tido em conta na concepção das misturas, elevando a complexidade desta tarefa. No entanto, a possibilidade de conjugar as vantagens do betão auto-compactável com as que advêm da adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, daí resultando um compósito designado betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA), é razão suficiente para mobilizar centros de I&D e indústria, principalmente a da pré-fabricação, na tentativa de conceber novos sistemas estruturais com vantagens técnicas e económicas. De facto, a indústria da pré-fabricação é, frequentemente, confrontada com a produção de elementos estruturais de alguma complexidade geométrica. Os condicionalismos geométricos traduzem-se, geralmente, em gastos significativos com a montagem e colocação das armaduras. Além disso, quando esta é usada em percentagem elevada, existem dificuldades em garantir a qualidade de betonagem desejada, resultando em deficiências que podem comprometer tanto o comportamento da estrutura como a sua aparência final. Tendo por horizonte a inovação na área dos novos materiais e soluções estruturais, a empresa de pré-fabricação, Prégia, a empresa de desenvolvimento de novos materiais, Civitest, e o grupo de investigação nas áreas de Materiais Compósitos e betões reforçados com fibras do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho, CRG, (<http://www.civil.uminho.pt/composites/>) envolveram-se num projecto de investigação com o objectivo de desenvolver BACRFA para a fabricação de painéis aligeirados para fachada de edifícios. Os conhecimentos adquiridos na tecnologia do BACRFA e a transferência de conhecimentos entre as entidades participantes são outros dos aspectos essenciais deste tipo de parcerias, pois abrem caminho à possibilidade de se desenvolverem novos materiais com propriedades pré-definidas, o que a bibliografia da actualidade designa por “Engineered cementitious composites (ECC)”.

## 2. TECNOLOGIA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

### 2.1. Propriedades do BAC

No seu estado fresco, o BAC deve reunir as seguintes três propriedades fundamentais: fluidez, viscosidade e coesão. Estas garantem que o fluxo da mistura seja homogêneo sem que ocorra segregação. Para assegurar tais características, é necessário realizar ensaios não correntes na tecnologia do betão (EFNARC 2002). A fluidez elevada permite que o BAC tenha aptidão para fluir no interior da cofragem, preenchendo-a na totalidade apenas sob o efeito do seu peso próprio. O BAC tem a capacidade de fluir entre as armaduras e quaisquer outros obstáculos, tais como estreitamentos de secções, orifícios, etc. O BAC deve ter viscosidade e coesão que permitam a estabilidade necessária para evitar a segregação dos seus componentes, garantindo uma deformabilidade uniforme dos inertes no processo de colocação do BAC. A microestrutura e as interfaces “inertes-pasta” do BAC são mais densas do que aquelas que se verificam num betão convencional com a mesma relação água/cimento, pelo que o BAC tem maior resistência à penetração de cloretos e gases, e maior aderência às armaduras. Contudo, dada a maior quantidade de pasta do BAC, é necessário ter cuidados suplementares durante o seu processo de cura, de forma a evitar fissuras por retracção plástica, principalmente em elementos estruturais mais susceptíveis a este tipo de fenómenos, tais como as estruturas laminares. A possibilidade de se adicionarem fibras de baixo módulo de elasticidade, como é o caso das fibras de polipropileno, deve ser explorada pois estas têm demonstrado contribuir para o controlo da fendilhação devida à retracção (Qi *et al.* 2005). Em geral, o BAC apresenta módulo de deformabilidade mais baixo que um betão convencional da mesma classe de resistência e maior retracção endógena para classes de resistência elevadas.

Para aferir as características de auto-compactabilidade, os ensaios mais frequentemente realizados são os seguintes (EFNARC 2002): V-Funnel, L-Box, Espalhamento com o Cone de Abrams Invertido (Slump Flow). Podem ainda associar-se ensaios entre si, como é o caso do ensaio de Espalhamento mobilizando o Cone de Abrams Invertido e o Anel Japonês. Da execução destes ensaios obtêm-se resultados em unidades de comprimento e tempo, que permitem avaliar a existência ou não de características de auto-compactabilidade no betão. De uma forma geral, estes ensaios são de fácil execução e não obrigam a gastos elevados em equipamento. No entanto, deve-se ter em atenção que os valores-limite da maior parte destes ensaios, que permitem classificar o material como tendo, ou não, propriedades de auto-compactabilidade, têm suporte empírico.

### 2.2. Propriedades do Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)

O principal benefício proporcionado pela adição de fibras a materiais de matriz cimentícia é o aumento da capacidade de absorção de energia após o início da fendilhação destes materiais. Este benefício permite que a carga de colapso de estruturas de BRFA seja significativamente superior à sua carga de fendilhação, sendo este incremento tanto maior quanto mais elevado for o grau de hiperestaticidade da estrutura (Barros e Figueiras 1988). Em comparação com o seu homólogo betão simples, o BRFA fendilhado tem melhor comportamento sob acções de fadiga e de impacto, dada a sua maior ductilidade. As fibras podem assegurar melhor qualidade do betão em zonas de elevada concentração de armaduras de resistência ao corte, dado ser possível substituir, parcialmente, estribos e cintas por fibras de aço (Barros *et al.* 2003). A junção, num mesmo material, das características provenientes do BAC e do BRFA, dá origem ao BACRFA: Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço. O BACRFA pode caracterizar-se como sendo um material de matriz

cimentícia reforçado com fibras de aço, tendo capacidade de fluir no interior de uma cofragem unicamente por acção do seu peso próprio.

### 3. MÉTODO DE CONCEPÇÃO

O método desenvolvido para a concepção de BACRFA é constituído por três fases: i) afinação da composição da pasta ligante; ii) determinação da composição do esqueleto sólido, em que as percentagens relativas de cada um dos constituintes são determinadas; iii) obtenção da percentagem de pasta por  $m^3$  de BACRFA que garanta as características de auto-compactabilidade requeridas, ou seja, espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correcta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação. Este método foi aplicado na determinação da composição de BAC reforçado com as quantidades de 30 e 45  $kg/m^3$  de um tipo de fibras seleccionado para a aplicação em estudo. O método pode ser aplicado ao desenvolvimento de betões reforçados com outros tipos ou percentagens de fibras, dado que as características das fibras são tidas em conta na fase ii) acima indicada. No entanto, não existe ainda experiência no desenvolvimento de BACRFA com percentagens de fibras acima dos 0.75% em volume, pelo que não é possível garantir que o presente método seja aplicável sem restrições no desenvolvimento de BACRFA reforçado com percentagens de fibras acima do indicado, e investigação suplementar deve ser realizada neste âmbito.

### 4. CONCEITOS PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS

No presente programa de investigação, para caracterizar o comportamento à flexão do BACRFA desenvolvido, foram efectuados ensaios com provetes prismáticos segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF (RILEM 2002), nomeadamente no que se refere aos procedimentos de cura do betão, ao posicionamento e às dimensões do entalhe no provete, ao carregamento e condições de apoio, às características do equipamento, aos dispositivos de medida e aos procedimentos do ensaio. O método de betonagem dos provetes proposto pelo RILEM TC 162-TDF não foi adoptado, uma vez que não foi usada qualquer compactação externa. Relativamente aos provetes, o RILEM TC 162-TDF preconiza o uso de prismas com um comprimento de 600 mm e uma secção de  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ . A meio vão, é executado um entalhe com 3 a 5 mm de largura e  $25 \pm 1$  mm de profundidade, para que a fendilhação progrida pela secção entalhada. O sistema de ensaio está representado na Figura 1, onde está patente o esquema de aplicação de carga e a disposição do transdutor (Figura 1a). Na boca do entalhe pode aplicar-se um “clip gauge” de forma a estimar a abertura de fenda e assegurar, com maior estabilidade, o controlo do ensaio. A barra, na qual se fixa o transdutor de deslocamentos, deve ficar ligada a dois pontos fixos do provete, podendo a barra rodar em torno de um desses pontos e deslizar sobre o outro ponto do apoio (Figura 1), com o intuito de não registar deslocamentos parasitas nos referidos transdutores (Barros 1995). A estrutura de reacção deve ser suficientemente rígida de forma a evitar a ocorrência de ensaios instáveis.

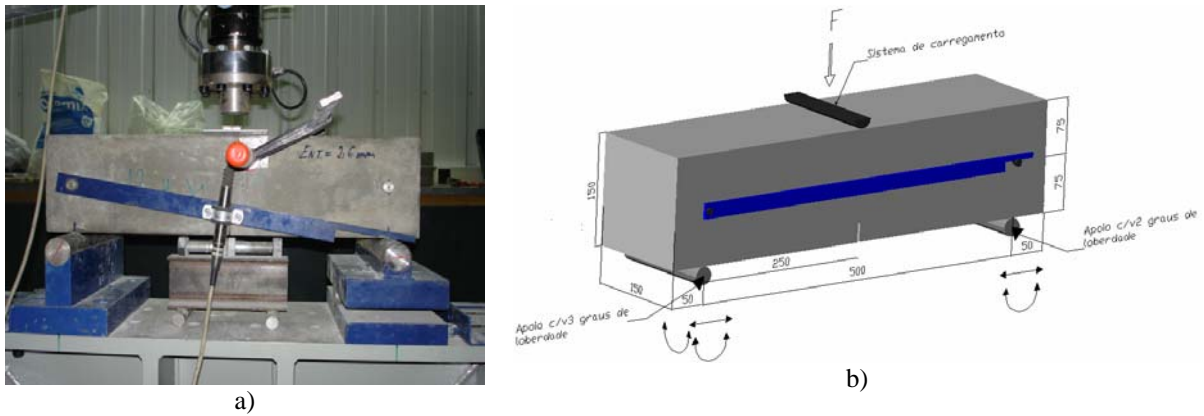


Figura 1 - Configuração do ensaio de flexão

Na Figura 2 representa-se uma curva típica força-flecha que se obtém de um ensaio de flexão. Nesta figura,  $F_L$  é o maior valor de carga registado até uma flecha de 0.05mm e  $\delta_L$  é a flecha correspondente ao valor de  $F_L$ .

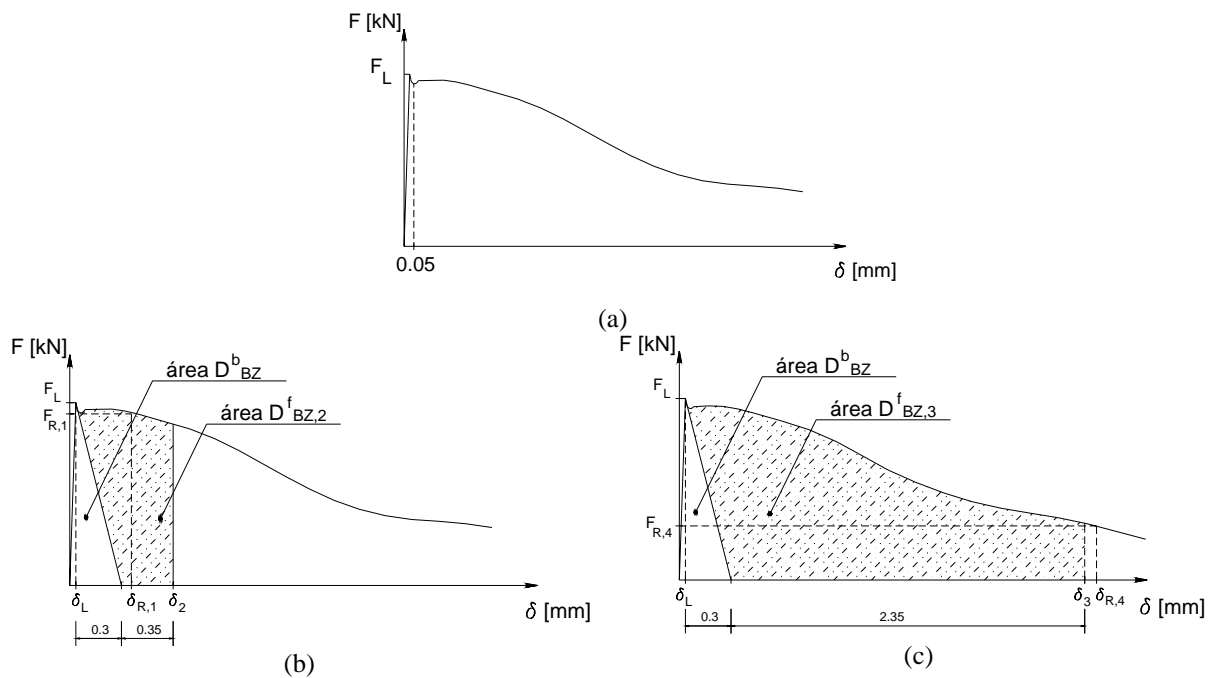


Figura 2 - Relação típica força-flecha de um ensaio de flexão

Admitindo uma distribuição linear de tensões na secção do provete, as resistências equivalente à tracção em flexão  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  podem ser determinadas por meio das seguintes equações:

$$f_{eq,2} = \frac{3 D_{BZ,2}^f L}{2 \cdot 0.50 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

$$f_{eq,3} = \frac{3 D_{BZ,3}^f L}{2 \cdot 2.50 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$



em que  $L$  é o vão do provete,  $b$  é a largura do provete e  $h_{sp}$  é a distância da extremidade interior do entalhe à superfície superior do provete. Os parâmetros  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do material até à flecha  $\delta_2 = \delta_L + 0.65$  mm = 0.75 mm e  $\delta_3 = \delta_L + 2.65 = 2.70$  mm, respectivamente. Esses parâmetros são utilizados na simulação do comportamento do material à tracção nas verificações aos estados limites de utilização ( $f_{eq,2}$ ) e últimos ( $f_{eq,3}$ ), (RILEM 2000). Os parâmetros  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$  são as tensões obtidas para as forças  $F_{R,1}$  e  $F_{R,4}$ , respectivamente, que, por sua vez, são as forças verificadas para os valores de flecha de  $\delta_{R,1} = 0.46$  mm e  $\delta_{R,4} = 3.0$  mm. Assumindo distribuição linear de tensões na secção de fractura,  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$  obtêm-se por intermédio das equações seguintes (RILEM 2002):

$$f_{R,1} = \frac{3 F_{R,1} L}{2 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

$$f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

## 5. DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS PARA FACHADA DE EDIFÍCIOS

### 5.1. Introdução

Na presente secção resume-se a investigação efectuada no âmbito do desenvolvimento de painéis aligeirados de BACRFA para a indústria de pré-fabricação. Mais detalhes sobre os estudos desenvolvidos neste âmbito podem ser encontrados em (Barros *et al.* 2005) As exigências estabelecidas para o BACRFA foram as seguintes: resistência média à compressão às 24 horas superior a 20 MPa; tensão equivalente de tracção em flexão superior a 2 MPa, para a mesma idade; quantidade de cimento não superior a 400 kg/m<sup>3</sup>; o cimento deverá ser o componente mais caro da pasta ligante.

### 5.2. Composições

Os materiais usados no presente programa experimental foram os seguintes: cimento (C) CEM I 42.5R; filler calcárico (FC); superplastificante (SP) de terceira geração baseado em policarboxilatos (Glenium® 77SCC); água (A); três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita granítica (5-12 mm)); fibras de aço DRAMIX® RC-80/60-BN. Esta fibra tem 60 mm de comprimento ( $l_f$ ), 0.75 mm de diâmetro ( $d_f$ ), relação comprimento/diâmetro ( $l_f/d_f$ ) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa. O método de concepção de BACRFA utilizado foi o descrito no Capítulo 3. Mais detalhes podem ser encontrados em (Barros *et al.* 2006; Pereira 2006). Os parâmetros medidos para aferir a auto-compactabilidade do BACRFA foram o espalhamento total e o tempo que o betão demorou a atingir um espalhamento de 500 mm, T50. Na Tabela 1 apresentam-se as composições das misturas que apresentaram as melhores características de auto-compactabilidade, bem como os valores do espalhamento e de T50. Não foram detectados sinais de segregação e a mistura mostrou sempre boa homogeneidade e

coesão, mesmo à passagem pelo pequeno orifício do Cone de Abrams (estes ensaios foram efectuados com o cone de Abrams em posição invertida).

Tabela 1: Composições finais para 1 m<sup>3</sup> de BACRFA reforçados com 30 e 45 kg de fibras

Quantidade de fibras (kg/m <sup>3</sup> )	Pasta/Volume total (%)	Cimento (kg)	FC (kg)	Água (dm <sup>3</sup> )	SP (dm <sup>3</sup> )	Areia Fina (kg)	Meia Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	T50 (sec)
30 (BACRFA_30)	0.34	364.28	312.24	93.67	6.94	108.59	723.96	669.28	725	4.6
45 (BACRFA_45)	0.38	401.68	344.30	117.31	7.65	178.13	669.36	600.00	770	4.0

### 5.3. Propriedades mecânicas

Na indústria da pré-fabricação, uma das exigências mais importantes prende-se com a descofragem dos elementos, a qual deve ser realizada o mais rapidamente possível (Barros et al. 2004). Para garantir a segurança deste processo, deve ser conhecida a influência da idade do BACRFA nas resistências à flexão e à compressão do mesmo. Para este fim, foi efectuado um programa experimental com provetes com as seguintes idades: 12 horas, 24 horas, 3, 7 e 28 dias. Foi dado especial enfoque à avaliação do comportamento pós-fendilhado do BACRFA (Pereira et al. 2004), tendo-se determinado a lei tensão-abertura de fenda para estes materiais, com base nas relações força-flecha obtidas nos ensaios de flexão e recorrendo a um modelo de fendas discretas capaz de simular o fenómeno de iniciação e de propagação de fendas em elementos de betão (Sena-Cruz *et al.* 2004). O programa experimental foi composto por ensaios de compressão directa em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e ensaios de flexão em provetes prismáticos de 600×150×150 mm<sup>3</sup>. Ambos os tipos de provetes foram betonados sem qualquer tipo de compactação.

#### 5.3.1 – Compressão

Os procedimentos e a configuração de ensaio encontram-se descritos em (Barros et al. 2006). Na Figura 3 apresenta-se a relação tensão-extensão para as séries BACRFA\_30 e BACRFA\_45. Cada curva representa a média dos valores obtidos para três provetes. A maior perda de carga, na fase pós-pico, da série BACRFA\_45 de 28 dias de idade deve estar associada com o facto de se ter registado uma resistência próxima dos 70 MPa, pelo que algumas fibras atravessadas por fendas romperam, levando a um comportamento menos dúctil, nesta fase, para esta série. Da análise desta figura verifica-se que, para a idade de 12 horas, o BACRFA\_45 teve menor capacidade de carga que o BACRFA\_30. Este comportamento deveu-se à temperatura ambiente baixa existente no laboratório, aquando da betonagem dos provetes de BACRFA\_45. Enquanto as operações de betonagem do BACRFA\_30 ocorreram sob uma temperatura ambiente de 25 a 28°C, no BACRFA\_45 a temperatura ambiente foi de 15 a 17°C. Temperaturas mais baixas significam maior morosidade na consolidação da matriz cimentícia do betão, facto que influencia o ganho de resistência nas idades mais jovens, mas que se desvanece para idades mais adultas. Repare-se que, a partir dos 3 dias de idade, a resistência alcançada pelo BACRFA\_45 é já superior à alcançada pelo BACRFA\_30. Na fase de amolecimento verifica-se uma queda de carga que aumenta, com a idade, para ambos os BACRFA, devido ao aumento da rigidez da matriz. Esta queda é mais acentuada para o BACRFA\_30, logo aos 3 dias. De facto, a partir das 24 horas a resistência em pós-pico do BACRFA\_45 é bastante superior à do BACRFA\_30. A título de exemplo, verifique-se que, aos 28 dias de idade, para uma extensão de cerca de 6 %, a diferença de resistência entre estes betões é de 20 MPa, valor que demonstra bem a

capacidade resistente do BACRFA\_45 em fase pós-fendilhada, relativamente ao BACRFA\_30. A Figura 4 representa a influência da idade dos diferentes BACRFA no valor médio de resistência à compressão,  $f_{cm}$ . Da análise da figura pode observar-se que, para as 12 horas, o BACRFA\_45 apresentou uma resistência à compressão muito baixa (10 MPa), enquanto que o BACRFA\_30 tem uma resistência à compressão de 25 MPa, pelo que a esta idade já excedia o pré-requisito de resistência de 20 MPa às 24 horas. A resistência à compressão aumentou com a idade do betão, tendo o BACRFA\_45 atingido um  $f_{cm}$  de 66 MPa aos 28 dias, valor não muito diferente do que se obteve para o BACRFA\_30, cerca de 62 MPa. A evolução da resistência à compressão com a idade, representada na Figura 4, indica que a partir dos 28 dias o aumento do  $f_{cm}$  é marginal em ambas as séries. Pode justificar-se este facto pelo uso de filler calcárico na pasta, material este que não tem actividade pozolânica.

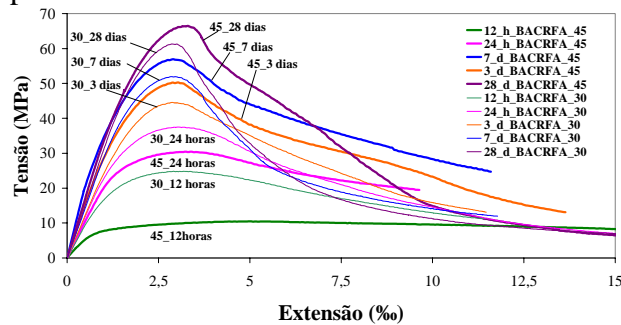


Figura 3 - Curvas tensão-extensão para cilindros de BACRFA\_30 e BACRFA\_45 de várias idades

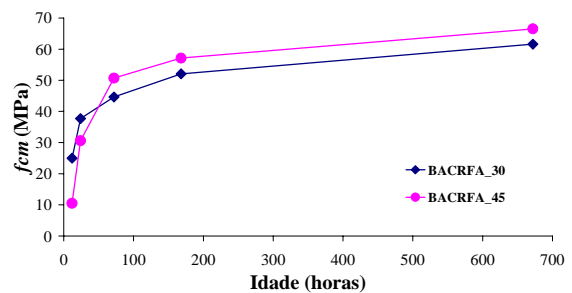


Figura 4 - Comparação da variação de  $f_{cm}$  com a idade.

### 5.3.2 – Flexão

As Figuras 5 e 6 representam curvas força-flecha ( $F-\delta$ ) para as séries BACRFA\_30 e BACRFA\_45, respectivamente, representando cada curva a média dos registos de três provetes. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que às 12 e 24 horas de idade o BACRFA\_45 teve menor resistência à flexão do que os provetes de BACRFA\_30. A partir das 24 horas, a resistência à flexão do BACRFA\_45 foi sempre superior à do BACRFA\_30. A menor resistência nas primeiras idades, principalmente às 12 horas, deveu-se às menores temperaturas registadas durante o programa BACRFA\_45, conforme já foi referido. A Figura 7 mostra a influência da idade dos betões na força correspondente ao limite de proporcionalidade,  $F_L$ . Para ambos os BACRFA,  $F_L$  aumentou até aos 7 dias de idade. Acima desta idade registou-se um pequeno aumento no BACRFA\_30, enquanto no BACRFA\_45 verificou-se uma ligeira diminuição. Apesar da pequena diferença de  $F_L$  entre os dois BACRFA, principalmente a partir das 24 horas, a resistência à flexão do BACRFA\_45 foi significativamente superior à do BACRFA\_30, para essas idades. É notável verificar que no BACRFA\_45 de 7 e 28 dias, o  $F_L$  é cerca de metade da capacidade máxima de carga dos provetes. Assim, nestes provetes, após o início da fendilhação, a capacidade de carga continuou a aumentar significativamente devido ao elevado número de fibras que atravessava a secção de fractura. No BACRFA\_30, devido ao menor número de fibras na secção de fractura, assiste-se a uma queda de carga, praticamente logo após  $F_L$ . Essa queda foi tão mais acentuada quanto maior for  $F_L$ . Verifique-se que, para todas as idades analisadas, a carga máxima atingida pelos BACRFA foi superior ao valor de  $F_L$ , (embora não muito evidenciado no BACRFA\_30). É, por isso, de salientar a diferença de comportamento destes betões em relação ao betão simples. É de referir ainda que todas as fases de endurecimento são seguidas de uma fase de amolecimento (*softening branch*) que se dá de forma suave, denotando tratar-se de materiais de ductilidade elevada. É de notar ainda que, enquanto no BACRFA\_30 o

valor de  $F_L$  é da mesma ordem de grandeza da máxima carga do provete, no BACRFA\_45 o valor da capacidade de carga chega a ser o dobro do valor de  $F_L$ .

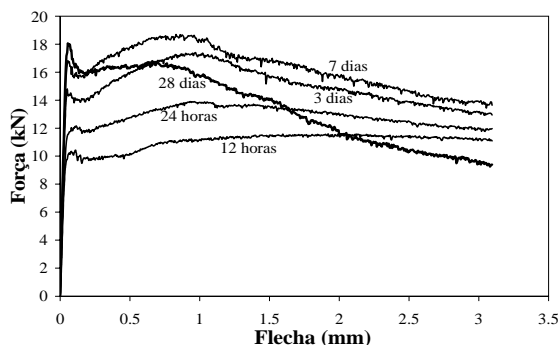


Figura 5 - Curvas força-flecha para provetes de BACRFA\_30 de diferentes idades

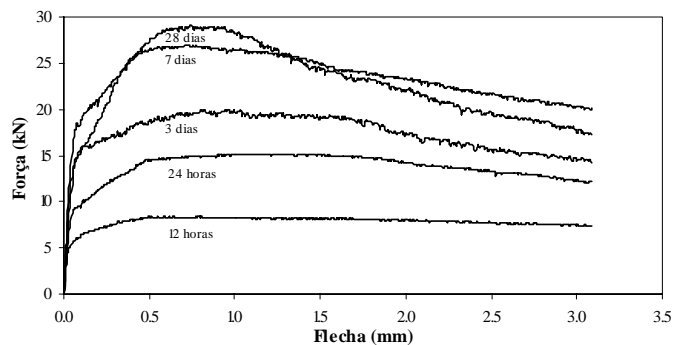


Figura 6 - Curvas força-flecha para provetes de BACRFA\_45 de diferentes idades

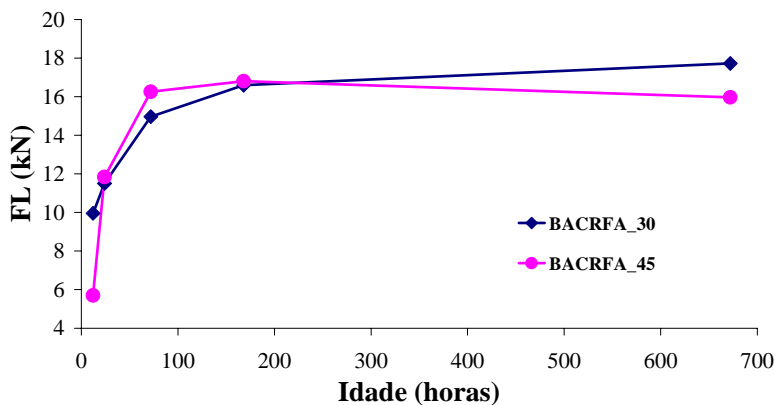


Figura 7 - Influência da idade do BACRFA na força limite de proporcionalidade dos BACRFA\_30 e BACRFA\_45

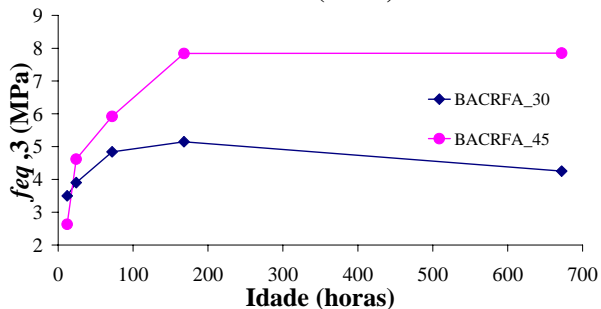
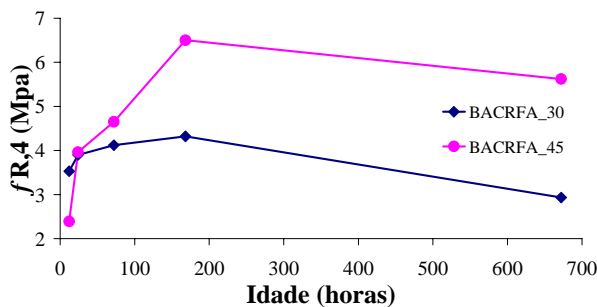
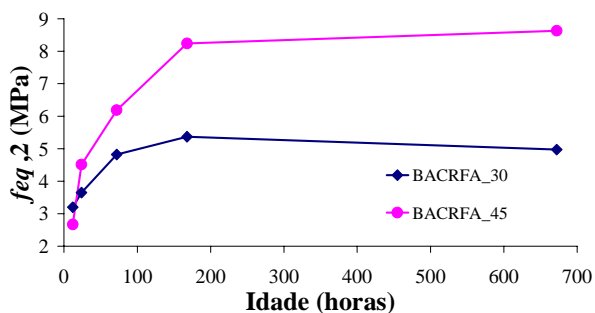
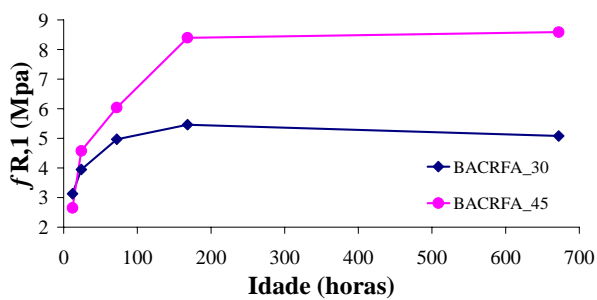


Figura 8 - Influência da idade do BACRFA nos parâmetros de resistência residual à tracção em flexão

Figura 9 - Influência da idade do BACRFA nos parâmetros de resistência equivalente à tracção em flexão

As Figuras 8 e 9 representam a influência da idade dos BACRFA nos parâmetros das resistências residual e equivalente à tracção em flexão. Tendo como base de comparação o BACRFA\_30, verifica-se que os valores destes parâmetros foram sempre maiores nos BACRFA\_45, excepto para as 12 horas. A diminuição da tensão residual na fase de amolecimento é mais significativa nas séries de provetes com 28 dias. Para o BACRFA\_30 os parâmetros das tensões equivalentes ( $f_{eq}$ ) e residual ( $f_R$ ) diminuem entre os 7 e os 28 dias, uma vez que as propriedades de aderência e a eficácia da ancoragem das fibras são afectadas pela queda de carga ocorrida logo após  $\delta_L$ . No BACRFA\_45, apenas  $f_{R,4}$  diminui entre os 7 e os 28 dias de idade dos provetes.

#### 5.4. Ensaio em protótipos de painéis aligeirados

Protótipos de painéis aligeirados foram construídos para avaliar o seu comportamento sob carregamentos que conduzem a modos de rotura por flexão e punçoamento. Os testes em flexão visaram conhecer o comportamento do painel, que será aplicado em fachadas de edifícios, trabalhando portanto, maioritariamente, na vertical, estando sujeito, fundamentalmente, às cargas provocadas pelo vento. Devido à reduzida espessura da lâmina de compressão das zonas aligeiradas dos painéis (30 mm, ver Figura 10), foram efectuados ensaios de punçoamento para avaliar a resistência destas zonas sob a acção de cargas concentradas.

##### 5.4.1 – Geometria do painel

A configuração geométrica do painel aligeirado desenvolvido no presente projecto de investigação está representada na Figura 10. As zonas de aligeiramento são constituídas por blocos  $300 \times 300 \times 80$  mm<sup>3</sup> de poliestireno, colados à cofragem, com uma camada de 30 mm de espessura de BACRFA que, na aplicação real, ficará voltada para o exterior do edifício. A disposição dos blocos de poliestireno garante a construção de uma grelha de barras de 100 mm de largura e com a espessura total do painel (110 mm). O programa experimental consistiu em ensaios de flexão com painéis de  $1000 \times 1000$  mm<sup>2</sup> e 110 mm espessura, e ensaios de punçoamento com painéis de  $600 \times 600$  mm<sup>2</sup> da mesma espessura. Estes ensaios foram realizados aos 7 dias de idade, tendo a desmoldagem dos painéis sido efectuada 24 horas após a betonagem. Os painéis foram betonados com as composições de BACRFA indicadas na Tabela 1.

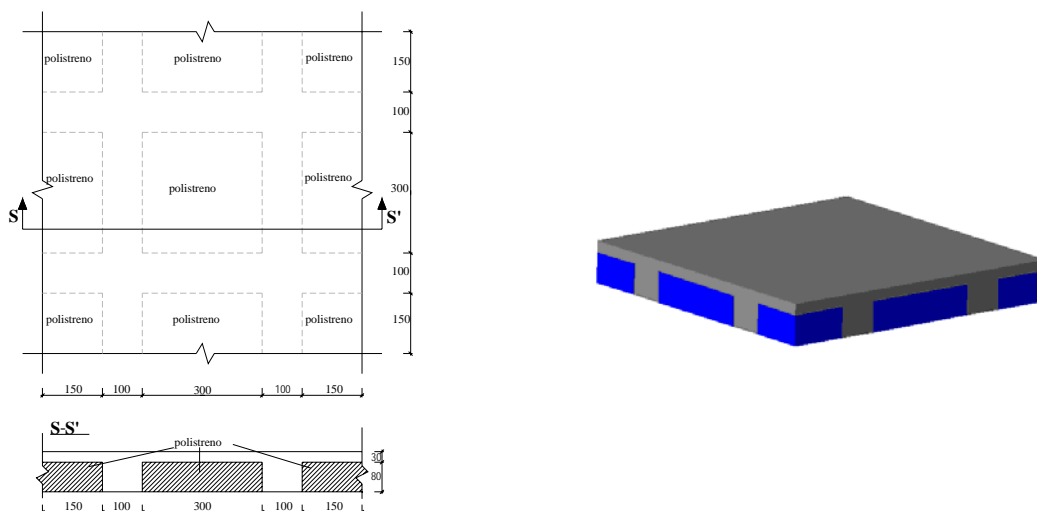


Figura 10 - Configuração geométrica do painel

### 5.4.2 – Ensaio de flexão

O objectivo do ensaio de flexão foi o de avaliar a capacidade de redistribuição de esforços nos painéis de BACRFA. Para tal, o painel foi apoiado em oito pontos para que o grau de hiperstaticidade fosse suficientemente elevado para permitir evidenciar o efeito das fibras após o início da fendilhação do painel (Figura 11). Os oito apoios eram constituídos por duas chapas de  $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ , entre as quais existia uma esfera de 20 mm de diâmetro, pelo que apenas o deslocamento vertical era impedido, ver Figura 12. Este sistema de apoio foi também aplicado entre o painel e o aparelho que aplicava quatro pontos de carga, ver Figura 13. A carga transmitida pelo actuador, alinhado com o centro do painel, era distribuída por quatro pontos de carga, ver Figura 12. O aparelho que transmitia os quatro pontos de carga foi concebido de forma a garantir uma distribuição homogénea da força do actuador pelos quatro pontos de carga. Na parte inferior do painel, no alinhamento dos quatro pontos de carga, foram colocados LVDTs de forma a registar a flecha nesses pontos, ver Figura 13. O ensaio foi realizado com um equipamento servo-controlado, tendo a força sido r por uma célula de carga de 200 kN de capacidade máxima. O ensaio decorreu sob controlo de deslocamento, à velocidade de  $5 \mu\text{m/s}$ , tendo-se para tal utilizado o transdutor de deslocamentos do actuador.

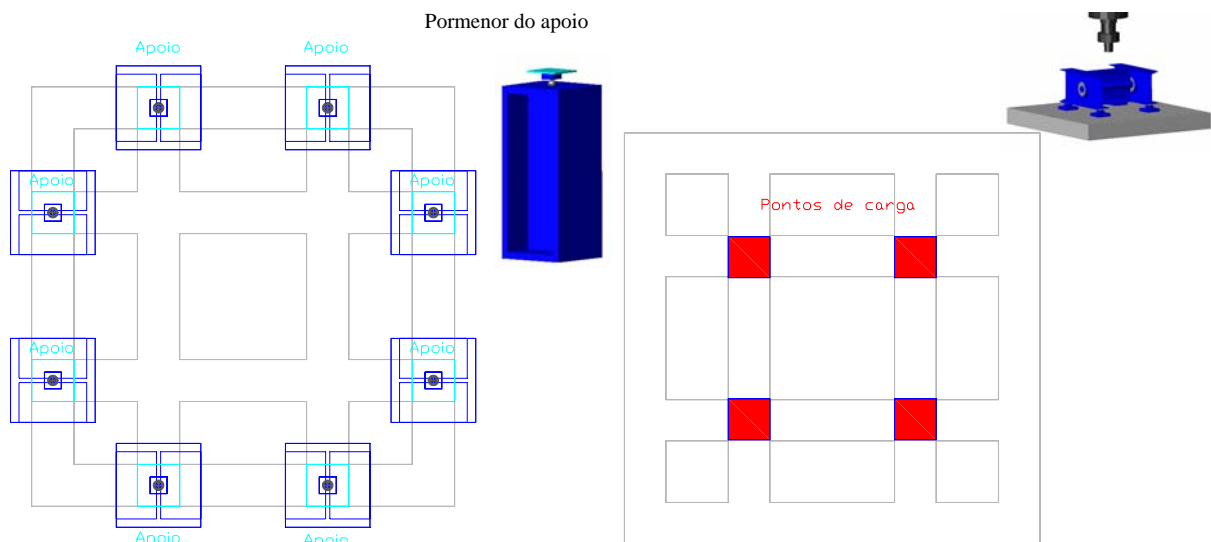


Figura 11 - Pontos de suporte do protótipo

Figura 12 - Posicionamento dos pontos de carga

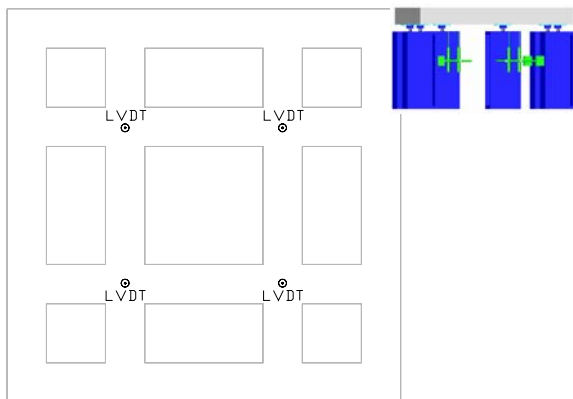


Figura 13 - Posicionamento dos LVDTs para medição da deformação do protótipo.

Figura 14 - Ensaio de flexão de protótipo de painel

Nas Figuras 15 e 16 está representada a relação entre a força e os deslocamentos registados nos quatro LVDTs, para os protótipos de painel de BACRFA\_30 e BACRFA\_45, respectivamente. Em ambos os painéis, o início da fendilhação ocorre para uma carga próxima de 40 kN. No painel de BACRFA\_30 a capacidade de carga aumentou até cerca dos 55 kN, seguindo-se uma fase de amolecimento estrutural. No painel de BACRFA\_45 o aumento de capacidade de carga após o início da fendilhação foi muito mais significativo, dado que a carga máxima excedeu os 100 kN. Após a carga de pico, o painel de BACRFA\_45 também entrou numa fase de amolecimento. A partir do início da fendilhação, os LVDTs passaram a registar distintos deslocamentos devido à perda de simetria do painel motivada pelas características do padrão de fendilhação do painel e, conseqüentemente, das condições de apoio.

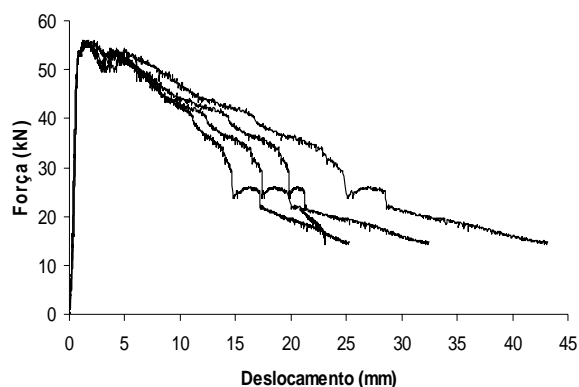


Figura 15 - Relação força-flecha registada nos LVDTs no BACRFA\_30

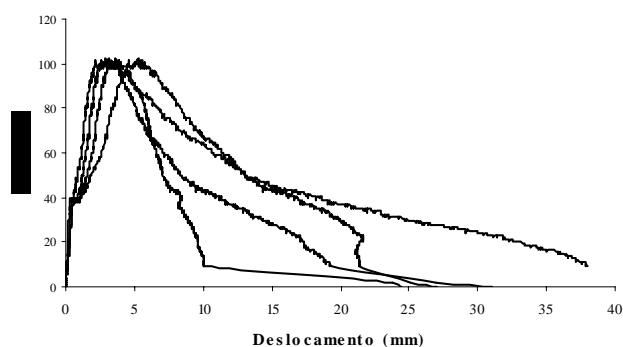


Figura 16 - Relação força-flecha registada nos LVDTs no BACRFA\_45

Nas Figuras 17 e 18 podem ser observados os padrões de fendilhação dos painéis após o ensaio de flexão. Verifica-se que há uma tendência de localização das superfícies de rotura junto aos nós da “grelha”, dada a concentração de tensões nestas zonas de descontinuidade.



Figura 17 - Padrão de fendilhação do painel em BACRFA\_30 no final do ensaio de flexão

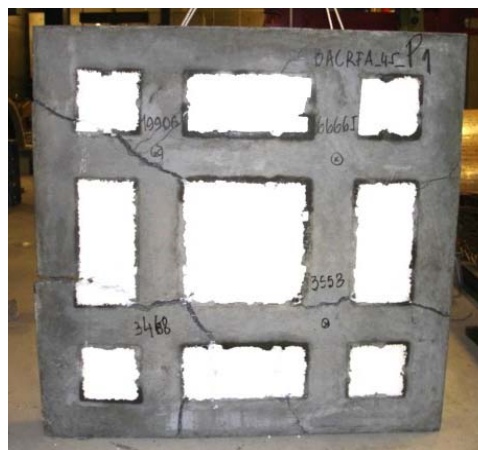


Figura 18 - Padrão de fendilhação do painel em BACRFA\_45 no final do ensaio de flexão

#### 5.4.3 – Ensaio de punção

Na Figura 19 representa-se a geometria do protótipo de painel utilizado para avaliar a resistência ao punção da sua zona aligeirada. Em todo o seu contorno, o painel encontrava-se apoiado em cilindros de aço, formando um aro de apoio de 500 mm de aresta.

A carga foi aplicada por intermédio de um servo-actuator, sendo registada por uma célula de carga de 300 kN de capacidade máxima, fixada ao pistão do actuator. A carga era aplicada na parte central do aligeiramento do painel, onde a espessura da camada de BACRFA era de 30 mm, sendo distribuída por uma placa quadrada de aço de 100 mm de lado e 10 mm de espessura. O ensaio foi realizado sob controlo de deslocamento à velocidade de 25  $\mu\text{m/s}$ , tendo-se para tal utilizado o transdutor interno do actuator. O ensaio terminava quando ocorria a rotura da camada de 30 mm da parte aligeirada do painel.

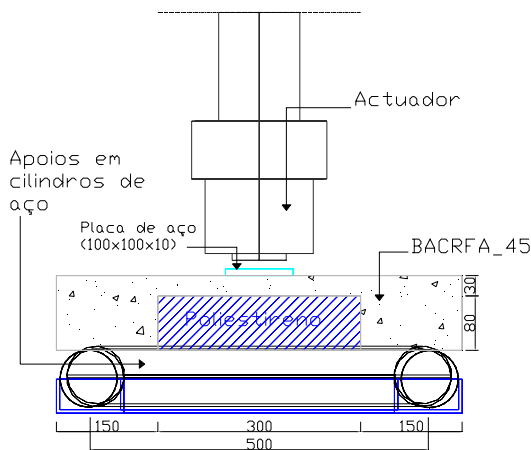
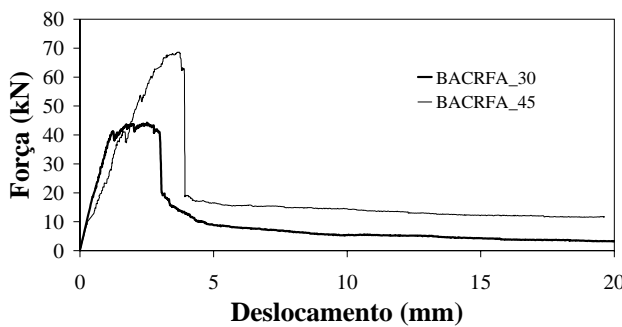
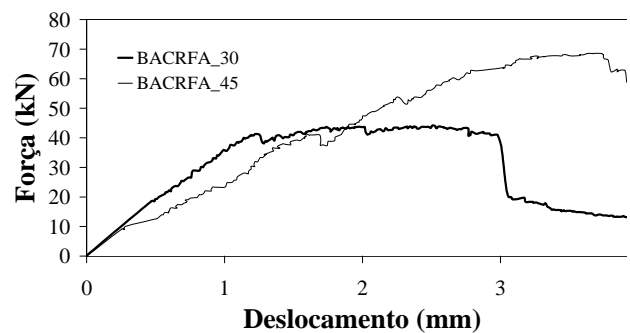


Figura 19 - Condições de apoio e configuração do carregamento do protótipo de painel

A Figura 20a apresenta a relação entre a força aplicada e o deslocamento registado no LVDT, que mediu a penetração da placa de aço na camada de 30 mm nos painéis dos dois tipos de BACRFA. Na Figura 20b apresenta-se a relação força-deslocamento até uma flecha próxima de 10% da espessura da camada de BACRFA da zona de aligeiramento do painel. Por volta desta flecha, ambos os painéis entraram em amolecimento estrutural. Com base na observação do gráfico força-deslocamento pode-se concluir que o BACRFA\_30, ao atingir 40 kN para um deslocamento de 1.3 mm, mantém a capacidade de carga até uma penetração da placa de cerca de 3 mm.



a)



b)

Figura 20 - Relação força-deslocamento no ensaio de punção dos painéis de BACRFA\_30 e BACRFA\_45

O BACRFA\_45, por sua vez, ao atingir uma força de 41 kN, para um deslocamento de aproximadamente 1.7 mm, sofre uma pequena queda na capacidade de carga, provocada pelo início da fendilhação da matriz. Uma vez que este BACRFA possui maior percentagem



de fibras, estas contribuíram para que, após essa queda de carga, a capacidade portante do painel voltasse a aumentar, tendo alcançado a carga de 68 kN, para a flecha de aproximadamente 3.0 mm. A partir desta flecha, a capacidade de carga manteve-se constante até uma penetração da placa da ordem dos 3.2 mm. Os BACRFA\_45 e BACRFA\_30 revelaram ter ductilidade suficiente para sustentar níveis elevados de carga até perfurações da ordem dos 10% da espessura da camada mais fina do painel. A Figura 21 mostra o modo de rotura típico observado nos painéis ensaiados. Verifica-se que, para além do contorno crítico formado pela superfície de rotura por punçoamento, originou-se uma linha de rotura devida a momentos negativos. Tal só foi possível devido à resistência oferecida pelas fibras à propagação da superfície de rotura por punçoamento.



Figura 21 - Modo típico de rotura nos ensaios de punçoamento

## 6. FABRICAÇÃO E ENSAIO DE PAINEL REAL EM AMBIENTE INDUSTRIAL

### 6.1. Construção do protótipo

A última fase do projecto consistiu no fabrico, em ambiente industrial (instalações da Prégaia, em São Félix da Marinha) de um painel à “escala real”. A configuração do painel encontra-se representada na Figura 22, tendo o painel dimensões em planta de 4.1 m por 2.2 m.

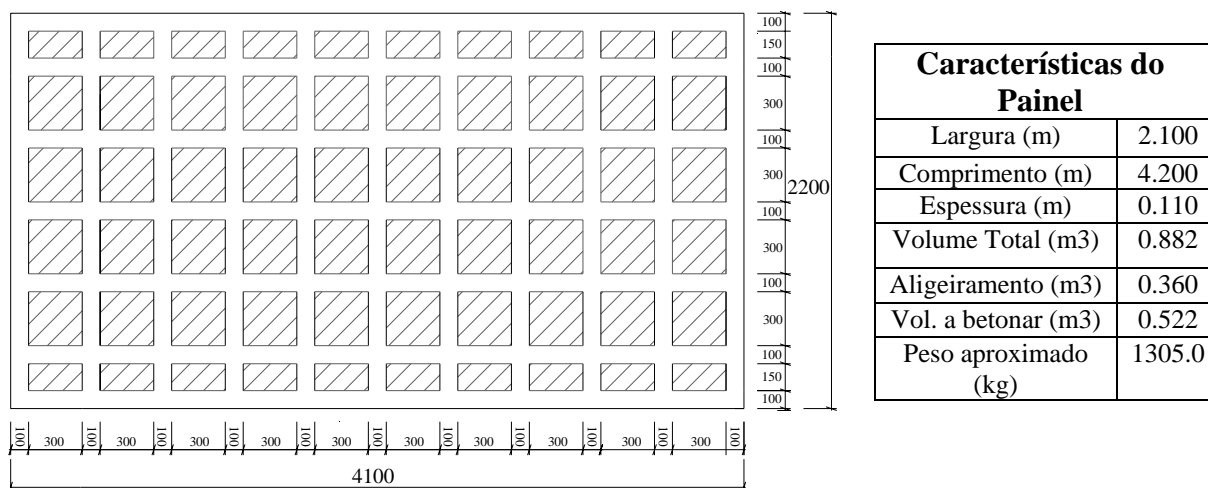
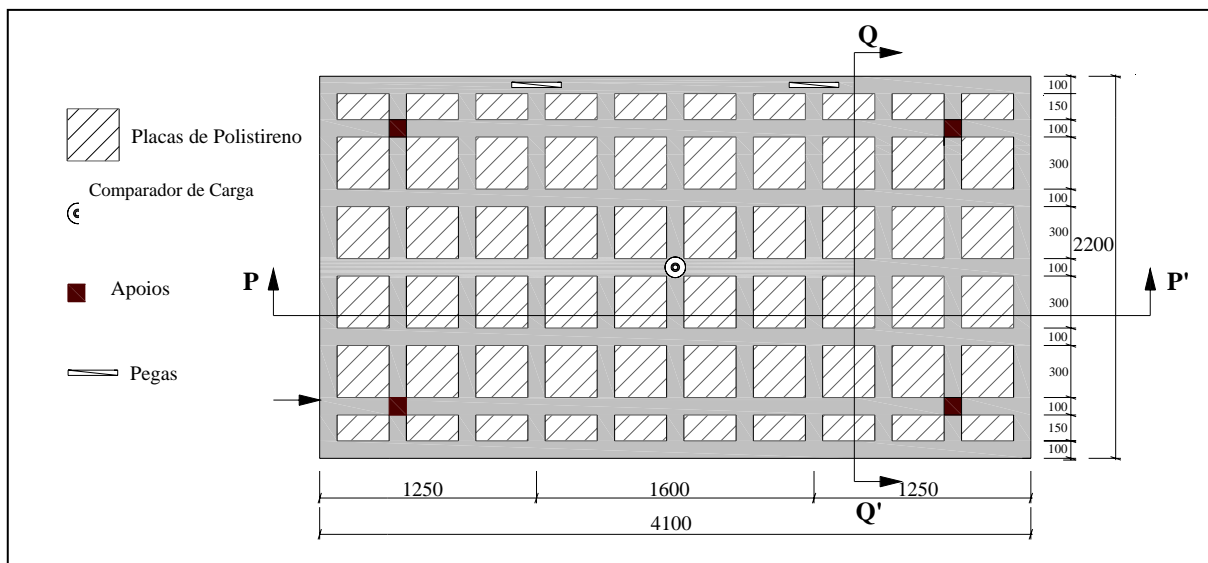


Figura 22 - Geometria do painel (dimensões em milímetros)

Na construção do painel, foram seguidos todos os procedimentos preconizados pelo projecto PABERFIA, em termos de composição de betão e de definições dos aspectos técnicos que foram exigidos pela empresa promotora do projecto. Para a betonagem do painel foram realizadas duas amassaduras de  $400 \text{ dm}^3$ . Para além do painel foram betonados três prismas de  $0.15 \times 0.15 \times 0.6 \text{ m}^3$  e três cilindros de  $0.15 \text{ m}$  de diâmetro e  $0.3 \text{ m}$  de altura e foram efectuados ensaios para avaliar as características de auto-compactabilidade do betão utilizado: o painel foi betonado com BACRFA\_45. A pesagem dos materiais em ambiente industrial não pode ser efectuada com o rigor possibilitado pelas condições laboratoriais. Esse facto poderia levar a que a composição saísse bastante afectada em termos de desempenho. A maior preocupação recaiu sobre o parâmetro *água*: neste tipo de betões, dada a quantidade de superplastificante utilizada, uma pequena quantidade de água a mais poderá fazer com que o betão segregue, inutilizando a amassadura. Assim, durante as amassaduras, a quantidade de água foi sendo adicionada de forma gradual. Parando a misturadora, foram retiradas amostras de betão com as quais se realizou o ensaio de espalhamento com o cone invertido, de forma a determinar a quantidade de água necessária para garantir as propriedades de auto-compactabilidade. No final deste procedimento constatou-se que a água adicionada foi semelhante à utilizada na composição em laboratório, pelo que a metodologia seguida na concepção de BACRFA garante o desenvolvimento de betão com propriedades de auto-compactabilidade em ambiente industrial. Os valores dos ensaios de espalhamento foram de  $600 \text{ mm}$  e  $630 \text{ mm}$  para as amassaduras 1 e 2, respectivamente. O valor do  $C_{bl}$  fornecido pelo ensaio de L-Box foi de  $0.80$ , valor aceitável para este tipo de betão (Barros *et al.* 2005). A desmoldagem do painel foi realizada no dia seguinte, com 24 horas de idade. O painel foi retirado da mesa de cofragem em posição praticamente vertical, de acordo com o procedimento adoptado pela empresa neste tipo de estruturas.

## 6.2. Ensaio de carga

Nas Figuras 23 e 24 representam-se as condições de suporte do painel e o ponto onde foi registada a flecha do painel.



a)

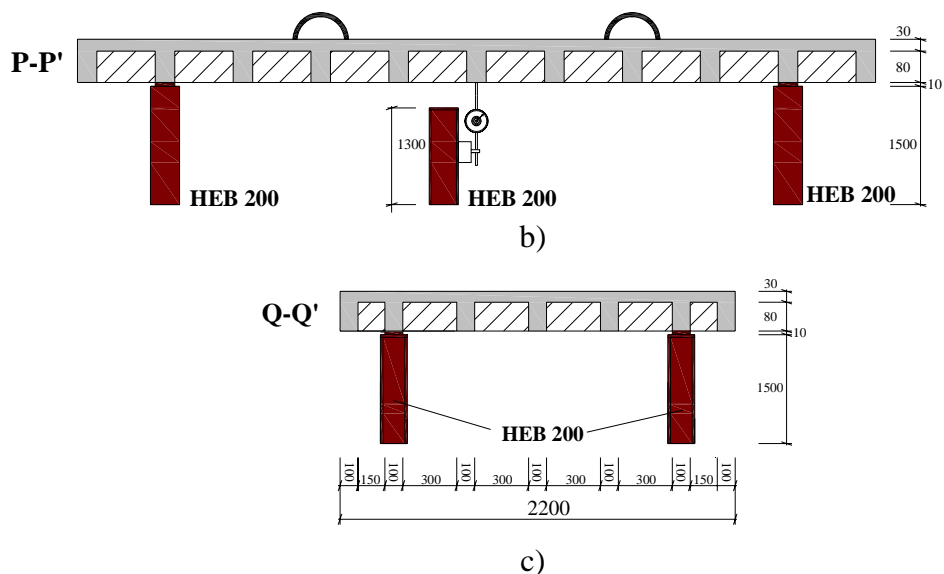


Figura 23 - Configuração do ensaio de carga: a) Aspecto geral; b) Corte P-P'; c) Corte Q-Q' (dimensões em mm)

A aplicação de carga foi efectuada por intermédio da colocação de lajetas de pavimento, com  $500 \times 500 \text{ mm}^2$ , pesando cada peça 25 kg. Na zona entre apoios foram colocadas, numa primeira fase, seis fiadas de 3 lajetas. A segunda fase do carregamento seria constituída pela colocação de uma nova camada de 18 lajetas. No entanto, após colocadas 15 lajetas, ocorreu um aumento significativo de flecha, pelo que se decidiu interromper o ensaio por questões de segurança, tendo a placa suportado um total de 33 placas (Figura 25), a que corresponde uma carga distribuída por unidade de área de  $8.25 / (3.1 \times 1.5) = 1.77 \text{ kN/m}^2$ . No final do ensaio, a fenda de rotura tinha uma abertura máxima da ordem dos 3 mm, sendo visível a existência de fibras a ligar a duas faces desta fenda.



Figura 24 - Colocação do painel



Figura 25 - Operação de colocação das lajetas

O sistema de aquisição de dados forneceu o valor da flecha a meio vão ao longo do tempo. Após a colocação da última lajeta da primeira série de 18, ocorreu a abertura de uma fenda, quando a flecha era de 24 mm. Ao longo do processo de colocação da segunda série de lajetas, foi visível o desenvolvimento da abertura desta fenda e a criação de outras fendas, até que se deu por terminado o ensaio, à flecha de 43.7 mm. A pressão a que o painel resistiu,  $1.77 \text{ kN/m}^2$ , é superior ao valor característico da pressão dinâmica do vento em edifícios com altura inferior a 100 m acima do solo, localizados na zona A, em zonas de rugosidade tipo II (RSA, 1983). Pode assim concluir-se que, para a maior parte dos edifícios onde se utilizam

painéis de fachada, a configuração do painel em BACRFA\_45 desenvolvido é adequada em termos de segurança estrutural.

## 7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi brevemente descrito um método de concepção para betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) de custo competitivo, a ser utilizado no fabrico de painéis de fachada para edifícios. O BACRFA concebido atingiu todas as características de auto-compactabilidade exigidas, bem como os requisitos de resistência, nomeadamente, resistência à compressão às 24 horas superior a 20 MPa, sem que a quantidade de cimento por m<sup>3</sup> de betão tivesse excedido os 400 kg. A resistência à compressão do BACRFA desenvolvido satisfaz as exigências da indústria da pré-fabricação, com valores bastante elevados às primeiras horas de vida, continuando a sê-lo para as idades mais avançadas. Não sendo um requisito *a priori*, a verdade é que o BACRFA desenvolvido pode ser considerado um betão de resistência elevada. Este facto, derivado da compacidade do betão, antevê uma durabilidade superior à de um betão que, tradicionalmente, seja vibrado quando colocado em obra.

No que se refere ao comportamento à flexão, os valores das resistências equivalentes e residuais obtidos traduzem uma capacidade apreciável que este material tem de continuar a resistir a esforços depois de fendilhar. A elevada ductilidade, principalmente do betão auto-compactável reforçado com 45 kg/m<sup>3</sup> de fibras, permite que a capacidade de carga de estruturas com algum grau de hiperestaticidade, construídas com este material, seja significativamente superior à carga de início de fendilhação. Estes benefícios traduzem-se num aumento da segurança, dado que contribuem para que não ocorram modos de rotura frágeis. Num momento da nossa história em que é recorrente a temática das catástrofes naturais - entre as quais, os sismos - e da construção sustentável, é recomendável a utilização de materiais de custo competitivo e que incluam componentes de relativo baixo valor energético na sua produção, e que tenham elevada capacidade de absorção de energia. Crê-se que o BACRFA é um desses materiais, dadas as capacidades denotadas no presente trabalho.

Em termos de comportamento estrutural, o desempenho do sistema concebido foi avaliado e aprovado por intermédio de ensaios de flexão e de punçoamento com protótipos de painel. O comportamento registado nestes ensaios revelou que o reforço proporcionado pelas fibras garante elevada capacidade de redistribuição de esforços, dado que a carga máxima foi significativamente superior à carga de início de fendilhação. Essa *decalage* foi tanto mais significativa quanto maior foi a percentagem de fibras.

A fabricação de um painel à escala real permitiu aferir a aplicabilidade do BACRFA na produção industrial. A composição manteve-se estável, sem que ocorressem fenómenos de segregação. Esta fase serviu para verificar o comportamento do betão quando aplicado em escala industrial (em termos de auto-compactabilidade), revelando os parâmetros que devem ser ajustados para que o BACRFA possa ser usado nas linhas de produção da empresa de pré-fabricação associada a este projecto. Foi possível averiguar o acabamento (em termos visuais) que este material confere aos painéis. O acabamento final das peças betonadas foi bastante satisfatório ainda que possam ser melhorados alguns aspectos.

O ensaio de carga do painel foi, propositadamente, realizado da forma mais desfavorável possível: note-se que estes elementos estruturais serão aplicados na vertical (fachadas de

edifícios) e não na horizontal, como decorreu o ensaio de carga. O painel ensaiado resistiu ao seu próprio peso e a uma sobrecarga de aproximadamente  $1.77 \text{ kN/m}^2$ , indicando ter propriedades estruturais suficientes para resistir à acção do vento, que, a par da fase de desmolde e transporte para *stock* do painel, é a mais desfavorável.

## 8. AGRADECIMENTOS

O estudo descrito neste artigo é parte integrante do programa de investigação “Prefabricated sandwich steel fiber reinforced panels” apoiado pelos FEDER e MCT, e promovido pela ADI (45% do montante solicitado). O terceiro e quarto autores agradecem as bolsas concedidas ao abrigo deste projecto de investigação. Este projecto envolveu as empresas PREGAIA e CIVITEST e a Universidade do Minho. Os autores gostariam de agradecer a cedência dos materiais empregues, gentilmente cedidos pela *degussa* (superplastificante), *SECIL* (cimento), *Bekaert* (fibras) e *Comital* (filler calcárico). Agradece-se ainda a colaboração da Empresa *FiberSensing* pela colaboração prestada na monitorização do protótipo ensaiado na Prégaia.

## 9. REFERÊNCIAS

- Barros, J.A.O., Pereira, E.B., Santos, S.P.F., Lightweight panels of steel fiber reinforced self-compacting concrete, aceite para publicação no *Journal of Materials in Civil Engineering*, (2006).
- Barros, J.A.O. et al., *PABERFIA- Lightweight sandwich panels in steel fiber reinforced self compacting concrete*, Technical report 05-DEC/E-29, Dep. Civil Eng., School Eng. University of Minho, 63 p., November (2005).
- Barros, J.A.O., Pereira, E.B., Ribeiro, A.F., Antunes J.A.B., Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels – experimental and numerical research, *Workshop of 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004*, 24-25 September (2004). (artigo convidado)
- Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 3, p. 277-290, (1998).
- Barros, J.A.O., Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F., Antunes, J.A.B., Fibras de aço no reforço ao corte de vigas de betão armado, *Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras*, Eds. J. Barros, P. Rossi e B. Massicotte, Guimarães, p. 7.1-7.32, 28 Novembro (2003).
- Barros, J.A.O., *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 502 p, Dezembro (1995).
- Bijen, J., Durability of some glass fiber reinforced cement composites, *ACI Journal*, 80 (4), 305-313, (1983).
- EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, ISBN 0 9539733 4 4, 32 pp., (2002).
- Majumdar, A.J., Laws, V., *Glass fibre reinforced cement*. BSP, Oxford, 197 pp., (1991).
- Gomes, P.C.C., *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*. PhD thesis, UPC, Barcelona, Spain. (2002)
- Okamura, H. and Ouchi, M., Self-Compacting Concrete. Development, Present use and Future, *Proc. 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* (Stockholm, Sweden), A. Skarendhal and O.Petersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, (1999)
- Qi, C., Weiss, J. and Olek, J., Statistical Significance of the Restrained Slab Test for Quantifying Plastic Cracking in Fibre Reinforced Concrete. Accepted for publication in the *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Jan (2005).
- Pereira, E.N.B., *Steel Fibre Reinforced Self-compacting Concrete: from material to mechanical behaviour*, dissertation for Pedagogical and Scientific Aptitude Proofs, Department Civil Engineering, University of Minho, 188 pp, (2006) (<http://www.civil.uminho.pt/composites>).

Pereira, E.B., Barros, J.A.O., Ribeiro, A.F., Camões, A.F.F.L., Post-cracking behaviour of selfcompacting steel fibre reinforced concrete, *6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004*, Vol. 2, pp. 1371-1380, Edts. M. di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari, 20-22 de Setembro, (2004).

*RSA, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*, Decreto-Lei N.º.235/83 de 31 de Maio

Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Fernandes, A., Azevedo, A.F.M. & Camões, A.F.F.L., Stress-crack opening relationship of enhanced performance concrete, *9th Portuguese Conference on Fracture*, Setúbal, Portugal, 18-20 February (2004).

RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation, *Materials and Structures* 35(253): 579-582, (2002).

RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for  $\sigma$ - $\varepsilon$  design method, *Materials and Structures*, 33(226), Mar-Apr., pp. 75-81, (2000).



## **Aplicações de BAC à escala real**

Sandra Nunes<sup>1,†</sup>, Helena Figueiras<sup>2</sup>, Ana Maria Proença<sup>3</sup>,  
Joana Sousa Coutinho<sup>4</sup>, Joaquim Figueiras<sup>5</sup>  
*LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal*

### RESUMO

O presente artigo relata a experiência adquirida no âmbito do projecto de investigação BACPOR, desenvolvido em consórcio com a indústria portuguesa, que visava desenvolver de uma forma robusta a tecnologia de fabricação, transporte e colocação do betão auto-compactável (BAC), recorrendo para o efeito aos produtos disponíveis no mercado nacional. No âmbito do BACPOR foram desenvolvidas e caracterizadas em laboratório diversas composições de BAC, e posteriormente aplicadas à escala-real em parceria com as indústrias da pré-fabricação e do betão-pronto. Durante os ensaios à escala-real avaliou-se a adequabilidade dos processos de produção correntes envolvidos na produção, amassadura e transporte e identificaram-se os aspectos mais críticos no que respeita à implementação desta tecnologia na indústria da construção portuguesa.

### INTRODUÇÃO

No sector da construção, com a quebra de fronteiras e a conseqüente globalização, as empresas têm de se tornar cada vez mais competitivas, quer através do recurso a novas tecnologias, quer pela utilização de novos métodos de gestão que permitam o aumento da produtividade. Sendo o mercado nacional caracterizado por uma crescente dificuldade de angariação de mão de obra especializada, bem como de mão de obra com um mínimo de formação de base, o desenvolvimento da tecnologia do betão auto-compactável permitirá certamente não só a utilização na construção da mão de obra disponível, sem que daí resulte falta de qualidade no produto final, como também atrair para a actividade jovens que ingressam no mercado de trabalho, uma vez que desta forma será possível aligeirar as tarefas, tornando-as mais atractivas.

---

<sup>1</sup> Assistente/Aluna de doutoramento

<sup>†</sup> Autor para quem a correspondência deverá ser enviada ([snunes@fe.up.pt](mailto:snunes@fe.up.pt))

<sup>2</sup> Aluna de doutoramento

<sup>3</sup> Professor Auxiliar Convocado

<sup>4</sup> Professor Auxiliar

<sup>5</sup> Professor Catedrático



Apesar do BAC se posicionar como o provável substituto do betão convencional na indústria da construção é ainda necessário fazer um investimento significativo em termos de *know-how*, procedimentos de produção e controlo de qualidade e de formação dos recursos humanos para a aplicação sustentada desta nova tecnologia em Portugal. Neste contexto, surgiu o projecto BACPOR desenvolvido em cooperação directa com a indústria local, tendo por objectivo desenvolver de uma forma robusta a tecnologia de fabricação, transporte e colocação do betão auto-compactável recorrendo para o efeito aos produtos disponíveis no mercado nacional. Este projecto foi dividido essencialmente em três fases, nomeadamente, o estudo laboratorial, os ensaios à escala-real e as aplicações industriais-piloto nas indústrias da pré-fabricação e do betão-pronto. O presente artigo discute principalmente a fase dos ensaios à escala-real destacando os aspectos mais críticos no que respeita à implementação desta tecnologia na indústria da construção portuguesa.

## 1. QUAL O INTERESSE DO BAC?

Os maiores construtores e a indústria da construção portuguesa em geral têm demonstrado um interesse crescente pela tecnologia do BAC. As principais razões deste interesse são a maior facilidade de colocação do betão em zonas de difícil acesso, nas quais a qualidade do betão tradicional depende, essencialmente, da qualidade da compactação e da mão-de-obra envolvida. Além disto, o uso do BAC permite encurtar o período de construção, reduzir a mão-de-obra durante os trabalhos de betonagem, melhorar a qualidade do acabamento final das peças de betão, aumentar a durabilidade, melhorar as condições de trabalho e uma maior liberdade na concepção estrutural e artística das estruturas de betão.

A indústria da pré-fabricação é particularmente adequada para a introdução do BAC. Numa fábrica de pré-fabricação produzem-se frequentemente elementos de geometria complexa e elevada densidade de armadura. A compactação do betão tradicional através da vibração torna-se complicada; obriga à instalação de vibradores externos bastante potentes e, por vezes, é mesmo necessário proceder à betonagem por fases. Quando a consolidação é incompleta os elementos apresentam defeitos que obrigam à realização de reparações, causando atrasos e aumento dos custos. Além disto, a vibração é prejudicial para a saúde dos trabalhadores. O BAC obriga a um controle mais apertado dos factores da produção, nomeadamente, das características dos materiais constituintes, do processo de amassadura e do transporte EFNARC (2005). Numa fábrica, a instalação de sistemas de controle da qualidade é facilitada devido ao maior grau de automação e repetição de processos similares. Além disso, o processo produtivo é menos influenciado pelas condições atmosféricas e os tempos de transporte são curtos, logo a retenção da fluidez do betão fresco deixa de ser um problema.

## 2. COOPERAÇÃO COM A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

O estudo da tecnologia inovadora do BAC na FEUP iniciou-se em 1999 tendo despertado desde logo o interesse da indústria da construção civil. Neste seguimento, em 2003 iniciou-se um projecto de investigação em consórcio, designado por BACPOR, onde participam a FEUP, a Mota-Engil, a SIKA e a MAPREL, e que conta com o apoio da Agência de Inovação, S.A.. No âmbito deste projecto foram desenvolvidas e completamente caracterizadas diversas composições de BAC no laboratório; três dessas composições foram seleccionadas para levar a cabo os ensaios à escala-real em condições reais existentes no local da construção, ver Tabela 1. Foram definidos os materiais constituintes a utilizar para cada

produto, envolvendo agregados graníticos e calcários, agregados britados e rolados, diferentes tipos de cimentos nacionais, as adições mais vulgarmente utilizadas em Portugal, filer calcário e cinzas volantes, e diferentes tipos de superplastificantes disponíveis no mercado. Para cada produto foi definido também um conjunto de exigências de desempenho, como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1- Tipo de aplicação, requisitos de desempenho e materiais constituintes.

Caracterização	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Tipo de aplicação	pré-fabricação	pré-fabricação	betão pronto
Retenção de fluidez	-----	-----	≥ 1 hora
Classe resistência	C45/55	C45/55	C35/45
Resistência inicial*	≥45MPa, às 36 horas	≥35 MPa, às 72 horas	≥36 MPa, às 48 horas
<b>Materiais constituintes</b>			
Cimento	CEM I 52.5 R	CEM I 52.5 R	CEM I 42.5 R
Adição	filer calcário	filer calcário	cinzas volantes
Areia 1	natural	natural	natural
Areia 2	britada granítica	natural	britada granítica
Brita	britada granítica	britada calcária	britada granítica

\* resistência à compressão em cubos (150×150×150 mm<sup>3</sup>)

Com os ensaios à escala real pretendia-se avaliar a adequabilidade dos processos construtivos correntes envolvidos na amassadura, transporte e colocação do betão, assim como, identificar as alterações que é necessário introduzir. Procedeu-se a uma caracterização alargada das propriedades do BAC, nos estados fresco e endurecido, para avaliar a robustez da tecnologia e o cumprimentos dos requisitos de desempenho.

### 3. APLICAÇÃO NA PRÉ-FABRICAÇÃO – PRODUTO 1

#### 3.1. BAC versus Betão Convencional

O método de concepção das composições adoptado neste trabalho baseou-se no método preconizado pelo grupo do Prof. Okamura, Universidade de Tóquio, Japão, e no trabalho desenvolvido anteriormente na FEUP. Além de existir uma variedade grande de materiais que é possível combinar para obter um BAC (cimento, adições superplastificante, agente de viscosidade e agregados) a interacção entre eles na mistura é, muitas vezes, difícil de prevêr. Desta forma, no presente trabalho depois da caracterização individual dos materiais constituintes, foram conduzidos ensaios ao nível da pasta, argamassa e betão, por esta ordem, para otimizar a composição, tal como se descreve com maior detalhe em Nunes (2004).

Os ensaios realizados para avaliar as propriedades do betão fresco foram o ensaio de espalhamento do betão, o ensaio de fluidez, utilizando um funil em V, e o ensaio da caixa. O ensaio de espalhamento permite avaliar a capacidade de deformação, viscosidade e resistência à segregação (por observação visual). A partir deste ensaio obtém-se o diâmetro de espalhamento final (Desp) e o tempo necessário para o betão alcançar um diâmetro de 50cm (T50). O ensaio de fluidez com o funil em V permite avaliar a viscosidade e a capacidade do betão passar por uma abertura apertada, registando-se o tempo de escoamento (Tfunil). Com o ensaio da caixa é possível avaliar a capacidade do betão passar em espaços estreitos entre as armaduras e a capacidade de enchimento. No final deste ensaio regista-se a altura de

enchimento (H). As dimensões dos equipamentos e a descrição dos procedimentos destes ensaios podem ser encontradas em EFNARC (2005) e Nunes (2005).

Na Tabela 2 apresenta-se a composição de um betão convencional e do betão auto-compactável aplicados no mesmo tipo de aplicação, da pré-fabricação. As diferenças mais significativas entre as composições de BAC e do betão convencional residem na quantidade de agregado grosso, na quantidade total de finos (o BAC contém um material adicional, o filer calcário) e na quantidade de superplastificante. Estas diferenças são responsáveis pelo acréscimo de custos na parcela dos materiais do BAC. Tendo por base os resultados da caracterização do betão fresco (Desp=652mm; T50=3.0sec.; Tfunil=9.7sec.; H=340mm) o BAC produzido nas condições reais existentes na fábrica da Maprel, em Nelas, apresentou boa deformabilidade, resistência à segregação e ausência de bloqueio.

Tabela 2 – Composições do BAC e betão convencional.

Materiais constituintes	BAC	Betão convencional
	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	380	380
Filer calcário	114	0
Areia 1	534	375
Areia 2	375	592
Brita	704	832
Água	175	168
Superplastificante (líquido)	9.9	6.0
Custo	112%	100%

Tabela 3 – Propriedades mecânicas e resultados dos ensaios de durabilidades (média).

Tipo de ensaio	Idade	BAC	Convencional
Resistência à compressão*	1 dia	27.9 MPa	-----
	4 dias	51.8 MPa	-----
	7 dias	54.8 MPa	53.2 MPa
	14 dias	67.5 MPa	-----
	28 dias	69.2 MPa	66.2 MPa
Resistência à compressão **	7 dias	55.6 MPa	-----
	28 dias	60.4 MPa	63.0 MPa
Resist. tracção comp. diametral **	7 dias	4.3 MPa	3.7 MPa
	28 dias	4.6 MPa	-----
Módulo de elasticidade**	7 dias	32.9 GPa	32.3 GPa
	28 dias	35.9 GPa	37.6 GPa
Absorção água capilaridade*	28 dias	0.143 mm/h <sup>0.5</sup>	0.170 mm/h <sup>0.5</sup>
Coefficiente de difusão aparente***	28 dias	1.14×10 <sup>-7</sup> cm <sup>2</sup> /s	1.37×10 <sup>-7</sup> cm <sup>2</sup> /s

- cubos (l=150mm); \*\* cilindros (diâm.=150 mm; h=300 mm);\*\*\* carotes (diâm.=100 mm; h=50 mm)

Na Tabela 3 apresenta-se a evolução com o tempo da resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e módulo de elasticidade para as composições de BAC e betão convencional. Os ensaios de absorção de água por capilaridade e de migração de cloretos foram conduzidos de acordo com a recomendação RILEM TC116-PCD (1999) e a NT BUILD 492 (1999), respectivamente. Em geral, obtiveram-se valores mais elevados da resistência à compressão e resistência à tracção, por compressão diametral, com o BAC comparativamente com o betão convencional; ambos os betões podem ser incluídos na classe C50/60. O BAC apresentou valores mais baixos do módulo de elasticidade, provavelmente devido a um conteúdo em agregado grosso menor. O BAC e o betão convencional

apresentaram uma resistência ao ingresso de fluídos semelhante, apesar de o betão convencional possuir uma razão w/c inferior. O comportamento melhorado do BAC pode justificar-se por uma boa dispersão das partículas de cimento e fíler proporcionada pelo superplastificante.

### 3.2. Amassadura, Transporte e Colocação

Os ensaios à escala real foram levados a cabo durante o inverno na fábrica da Maprel, em Nelas, em condições normais de funcionamento. Para esta aplicação seleccionou-se um troço de 2,5m de uma viga-caixão com elevada densidade de armadura, tal como ilustrado na Figura 1. Dado que esta fábrica não dispunha de um silo extra para armazenar e dosear o fíler calcário, este foi adicionado manualmente na misturadora. A configuração da cofragem existente, cofragem exterior contínua e cofragem interior apenas na zona das almas deslizante, adequada ao uso do betão convencional, obrigou ao faseamento da betonagem, ver Figura 1. Primeiro encheu-se a parte do fundo e depois a parte das almas, com um tempo de espera intermédio suficiente para o betão ganhar presa. Esta interrupção na betonagem resultou na formação de uma junta de betonagem na zona das almas, como se pode observar na Figura 2, à qual podem estar associados problemas de aderência entre as camadas.



Figura 1– Sistema de cofragem (à esquerda) e densidade de armadura num elemento de viga (à direita).



Figura 2– Junta de betonagem na peça betonada com BAC.

O veículo utilizado para o transporte do betão desde a saída da misturadora até ao local da betonagem é constituído por um “parafuso sem fim” que eleva o betão até uma altura de cerca de 2m, antes da descarga para o interior da cofragem. Esta forma de descarga não é a mais apropriada uma vez que o betão ao ser lançado de uma altura elevada incorpora ar durante a descida. Depois de descofrar as peças, verificou-se que o BAC preencheu completamente o molde e envolveu as armaduras, tendo sido observadas apenas algumas bolhas de ar na superfície.

#### 4. APLICAÇÃO NA PRÉ-FABRICAÇÃO – PRODUTO 2

##### 4.1. Amassadura, Transporte e Colocação

Tal como foi apresentado atrás na Tabela 1, o Produto 2 destinava-se a ser aplicado na fábrica de pré-fabricação da Maprel, em Rio Maior. Um dos elementos seleccionados para a realização dos ensaios à escala real foi um elemento *box-culvert* (comprimento= 2.5m; altura=1.15m; largura=2.32m; espessura das paredes=0.15-0.20m), ver Figura 3. Nas peças betonadas foram previstas três zonas livres de armaduras, no centro das paredes laterais e da laje, de modo a facilitar posteriormente a extracção de carotes, tal como se pode observar na Figura 3. Durante estes ensaios foram betonadas duas peças semelhantes, uma delas com BAC e a outra com um betão utilizado correntemente naquela fábrica, para aquele tipo de elementos.



Figura 3 – Disposição da armadura nos elementos *box-culvert* betonados.

Os ensaios à escala real foram conduzidos durante o inverno em condições de funcionamento normal da fábrica da Maprel, em Rio Maior. Nesta fábrica existe uma misturadora de eixo vertical com uma capacidade máxima de 2m<sup>3</sup>, por ciclo. Para os ensaios com o BAC manteve-se o procedimento de amassadura estabelecido para o betão convencional, mas aumentou-se o tempo de amassadura. Atendendo à maior eficiência da amassadura quando comparado com as amassaduras levadas a cabo no laboratório e para atender a possíveis erros na determinação do teor de humidade dos agregados, o teor de água

e a dosagem de superplastificante foram reduzidos para produzir um betão mais resistente à segregação.

O veículo de transporte do betão desde a misturadora até junto da peça a betonar é apresentado na Figura 4. Este sistema apresentou diversas limitações tais como a altura de descarga do betão, por exemplo, observou-se que esta altura é inferior à altura de alguns dos elementos *box-culvert* produzidos nesta fábrica. Por outro lado, no caso dos elementos mais pequenos, por vezes, o betão é lançado de uma altura relativamente elevada o que faz aumentar o teor de ar ocluído. Em algumas situações a capacidade do tanque deste veículo foi também limitativa por ser inferior à capacidade máxima da misturadora. De facto, isto pode originar atrasos na produção com BAC uma vez que este dispensa o tempo de espera para a vibração tal como acontece com o betão convencional.



Figura 4 – Veículo de transporte e descarga do betão.

Nos elementos de betão convencional é aplicada vibração externa na cofragem, com utilização do BAC elimina-se a necessidade de vibração o que se traduz num aligeiramento das tarefas envolvidas nos trabalhos de betonagem e uma redução drástica do ruído no interior da fábrica. O ambiente de trabalho melhorou significativamente com a utilização do BAC o que se traduziu por uma reacção bastante positiva por parte dos trabalhadores e engenheiros presentes.

#### 4.2. Resistência à Compressão do Betão nas Peças

A resistência à compressão do betão das peças foi avaliada através do ensaio de carotes extraídas de diferentes zonas do *box-culvert*, nomeadamente, a zona central das paredes laterais e da laje, aos 60 dias de idade do betão, ver Figura 8. Nas carotes extraídas das paredes laterais a carga foi aplicada na direcção perpendicular à direcção da betonagem enquanto que as carotes extraídas da parte da laje foram carregadas na mesma direcção da descarga do betão. O diâmetro das carotes foi de 94mm e a relação altura/diâmetro (h/d) variou entre 1.58 e 1.72.



Figura 5 – Zona de extracção das carotes numa das paredes laterais do *box-culvert*.

Os valores obtidos da resistência à compressão das carotes foram convertidos nos valores correspondentes em cilindros (diâm.=150mm; h=300mm) através das relações propostas por Mansur (2002), válidas para níveis de resistência entre 20 e 100MPa. Na Tabela 5 apresentam-se os valores convertidos, a partir do valor médio da resistência das carotes, e o respectivo valor médio da massa volúmica obtidos nos elementos *box-culvert* betonados com BAC e betão convencional. No *box-culvert* betonado com BAC os valores da resistência e massa volúmica são da mesma ordem de grandeza em todas as zonas analisadas, enquanto no *box-culvert* de betão convencional estes valores decresceram significativamente na parte da laje. Ou seja, com o BAC obteve-se um material mais homogéneo e isotrópico ao longo do *box-culvert*.

Tabela 4 – Resistência à compressão (60 dias) e massa volúmica do betão das *box-culvert*.

Propriedade do betão	localização	BAC	CONV
Resist. à compressão* (MPa)	parede-A	67.8	67.3
	parede-B	69.7	66.3
	laje	70.7	58.1
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	parede-A	2339	2380
	parede-B	2329	2346
	laje	2305	2289

\* correspondente em cilindros (diâm.=150 mm; h=300 mm)

## 5. APLICAÇÃO COM BETÃO PRONTO – PRODUTO 3

### 5.1. Amassadura, transporte e colocação

O presente ensaio à escala real decorreu junto a uma das centrais de fabrico de betão instalada para a obra SCUT-IP5, durante o inverno e com uma temperatura ambiente que rondava os 11°C. Neste ensaio manteve-se o procedimento de amassadura estabelecido para o

betão convencional, com excepção do tempo de amassadura que foi aumentado para o BAC. Na Figura 6 apresenta-se a cofragem preparada especificamente para estes ensaios, foram betonados três painéis similares, com as seguintes dimensões: altura=5m; largura=1m; espessura=0.20m.

A composição de BAC préviamente estudada na fase do estudo laboratorial, quando produzida durante os ensaios à escala real apresentou sinais de segregação com bloqueio dos agregados nos ensaios do funil em V e da caixa, logo após o final da amassadura. O valor final de diâmetro de espalhamento foi de 680mm. Adicionalmente observou-se que a trabalhabilidade do BAC evoluiu com o tempo ao longo da cadeia de produção. Ao fim de 1 hora de transporte numa auto-betoneira para o local da aplicação observou-se um aumento da fluidez do betão, o valor final do diâmetro de espalhamento aumentou para 740mm. Observaram-se também sinais evidentes de segregação como a ausência de agregado grosso no contorno da área de espalhamento. Apesar desta segregação severa, esta entrega de BAC foi utilizada para betonar dois dos painéis. O primeiro painel foi betonado com betão convencional com descarga por balde e manga, faseada para aplicar a vibração necessária. Este painel ficou completamente cheio ao fim de 15 minutos. Em seguida, foi betonado um painel com BAC e descarga por balde e manga; este ficou completamente cheio em 8 minutos. Finalmente, o BAC foi bombado para o terceiro painel tendo sido necessários apenas 2 minutos para encher completamente o painel. O BAC é mais fluido que o betão convencional logo permite maior velocidade de escoamento, quando este é bombado. Consequentemente, a pressão registada durante a bombagem do BAC foi cerca de 20% inferior, o que se traduz numa redução do consumo e desgaste da bomba.



Figura 6 – Descarga do betão por balde e manga (à esquerda); bombagem do BAC (à direita).

Tal como foi exposto anteriormente, existem grandes diferenças entre o comportamento das misturas quando produzidas no laboratório e numa central de produção de betão. As possíveis causas identificadas para justificar estas diferenças foram: a eficiência da mistura, variação da fluidez com o tempo, erros nas pesagens dos materiais, erros na avaliação do teor de humidade dos agregados e variações nas características dos materiais. Além disto, a existência de partículas de agregado grosso bastante alongadas numa direcção (acima de



40mm), o baixo conteúdo de material retido no peneiro 2.36mm, e a elevada dosagem de superplastificante contribuíram para que esta composição estivesse mais sujeita à ocorrência de segregação.

Tal como pode ser observado na Figura 7 a mistura de BAC, com segregação, conduziu a uma boa qualidade do acabamento da superfície dos painéis, sem a existência de poros. Foram ainda extraídas carotes a diferentes alturas em cada um dos painéis, com e sem armaduras. Comparando as carotes H3 e H1, apresentadas na Figura 8, retiradas do topo e do fundo do painel de BAC, respectivamente, existe uma diferença clara no conteúdo de agregado grosso o que vem confirmar a ocorrência de segregação. Analisando os resultados da resistência à compressão e da massa volúmica das carotes extraídas de ambos os painéis betonados com BAC verificou-se o seguinte: a segregação foi mais pronunciada quando o BAC foi bombado; houve uma redução significativa da resistência e densidade do betão entre o meio e o topo do painel e esta diferença foi mais pronunciada quando o betão foi bombado; não se observou uma redução significativa nos valores da resistência e densidade do betão existente nas partes do meio e fundo do painel betonado com balde e manga.



Figura 7 – Qualidade do acabamento da superfície dos painéis.



Figura 8 – Carotes extraídas dos painéis betonados com BAC: topo (à esquerda); meio (ao centro); fundo (à direita).

## 6. DISCUSSÃO

Desde o início do desenvolvimento da tecnologia inovadora do BAC já foram estudadas e testadas diversas misturas em laboratório mas a experiência *in-situ* ainda é relativamente limitada. No âmbito do projecto BACPOR, que abrangeu uma gama alargada de aplicações e materiais, as misturas optimizadas em laboratório tiveram que ser ajustadas no início dos ensaios à escala real para a atender às diferenças na eficiência da mistura e conseguir alcançar elevada resistência à segregação e suficiente deformabilidade do betão enquanto fresco. Observou-se também que as variações no cimento e adições introduzidas pelo próprio processo produtivo e alterações nos agregados, por exemplo de um fornecimento para outro, podem introduzir alterações significativas das propriedades do betão fresco. Daí a importância da robustez da mistura, ou seja, é necessário que a mistura seja insensível, tanto quanto possível, a pequenas variações dos materiais constituintes e à variação da auto-compactabilidade com o tempo.

A capacidade de produção e a velocidade de colocação devem ser balanceadas de modo a assegurar um fornecimento contínuo do betão dentro do período de retenção da fluidez. Uma interrupção no fornecimento do BAC afecta a capacidade de enchimento e resulta no aparecimento de juntas de betonagem nas superfícies das peças, com possíveis problemas de aderência entre camadas. Ambos os ensaios à escala real, levados a cabo nas fábricas de pré-fabricação da Maprel, demonstraram a necessidade de introduzir algumas alterações nas instalações e equipamentos existentes (ajustados ao betão convencional) de modo a conseguir colocar o BAC de uma forma contínua. Adicionalmente, foi recomendada a formação do trabalhadores envolvidos na produção com BAC.

Apesar das dificuldades encontradas para conseguir alcançar as propriedades da auto-compactabilidade nas condições reais de produção na obra da SCUT-IP5, demonstrou-se o potencial do BAC para reduzir os custos iniciais associados com uma menor necessidade de mão-de-obra e um aumento da produtividade através da redução do tempo de construção, especialmente quando este é bombado.

Considerando um BAC e um betão convencional, no estado endurecido, com resistências similares, pode assumir-se que as restantes propriedades são comparáveis e quaisquer diferenças caem dentro do intervalo de dispersão do betão convencional. É frequente serem reportados para o BAC resultados do módulo de elasticidade mais baixo, resistência à tracção por compressão diametral mais elevada, maior retracção e melhor aderência com o aço, EFNARC (2005).

A resistência do betão ao longo de um elemento *box-culvert* betonado com BAC variou menos do que num elemento semelhante betonado com betão convencional. O grau de compactação provocado pela vibração externa aplicada nas cofragens não é uniforme e depende do confinamento e distância à fonte de vibração. Um BAC com uma composição, produção e colocação adequadas é, em geral, mais compacto e homogéneo que um betão convencional equivalente, o que melhora o desempenho das estruturas feitas de BAC, em termos de capacidade resistente e durabilidade.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Agência de Inovação, S.A. e a colaboração das empresas do consórcio BACPOR: Grupo Mota-Engil, Sika e Maprel.

## 8. REFERÊNCIAS

EFNARC. The European Guidelines for Self-compacting Concrete. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org). 15-06-2005 11:00 (2005).

Mansur, M.A., ASCE, M. e Islam, M.M, Interpretation of concrete strength for non-standard specimens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, March/April, 151-155 (2002)

NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, *NORDTEST*, (1999).

Nunes, S., Experimental study and numerical modelling of self-compacting concrete. In: Walraven J, Blaauwendraad J, Scarpas T, Snidjer B, editors. *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Delft, The Netherlands, 857-865 (2004).

Nunes, S., Figueiras, H., Coutinho, J.S. e Figueiras, J., Relatório de Execução Material, 4º Semestre de Actividades, Consórcio BACPOR, (2005).

RILEM TC116-PCD, Permeability of concrete as a criterion of its durability, C: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete, *Materials and Structures*, **32**, 178-179 (1999).

## Betões de elevado desempenho

Aires Camões <sup>1</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

### RESUMO

Os betões de elevado desempenho (BED) são, actualmente, empregues apenas em situações particulares, sobretudo em edifícios altos e em estruturas localizadas em ambientes particularmente agressivos. Assim, o conhecimento associado a este tipo de betões não se encontra generalizado e é importante contribuir para a sua disseminação e, também, para a sua desmistificação, uma vez que os BED podem ser considerados como uma evolução dos betões convencionais, mas com elevada durabilidade.

Com o objectivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, urge reduzir a produção e o conseqüente consumo de cimento. Assim, se a substituição de elevados volumes de cimento por subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes, se revelar exequível, será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental.

Neste contexto, desenvolveu-se um programa experimental de forma a avaliar a possibilidade de produzir BED, fabricados com quantidades reduzidas de cimento e recorrendo à incorporação de materiais correntes, de baixo custo, comumente utilizados no fabrico de betões convencionais. O comportamento das misturas produzidas foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade.

Os resultados obtidos permitiram evidenciar que, para este tipo de betões, as exigências relacionadas com a resistência à compressão são, para a grande maioria das aplicações práticas, satisfeitas e que estes podem ser considerados de elevada durabilidade, o que os permite classificar como BED. Assim, é de esperar que a utilização mais generalizada deste tipo de BED permita edificar construções mais duráveis e contribuir significativamente para a sustentabilidade da construção.

### 1. INTRODUÇÃO

O BED é fabricado recorrendo a materiais de elevada qualidade cuidadosamente seleccionados, e a sua composição é determinada por intermédio de métodos que permitam otimizar a compacidade da mistura. Estes betões são misturados, colocados em obra, compactados e curados com o maior rigor possível, de modo a atingir elevados níveis de

---

<sup>1</sup> Professor Auxiliar (aires@civil.uminho.pt)

qualidade. Os BED são produzidos com uma reduzida relação água-ligante (A/L), que é assegurada pela presença de superplastificantes que possibilitam o fabrico de betões passíveis de aplicação em obra com relações A/L compreendidas entre 0.2 e 0.4. Em geral, os BED são dotados de resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos betões convencionais. No entanto, a resistência não é sempre a principal propriedade requerida para este tipo de betões. Por exemplo, um betão convencional dotado de elevada durabilidade e reduzida permeabilidade pode ser considerado como um BED, uma vez que apresenta níveis de desempenho elevado. Ou seja, um betão de elevada resistência (BER) pode ser definido como um BED, mas um BED nem sempre apresenta elevada resistência mecânica, ou seja, nem sempre é um BER.

Conforme é do conhecimento público, a produção de cimento está na origem de elevados teores de CO<sub>2</sub> expelidos para a atmosfera. Assim, de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado. Uma maior reutilização de cinzas volantes na indústria do betão, associada a uma substituição da dosagem de cimento contribuirá, certamente, para a redução de um importante problema de impacte ambiental.

Neste contexto, desenvolveu-se um programa experimental contemplando o fabrico e a caracterização experimental de três composições de betão distintas, incorporando elevadas quantidades de cinzas volantes. As composições de betão estudadas foram produzidas com 400, 500 e 600 kg/m<sup>3</sup> de ligante e com uma quantidade de substituição de cimento por cinzas volantes constante e igual a 60% (em massa). O seu comportamento foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados permitiram classificar estes betões de elevado volume de cinzas volantes como BED, devido à sua elevada durabilidade. Assim, estes betões revelaram-se promissores, podendo contribuir para a generalização da aplicação de um betão “amigo do ambiente”, de baixo custo e de elevada durabilidade.

## 2. EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DO BETÃO

A invenção do cimento portland por Louis Vicat em 1817, a do betão armado em 1848 por Lambot e a intervenção do arquitecto Auguste Perret em 1898, foram os pontos de partida para o uso de um material de construção que veio determinar um novo rumo à construção do século XX, tornando-se, nos dias de hoje, no material mais utilizado na construção (Coutinho (1988)).

A utilização generalizada do betão na construção está relacionada, principalmente, com a facilidade de moldagem de elementos mais ou menos complexos, com o baixo custo dos materiais e processos utilizados e, ainda, com a pretensão de assegurar durabilidade aos elementos de betão armado, ou seja, garantir que durante o período de vida previsto não são necessários, ou são reduzidos, os custos de manutenção das estruturas. Assim, não é de todo surpreendente que as evoluções registadas neste material estejam intimamente ligadas a duas características fundamentais: a rapidez de construção e a durabilidade do betão (Mehta (1999<sub>a</sub>)). No entanto, durante aproximadamente um século, o betão manteve-se como um material composto quase exclusivamente por uma mistura de agregados, cimento e água.

Em 1991, Mehta retrata a evolução do betão ao longo dos últimos cinquenta anos, enquadrada particularmente em relação às questões relacionadas com a durabilidade. Este autor indica que a maioria das evoluções surgidas não foram resultado directo da necessidade de aumentar a durabilidade do material. As principais evoluções registadas, com repercussão na durabilidade e na alteração da composição dos betões, incluem os melhoramentos surgidos

no cimento, as novas tecnologias implementadas com a utilização de betão pronto, o aparecimento de adjuvantes introdutores de ar, a introdução de adjuvantes redutores de água de alta gama (os superplastificantes, SP) e as evoluções entretanto verificadas na aplicação de adições minerais.

Os cimentos actuais diferem de forma substancial dos de há quarenta anos atrás, em especial no que se refere à sua composição e finura. Price (1974) e Tennis (1998) indicam que nos EUA o conteúdo de silicato tricálcico,  $C_3S$ , de um cimento portland tipo I aumentou de cerca de 30%, valor típico em 1950, para valores da ordem dos 45% a 50% em 1970 e 56% em 1998. Durante o mesmo período de tempo a finura do cimento sofreu um acréscimo de 100 para 400  $m^2/kg$ . Devido ao aumento do  $C_3S$  e à maior finura, o cimento portland moderno hidrata mais rapidamente. Assim, hoje em dia, é possível fabricar betões com resistências à compressão semelhantes e com uma menor quantidade de cimento e uma maior razão A/L. No entanto, estas alterações podem, também, originar problemas associados à retracção por secagem e ao calor de hidratação, afectando assim a durabilidade do material.

O aparecimento da indústria de betão pronto foi motivado pela necessidade, entretanto surgida nos anos cinquenta, de aumentar os ritmos de construção. Quando comparados com os betões produzidos em obra, o transporte e a bombagem requeridos ao betão pronto exigiram um aumento substancial da sua trabalhabilidade. Sem a utilização de um adjuvante redutor de água, a dosagem de água aumentou significativamente, causando uma diminuição na durabilidade do betão. Os betões prontos presentemente utilizados contam já com a incorporação de adições minerais e adjuvantes que asseguram a trabalhabilidade requerida, e são de utilização generalizada. A produção de betão pronto na União Europeia atingiu, em 2005, 369.6 milhões de metros cúbicos (ERMCO (2006)).

Os adjuvantes introdutores de ar, utilizados a partir dos anos quarenta, trouxeram um avanço notório na melhoria da durabilidade dos betões, permitindo reduzir drasticamente as despesas de manutenção de estruturas de betão expostas à acção do gelo-degelo, em particular de pavimentos, muros de retenção e tabuleiros de pontes.

Já em 1918, Abrams indicou que a chave para a produção de BER, se encontrava na redução da razão A/L. No entanto, uma vez que à água de amassadura cabe o papel essencial de assegurar a hidratação do cimento e conferir a necessária trabalhabilidade à mistura de modo a permitir a sua correcta aplicação em obra, a produção de um betão trabalhável esteve condicionada durante longos anos à impossibilidade de executar misturas com A/L inferior a 0.4. Mesmo com a utilização de adjuvantes redutores de água (plastificantes) era impossível dispersar suficientemente as partículas de cimento. Esta situação permaneceu inalterável até ao aparecimento dos SP, que se verificou nos anos setenta do século XX.

O uso de SP no betão revelou-se um dos maiores progressos na melhoria das características do material. É hoje possível fabricar betões trabalháveis com razões A/L próximas de 0.2, e obter betões de elevada resistência, elevada fluidez e elevada durabilidade. Nestes betões modernos, é a quantidade de SP que controla a trabalhabilidade ao contrário dos betões correntes onde este papel era desempenhado pela quantidade de água presente na amassadura.

As adições minerais podem ser incorporadas no betão com o intuito de reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, a trabalhabilidade e a durabilidade. A sua utilização permite, também, a reutilização de subprodutos industriais, e a eventual redução do custo do material. Adições minerais ultra finas como, por exemplo, a sílica de fumo ou o metacaulino de elevada reactividade foram recentemente incorporadas em betões. Só nos anos setenta é que as sílicas de fumo começaram a ser usadas na Escandinávia como adição no betão, demorando cerca de dez anos a serem aplicadas na América do Norte (Aitcin (1998)). Por intermédio da adição de sílica de fumo é possível produzir betões que atingem resistências à

compressão da ordem dos 100 a 150 MPa e que são passíveis de colocação em obra.

Apesar das evoluções entretanto surgidas, nos últimos cinquenta anos não se verificaram mudanças verdadeiramente revolucionárias na indústria do betão. A utilização de novos componentes (adjuvantes, adições activas, etc.) melhorou a qualidade dos betões, mas não proporcionou uma revolução como a sofrida no campo das telecomunicações ou mesmo na indústria automóvel (Neville e Aïtcin (1998)). A menos que surjam vantagens económicas muito significativas, será muito difícil alterar equipamentos e procedimentos usuais, tendo em vista a melhoria das características do material. Assim, a utilização de um novo material só será bem sucedida se satisfizer os critérios de exequibilidade da construção (transporte, moldagem, acabamento e cura) com eficiência e sem grandes inconvenientes (Almeida (1995)).

O sucesso dos BED reside no facto de os seus componentes não diferirem dos empregues em betões correntes, obrigando apenas à utilização de SP e, em certos casos, de adições activas, mantendo o essencial das condições de implementação e não interferindo substancialmente nos processos e equipamentos correntemente utilizados nos betões convencionais.

### 3. BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO

O aparecimento dos SP permitiu o fabrico de betões com razões A/L substancialmente reduzidas. Como nas primeiras aplicações deste tipo de betão se procurava a obtenção de elevadas resistências mecânicas, estes começaram a ser designados como BER. No entanto, a redução da razão A/L permitiu evidenciar melhorias significativas de outras características. Tornou-se, assim, possível executar betões com elevada fluidez, elevados valores do módulo de elasticidade, da resistência à flexão, à tracção e à abrasão, com reduzida permeabilidade e melhoria substancial da durabilidade. Neste contexto, a designação BER tornou-se inadequada para descrever a totalidade das melhorias verificadas nesta nova família de betões, surgindo, conseqüentemente, a expressão *betão de elevado desempenho*.

A designação BED foi empregue pela primeira vez por Mehta e Aïtcin em 1990 para classificar composições de betões que possuíssem três características diferentes: elevada trabalhabilidade, alta resistência e elevada durabilidade. Estava, portanto, estabelecida a principal distinção entre BER e BED: a elevada durabilidade exigida aos BED.

Como exemplo da inadequação da designação BER, pode ser apontado o descrito por Smith em 1996. O autor salienta a necessidade de aplicação de BED nos EUA, indicando que cerca de 12.5% das pontes existentes se apresentam estruturalmente deficientes. Cerca de 43500 pontes necessitam de manutenção acrescida, reabilitação substancial ou mesmo substituição. Assim, neste caso particular, os principais motivos para o uso de BED consistem na melhoria da durabilidade e na redução de custos de manutenção, reparação e substituição a longo prazo, podendo não ser condicionante a elevada resistência mecânica.

Tradicionalmente, as especificações relativas ao betão apenas enfatizavam a necessidade de determinada resistência à compressão e não davam a mesma importância à permeabilidade e durabilidade requeridas para o material. Serve apenas como um pequeno consolo constatar que a resistência à compressão de um certo betão está conforme o requerido contratualmente se este se apresenta fissurado, delaminado, desagregado ou sofrendo as três anomalias em simultâneo. Actualmente, é imperioso que as especificações tratem com igual importância os requisitos mecânicos e os necessários a uma adequada durabilidade, tais como: reduzido valor de A/L, reduzido potencial de retracção por secagem, baixa permeabilidade e apropriada quantidade de ar introduzida. De modo a reduzir a fissuração devida à retracção também deve ser limitado o conteúdo de pasta ligante da mistura (Mehta (1999)).

No entanto, ao contrário da designação BER, a expressão BED pode ser considerada demasiado vaga. O que é o desempenho de um betão? Como pode ser medido? É certo que a designação BER não deixa qualquer dúvida, excepto no estabelecimento da fronteira entre um betão convencional e um BER exclusivamente à custa da resistência à compressão. E se o material for prescrito devido a outro parâmetro que não a resistência à compressão? Se, por exemplo, for necessário um determinado betão para uma estrutura sujeita a condições ambientais adversas e elevado período de vida útil, requerendo, portanto, elevada durabilidade? O material não será, certamente, escolhido exclusivamente em função da sua resistência à compressão, podendo até ser suficiente atingir níveis correntes de resistências à compressão, da ordem dos 25 MPa.

A NP EN 206-1 (2005) considera que um betão para ser classificado como BER deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60. Porém, apesar de apresentar uma divisão clara entre BER e betões convencionais, esta norma não contempla o termo BED, não fazendo qualquer referência a este tipo de designação.

O ACI adoptou uma definição abrangente para BED, proposta em 1999 por Russel, baseada em Zia (1993): um betão que congrega a combinação de desempenhos e requisitos uniformes especiais, que não podem ser atingidos rotineiramente recorrendo a constituintes e amassaduras convencionais e práticas correntes de colocação e cura, é definido como sendo um BED. O ACI acrescenta, em comentário, que um BED é um betão em que certas características foram desenvolvidas para uma aplicação particular inserida num determinado ambiente. Exemplos de características que podem ser consideradas críticas numa aplicação concreta são: facilidade de colocação em obra; compactação sem segregação; resistências iniciais elevadas; propriedades mecânicas a longo prazo; permeabilidade; densidade; calor de hidratação; tenacidade; estabilidade volumétrica e elevado período de vida útil em ambientes agressivos. Este conjunto de características e propriedades não são autónomas e podem ser relacionadas entre si em função dos materiais e processos utilizados. Dito de outra forma, a tentativa de influenciar uma dessas propriedades, necessariamente repercute-se em, pelo menos, uma das restantes. Neste sentido, se para cumprir determinados objectivos, houver que cumprir vários dos parâmetros apresentados, estes devem ser claramente especificados.

Apesar de a designação BED não ser consensual e poder ser considerada algo ambígua, para fabricar um BED é necessário recorrer a um reduzido valor da razão A/L e, para tal, é essencial recorrer-se à adição de um adjuvante redutor de água de alta gama, um SP. Assim, um BED pode ser razoavelmente definido como um betão de reduzida razão A/L, inferior a 0.4. Esse valor não é fixo de forma arbitrária, e pretende reflectir a extrema dificuldade, ou mesmo a impossibilidade, de, para tais valores de A/L, produzir betões passíveis de serem colocados em obra sem a inclusão de SP.

#### 4. MATERIAIS, DOSAGENS E CARACTERÍSTICAS

Os materiais a utilizar para o fabrico deste tipo de betões não difere dos usados nos betões convencionais. Os BED são constituídos por cimento, agregados finos e grossos, adições minerais, SP e água.

Em geral, são empregues cimentos CEM I, da classe 42.5 ou 52.5, em quantidades elevadas, compreendidas, em geral, entre 400 e 500 kg/m<sup>3</sup>, podendo, no entanto, ultrapassar este valor.

Nos BED, as propriedades dos agregados assumem maior importância do que num betão convencional. Enquanto que num betão convencional as fissuras desenvolvem-se na pasta ligante e na interface agregado/pasta, devido ao fortalecimento da pasta ligante dos BED, a superfície de fractura penetra nos agregados, mobilizando a sua resistência, uma vez



que a capacidade de carga dos agregados e da pasta é, muitas das vezes, aproximadamente igual. Assim, para os BED os agregados deverão ser seleccionados criteriosamente, não devendo apresentar-se limpos e isentos de partículas aderentes. A fracção grossa dos agregados terá que ter uma rigidez e uma resistência à compressão apropriada (superior a 150 MPa) devido às inevitáveis concentrações de tensões sofridas. Devem apresentar uma forma aproximadamente cúbica, sendo de evitar os agregados de forma alongada e lamelar, e não devem conter sílica reactiva para evitar a reacção alcalis/sílica, mais preocupante neste tipo de betões devido à elevada dosagem de cimento com que são fabricados.

Para aumentar a compacidade da mistura, as areias devem ser um pouco mais grossas, com um módulo de finura de cerca de 3, uma vez que estes betões contêm já grande quantidade de partículas finas devido à elevada dosagem de ligante.

Um BED pode ser produzido utilizando apenas o cimento como material ligante. No entanto, uma substituição parcial de cimento por uma ou pela combinação de duas ou três adições minerais com propriedades cimentíceas, quando disponíveis a preços competitivos, pode ser vantajosa, não só sob o ponto de vista económico, mas também, sob o ponto de vista reológico e, em algumas situações, sob o ponto de vista da resistência e durabilidade.

A grande maioria das adições utilizadas nos BED são subprodutos industriais, que se não forem utilizados, irão ser acumulados em depósitos, o que acarretará inevitáveis riscos de poluição do solo, da água e do ar, para além de todos os inconvenientes paisagísticos (Mehta (1994)). Neste contexto, o seu consumo nos betões, para além das vantagens que se podem constatar no próprio material, é responsável por benefícios de ordem económica, de consumo de energia, de protecção ambiental e de conservação dos recursos naturais (Swamy (1986)).

A substituição parcial de cimento pode ser conseguida através do uso de cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, sílica de fumo, metacaulino e cinzas de casca de arroz. Contudo, comparada com a produção mundial de cinzas volantes, a disponibilidade das restantes adições minerais é consideravelmente limitada.

As adições mais frequentemente utilizadas em BED são, sem dúvida, as sílicas de fumo e as cinzas volantes. A sílica de fumo, cuja disponibilidade é bastante limitada, é, em geral, especificada em aplicações especiais devido à sua elevada pozolanicidade como, por exemplo, em estruturas expostas a ambientes de agressividade química elevada.

Apesar de não ser obrigatória a adição de sílica de fumo na produção de BED, é praticamente indispensável a sua inclusão em betões com resistência à compressão superior a 100 MPa (Neville e Aitcin (1998)). O elevado preço da sílica de fumo pode ser um factor inibidor da sua utilização. Sendo o custo da sílica de fumo aproximadamente igual a dez vezes o do cimento, a adopção de uma dosagem corrente de 10% de sílica de fumo em relação ao peso de cimento, pode elevar o custo do material aglomerante presente no betão para cerca do dobro.

Em relação à quantidade de ligante a empregar no fabrico de BED, generalizando, é possível indicar que oscila entre os 400 e os 500 kg/m<sup>3</sup>, podendo atingir, em determinados casos específicos, valores de 600 kg/m<sup>3</sup>, ou até mesmo superiores (Camões (2002)).

A dosagem óptima de sílica de fumo, segundo Larrard (1992) é de 20 a 25% da massa de cimento. No entanto, para percentagens menores a diferença de comportamento é diminuta e, considerando o custo da adição mineral e dos SP, a dosagem óptima de sílica de fumo a empregar deverá ser próxima dos 10%.

Valores da quantidade de SP entre 3 a 10 L/m<sup>3</sup> são correntes na composição de BED (Aitcin (1992)). A estes valores correspondem dosagens de 0.5 a 3.0% de extracto seco de SP em relação à massa de ligante, sendo típicas dosagens de 1.0 a 2.0%.

A quantidade de água a adicionar deverá ser a menor possível de modo a satisfazer os requisitos prescritos para a mistura enquanto fresca. Com o uso de adjuvantes redutores de

água de alta gama é possível colocar em obra betões com razão A/L inferior a 0.3 e abaixamento de cerca de 200 mm. Minimizando a quantidade de água a juntar à amassadura e permitindo ao SP controlar as características reológicas do conjunto, é possível maximizar os parâmetros do betão relacionados com a durabilidade. A adição de cinzas volantes, pode contribuir significativamente para a redução da razão A/L, dado o seu esperado efeito benéfico na trabalhabilidade dos betões.

Na Tabela 1 apresentam-se algumas composições de BED, disponíveis comercialmente nos EUA (PCA (2003)).

Tabela 1 – Composições de BED disponíveis comercialmente nos EUA (PCA (2003)).

	Composição					
	1	2	3	4	5	6
CEM I, kg/m <sup>3</sup>	564	475	487	564	475	327
sílica de fumo, kg/m <sup>3</sup>	—	24	47	89	74	27
cinzas volantes, kg/m <sup>3</sup>	—	59	—	—	104	87
brita calcária (D <sub>máx</sub> =12.5 mm), kg/m <sup>3</sup>	1068	1068	1068	1068	1068	1121
areia, kg/m <sup>3</sup>	647	659	676	593	593	742
SP, L/m <sup>3</sup>	11.6	11.6	11.22	20.11	16.44	6.3
SP retardador, L/m <sup>3</sup>	—	—	—	—	—	3.24
retardador, L/m <sup>3</sup>	1.12	1.05	0.97	1.46	1.5	—
A/L	0.28	0.29	0.29	0.22	0.23	0.32
Propriedades do betão fresco						
abaixamento, mm	197	248	216	254	235	203
densidade, kg/m <sup>3</sup>	2451	2453	2433	2486	2459	2454
teor em ar, %	1.6	0.7	1.3	1.1	1.4	1.2
temperatura, °C	24	24	18	17	17	23
Resistência à compressão (provetes cilíndricos $\phi$ 100 x 200 mm <sup>3</sup> ; cura húmida)						
3 dias, MPa	57	54	55	72	53	43
7 dias, MPa	67	71	71	92	77	63
28 dias, MPa	79	92	90	117	100	85
56 dias, MPa	84	94	95	122	116	—
91 dias, MPa	88	105	96	124	120	92
182 dias, MPa	97	105	97	128	120	—
426 dias, MPa	103	118	100	133	119	—
1085 dias, MPa	115	122	115	150	132	—
Módulo de elasticidade em compressão, (provetes cilíndricos $\phi$ 100 x 200 mm <sup>3</sup> ; cura húmida)						
91 dias, GPa	50.6	49.9	50.1	56.5	53.4	47.9

Associada à implementação em obra dos BED podem ser enunciadas, de forma sucinta, as seguintes características principais:

- durabilidade e tempo de vida útil: o emprego dos BED, devido à sua reduzida permeabilidade e elevada resistência à penetração de agentes agressivos, está, muitas das vezes, associado a requisitos de durabilidade das estruturas e respectivos tempos de vida útil, que podem ser definidos para períodos superiores a 100 anos;
- resistência à compressão e módulo de elasticidade: a elevada resistência à compressão dos BED permite a construção de pilares de dimensões mais reduzidas, o que pode levar a uma maior eficiência económica. O módulo de elasticidade é, também, superior ao dos betões convencionais, o que acarreta um aumento de rigidez, que pode ser condicionante, principalmente em edifícios altos sujeitos a

- importantes acções horizontais, como é o caso do vento ou dos sismos;
- perda de trabalhabilidade e temperatura: a perda de trabalhabilidade com o tempo é um dos problemas que pode afectar a colocação em obra deste tipo de betões, que pode ser resolvido recorrendo ao uso de um retardador. As elevadas dosagens de ligante, designadamente de cimento, podem originar importantes problemas relacionados com a elevada temperatura de hidratação desenvolvida, o que pode levar à necessidade de adopção de procedimentos em obra que permitam arrefecer os elementos de betão;
  - elevada resistência em idades iniciais: neste tipo de betões, é possível atingir resistências à compressão na ordem dos 25 MPa decorridas apenas 4 horas após a betonagem, o que permite uma mais rápida remoção dos moldes e consequente aumento do ritmo de construção;
  - cura: neste tipo de betões a cura tem que ser particularmente cuidada, uma vez que a presença de elevadas quantidades de cimento e reduzida dosagem de água pode potenciar riscos de fissuração por retracção, nomeadamente por retracção plástica e autogénea.

## 5. APLICAÇÕES

Devido às suas elevadas resistências mecânicas, um dos principais campos de aplicação deste tipo de betões consiste na sua utilização em elementos verticais (pilares e paredes) de edifícios altos. Outras das utilizações privilegiadas dos BED refere-se às estruturas situadas em ambientes particularmente agressivos, como é o caso de determinadas obras especiais, designadamente pontes. Neste tipo de aplicações, a elevada durabilidade deste material torna-o particularmente atractivo como meio de dotar as estruturas de um elevado tempo de vida útil, de 100 anos, ou mais.



Figura 1 – *Two Union Square*, Seattle, EUA.

Até ao momento, existem já variadas aplicações práticas deste tipo de betão, apresentando-se aqui, sucintamente, três aplicações de BED em edifícios altos (*Two Union*

*Square, Petronas Towers e Taipei Financial Center*) e em duas pontes (Ponte da Normandia e viaduto de Millau).

O edifício *Two Union Square* (Figura 1) situa-se em Seattle, nos EUA, tem 216 m de altura, 58 pisos, e a sua construção decorreu durante 1988 e 1989. Trata-se da primeira utilização de betão confinado em edifícios altos: os quatro pilares centrais, constituintes do núcleo central de rigidez da estrutura, foram realizados com tubos metálicos ocos com 3 m de diâmetro e 10 mm de espessura preenchidos no seu interior com BED. Os BED utilizados apresentaram um abaixamento elevado (250 mm), elevada resistência à compressão (91 MPa aos 2 dias; 119 MPa aos 28 dias e 145 MPa aos 119 dias de idade) e elevado módulo de elasticidade em compressão (50 GPa). As composições foram produzidas com 513 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 43 kg/m<sup>3</sup> de sílica de fumo e uma razão A/L particularmente reduzida, igual a 0.22.

As *Petronas Towers* (Figura 2), situadas em Kuala-Lumpur, na Malásia têm 452 m de altura, 88 pisos, a sua construção foi concluída em 1996 e ocupam, actualmente, o segundo lugar no ranking dos edifícios mais altos do mundo. Os BED utilizados foram fabricados com uma dosagem de 260 kg/m<sup>3</sup> de cimento portland, 260 kg/m<sup>3</sup> de cimento composto (incorporando 50 kg/m<sup>3</sup> de cinzas volantes), 30 kg/m<sup>3</sup> de sílica de fumo e uma razão A/L de 0.27. Os betões obtidos apresentaram elevada resistência à compressão (100 MPa de resistência média aos 28 dias de idade), elevado módulo de elasticidade em compressão (35.5 GPa aos 56 dias de idade) e um abaixamento de 200 mm.



Figura 2 – *Petronas Towers*, Kuala-Lumpur, Malásia.

Actualmente, o edifício mais alto do mundo situa-se em Taiwan, é o *Taipei Financial Center* – 508 m de altura e 101 pisos – (Figura 3), foi concluído em 2003 e incorpora, também, BED. Este edifício é dotado de uma estrutura resistente mista aço/betão, sendo o BED aplicado caracterizado por uma elevada trabalhabilidade e resistência à compressão (70 MPa). As composições utilizadas incorporaram sílica de fumo e escória granulada de alto-forno moída.

Outra aplicação típica deste tipo de betão está relacionada, também, com obras especiais, como é o caso das pontes. A ponte da Normandia (Figura 4), situada em França, foi construída durante 1988 e 1994, tem um comprimento total de 2141 m e o vão central é de

856 m que, aquando da sua inauguração (Janeiro de 1995), era o maior do mundo para este tipo de pontes (estaiadas). O BED utilizado foi composto por  $425 \text{ kg/m}^3$  de cimento composto, incorporando 8% de sílica de fumo, e por uma razão A/L de 0.36. Aos 28 dias de idade atingiu uma resistência média de 79 MPa e foi colocado em obra com um espalhamento compreendido entre 450 e 560 mm.



Figura 3 – *Taipei Financial Center*, Taiwan.



Figura 4 – *Ponte da Normandia*, França.

Outra ponte emblemática construída com BED é o viaduto de Millau (Figura 5), projectado de forma a garantir um período de vida útil de 120 anos. O BED utilizado atingiu uma resistência à compressão aos 28 dias de idade na ordem dos 60 MPa. Esta obra de arte tem 2460 m de comprimento, 340 m de altura máxima (mais 20 m que a torre Eiffel), vão

máximo de 342 m e durante a sua construção foram gastos cerca de 85000 m<sup>3</sup> de betão, dos quais 50000 m<sup>3</sup> de BED, e a sua construção decorreu entre Outubro de 2001 e Dezembro de 2004.

Em Portugal, existem já várias aplicações deste tipo de betão, sendo de destacar as aqui apresentadas: ponte Vasco da Gama (Figura 6), situada na cidade de Lisboa, e Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do porto de Lisboa (Figura 7).



Figura 5 – Viaduto de Millau, França.



Figura 6 – Ponte Vasco da Gama, Lisboa.

A ponte Vasco da Gama é a mais longa da Europa, com os seus 17,2 km de comprimento e o vão principal é de 420 metros. Para a sua construção (concluída em 1998) foi, pela primeira vez em Portugal, exigido à empresa fornecedora de betão pronto um BED, satisfazendo um elevado padrão de qualidade. Para além das usuais preocupações com a

resistência e a trabalhabilidade do betão, exigiu-se uma durabilidade tal que assegurasse um período de vida útil de 120 anos, sem necessidade de intervenções de manutenção e reparação de grande vulto. Identificados os principais mecanismos de degradação do betão, foi possível estabelecer rigorosos critérios de durabilidade, cujo cumprimento se revelou condicionante. Satisfazendo as exigências de durabilidade, foi possível colocar em obra betões com abaixamentos medidos no cone de Abrams compreendidos entre 200 mm e 230 mm e atingir resistências à compressão médias aos 28 dias de idade de 61.9 MPa a 77.3 MPa. Para tal, foram fabricadas composições com 360 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 20% de cinzas volantes e com uma razão A/L compreendida entre 0.34 e 0.31 (Taborda (1998)).



Figura 7 – Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do porto de Lisboa.

O Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do Porto de Lisboa encontra-se localizado em ambiente marítimo, portanto numa zona particularmente agressiva, sujeita, nomeadamente, à acção dos cloretos. De acordo com o descrito por Appleton *et al* (2005) a qualidade necessária aos betões foi definida conforme preconizado na NP ENV206 (1993) e na E378 (1996), tendo sido determinadas as respectivas classes de exposição ambiental. Este tipo de abordagem resultou na imposição de restrições a cumprir relativamente à classe de resistência dos betões, respectivos teores em cimento, relações A/L e espessuras de recobrimento. Contudo, o estabelecimento destas restrições tem como base um período de vida útil de 50 anos, que se considerou insuficiente para uma obra desta natureza. Assim, foi especificado um conjunto de requisitos para o betão, considerados capazes de adequarem a qualidade do betão ao ambiente agressivo em questão. Neste sentido, foram impostos, adicionalmente, os seguintes requisitos, a nível da composição do betão: adopção obrigatória de sílica de fumo (15 a 30 kg/m<sup>3</sup>); relação A/C inferior a 0.4; dosagem de cimento entre 350 a 400 kg/m<sup>3</sup>. Foram, também, especificados requisitos adicionais ao nível do desempenho das composições, consubstanciados em valores limites dos resultados de determinados ensaios: penetração de água; absorção de água por capilaridade; resistência à penetração de cloretos; porosidade. O estudo da composição a adoptar conduziu a uma composição com 440 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 40 kg/m<sup>3</sup> de sílica de fumo, uma relação A/L de 0.35 e a necessidade de utilizar um SP. Com esta composição foram atingidos todos os requisitos

impostos, tendo-se obtido uma resistência à compressão média de 89 MPa.

## 6. BETÕES COM ELEVADO VOLUME DE CINZAS VOLANTES

Conforme referido, actualmente, o principal campo de aplicação dos BED confina-se a obras especiais, e este tipo de betão deverá continuar a ter um impacto moderado na indústria da construção, sendo a sua aplicação não generalizada e condicionada a casos concretos, abrangendo apenas alguns nichos de mercado. Devido à simplicidade tecnológica, ao reduzido custo inicial e à ampla vantagem ambiental, os betões produzidos com SP e grandes volumes de cinzas volantes ou escórias poderão ter um elevado impacto na indústria da construção. O seu uso pode ser estendido a diversos tipos de estruturas, aproveitando uma melhoria significativa de determinadas características específicas do material, nomeadamente da sua durabilidade.

O betão, devido à elevada quantidade utilizada na construção, é um dos veículos ideais para a incorporação segura e económica de milhões de toneladas de resíduos e subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes provenientes de centrais termoeléctricas. Assim, se se revelar exequível, a substituição de grandes quantidades de cimento por cinzas volantes, será altamente vantajosa sob o ponto de vista da economia, da eficiência energética, da durabilidade e dos benefícios ecológicos e ambientais em geral (Malhotra e Mehta (2002)).

A produção mundial de cinzas de carvão é estimada em mais de 700 milhões de toneladas por ano, das quais pelo menos 70% (cerca de 500 milhões de toneladas) são cinzas volantes que são adequadas e podem ser usadas como adição pozolânica em betões ou outros produtos de cimento (Mehta (1999<sub>b</sub>)). Infelizmente, apenas aproximadamente 20% das cinzas volantes disponíveis mundialmente são utilizadas para o fabrico de cimento e de betão. Neste contexto, e de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado (Malhotra e Mehta (2002)). Uma maior reutilização de cinzas volantes na indústria do betão, associada a uma substituição da dosagem de cimento contribuirá, certamente, para a redução de um importante problema de impacte ambiental. Assim, a incorporação de elevados volumes de cinzas volantes em betões é um dos meios possíveis para produzir um betão mais “amigo do ambiente”.

Nestas circunstâncias, desenvolveu-se um programa experimental contemplando o fabrico e a caracterização experimental de três composições de betão distintas, incorporando elevadas quantidades de cinzas volantes. As composições de betão estudadas foram produzidas com 400, 500 e 600 kg/m<sup>3</sup> de ligante e com uma quantidade de substituição de cimento por cinzas volantes constante e igual a 60% (em massa). O seu comportamento foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade. A durabilidade das composições estudadas foi avaliada por intermédio de ensaios de permeabilidade ao oxigénio e à água, de absorção de água por imersão e por capilaridade, de resistividade e de determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por meio de ensaios de migração em regime não estacionário.

Maior desenvolvimento acerca da campanha experimental realizada está disponível em Camões (2005), (2006).

### 6.1. Materiais, fabrico e conservação

Como materiais constituintes das três diferentes composições de betão foram seleccionados: cimento Portland CEM I 42.5R, cinzas volantes (CV), provenientes da Central



Termoeléctrica do Pego, areia fluvial silícea (máxima dimensão de 2.38 mm e módulo de finura igual a 2.53), brita granítica (máxima dimensão de 9.53 mm e módulo de finura igual a 5.75) e um SP.

Tabela 2 – Composição e trabalhabilidade dos betões.

Composição	A/L	CEM (kg/m <sup>3</sup> )	CV (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	SL (mm)	F (mm)
C400	0.27	160	240	780	1170	185	480
C500	0.23	200	300	731	1097	175	470
C600	0.20	240	360	685	1027	195	510

As composições dos betões produzidos apresentam-se na Tabela 2, bem como os resultados dos ensaios de abaixamento (SL) e espalhamento (F).

As dosagens dos agregados foram determinadas experimentalmente de modo a maximizar a compacidade do esqueleto granular, tendo-se obtido uma relação brita/areia igual a 1.5. A razão A/L adoptada para cada composição foi estabelecida por intermédio de amassaduras experimentais prévias, realizadas com o objectivo de obter um abaixamento similar em todas as composições de cerca de  $185 \pm 10$  mm.

De cada uma das composições produzidas foram recolhidos provetes cúbicos de 100 mm de aresta e cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura com o objectivo de avaliar, respectivamente, a resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral. Para cada composição, foi ainda moldada uma placa de betão de modo a permitir a extracção de carotes, posteriormente submetidos a ensaios relacionados com a aferição de indicadores de durabilidade.

Após a betonagem, os provetes foram mantidos durante 48 horas a uma temperatura de 21 °C e 80% de humidade relativa. Decorrido esse período de tempo, os provetes foram desmoldados e conservados imersos em água à temperatura de 21 °C até à data de realização dos ensaios.

## 6.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais

Na Tabela 3 apresentam-se os principais resultados obtidos na campanha experimental desenvolvida. Para cada ensaio apresentam-se os valores médios obtidos, seguidos dos respectivos coeficientes de variação ( $\delta$ ).

## 6.3. Resistência à compressão e resistência à tracção por compressão diametral

Na Figura 8 é possível observar a evolução das resistências mecânicas determinadas ao longo do tempo. Com base nos resultados obtidos, apresentados na Figura 8 e na Tabela 3, é possível constatar que é possível produzir um betão de moderada resistência à compressão contendo apenas 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento e que atinge, aos 28 dias de idade, uma resistência à compressão de cerca de 35 MPa. É de realçar que este nível de resistência à compressão corresponde a um valor típico dos betões convencionais e que satisfaz as exigências da grande maioria das aplicações de betão. Aumentando a dosagem de cimento para 200 ou 240 kg/m<sup>3</sup> (valores ainda reduzidos quando comparados com os empregues em betões convencionais), a resistência à compressão aos 28 dias de idade aumenta para cerca de 45 MPa ou 55 MPa, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados experimentais.

	Idade (dias)	C400	C500	C600
Resistência à compressão $f_{cm,cubo}$ (MPa) / $\delta$ (%)	7	21.3/2.1	26.9/2.2	36.8/2.5
	28	33.9/5.4	47.0/0.1	52.8/2.0
	365	41.0/5.2	58.3/4.4	79.1/2.2
Resistência à tracção por compressão diametral $f_{ctm,sp}$ (MPa) / $\delta$ (%)	7	1.6/4.9	2.0/24.1	2.0/7.9
	28	1.8/14.7	2.0/8.9	2.8/2.8
	365	3.9/18.3	4.2/9.7	4.2/15.3
Coefficiente de absorção capilar $S_{cm}$ (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>0.5</sup> ) / $\delta$ (%)	365	0.046/9.7	0.047/11.8	0.046/6.3
Porosidade $P_m$ (%) / $\delta$ (%)	365	11.9/2.5	10.8/3.1	11.8/3.5
Coefficiente de permeabilidade ao oxigénio $K_{Om}$ (x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ) / $\delta$ (%)	365	3.9/47.6	0.9/26.3	0.1/24.2
Coefficiente de permeabilidade à água $K_{Wm}$ (x10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> ) / $\delta$ (%)	365	2.16/112.2	0.39/51.0	0.35/77.8
Coefficiente de difusão dos cloretos $D_m$ (x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s) / $\delta$ (%)	365	0.96/21.0	0.60/26.9	0.53/54.6
Resistividade eléctrica $\rho_m$ (k $\Omega$ m) / $\delta$ (%)	365	1.09/58.0	1.42/62.9	1.52/37.2

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral podem ser considerados de acordo com o esperado, uma vez que são comparáveis com os normalmente obtidos em betões convencionais com resistência à compressão similar.

É importante salientar que a resistência à compressão deste tipo de betão, para além de garantir a obtenção de valores adequados aos 28 dias para a grande maioria das aplicações práticas, continua a evoluir consideravelmente ao longo do tempo devido à reacção pozolânica das cinzas volantes. Decorrido um ano de idade, os betões estudados atingiram aproximadamente 40 MPa, 60 MPa e 80 MPa de resistência à compressão.

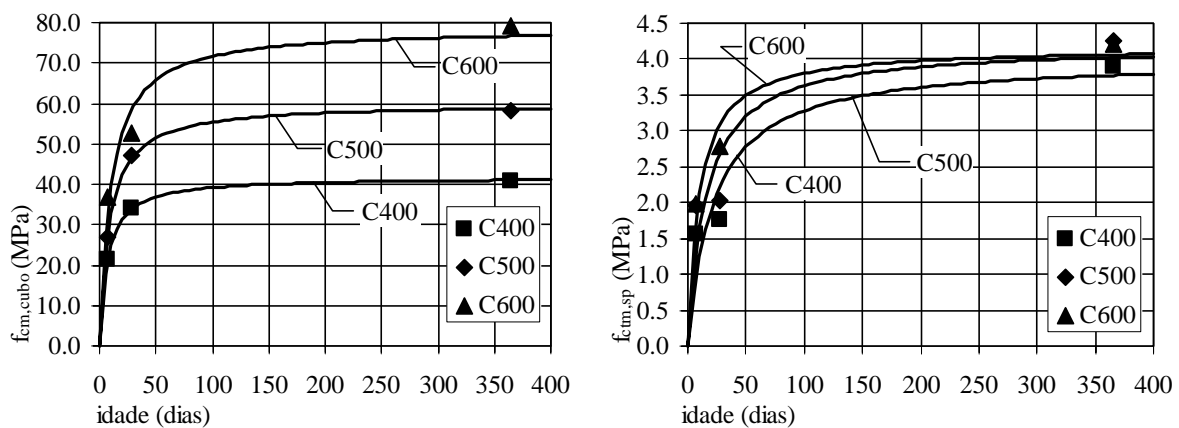


Figura 8 – Evolução com o tempo da resistência à compressão média ( $f_{cm,cubo}$ ) e da resistência à tracção por compressão diametral média ( $f_{ctm,sp}$ ).

#### 6.4. Absorção capilar e porosidade

Os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 9, relativos ao ensaio de absorção

de água por capilaridade, estão expressos pelo coeficiente de absorção capilar ( $S_c$ ) que corresponde ao declive da curva representativa da água absorvida por unidade de área *versus* a raiz quadrada do tempo durante as primeiras quatro horas de ensaio.

Por observação dos resultados obtidos, é possível constatar que o ensaio de absorção de água por capilaridade não permitiu distinguir os diferentes betões testados, não tendo sido sensível à variação da quantidade de ligante e da razão A/L dos mesmos. No entanto, os valores obtidos, que podem ser considerados extremamente reduzidos, mostram que estes betões apresentam uma tendência diminuta para absorver água por capilaridade. Como a absorção capilar é um mecanismo preponderante de entrada de água e de agentes agressivos através do betão, os betões em estudo podem ser considerados como de elevada durabilidade.

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão sob vácuo ( $P_m$ ) também não se revelaram sensíveis às diferentes composições testadas. Os valores alcançados atingiram valores relativamente elevados, nomeadamente quando comparados com os restantes indicadores de durabilidade determinados, o que parece indicar que estes betões têm uma porosidade aberta considerável mas que a rede de poros é discreta, ou seja, que há uma reduzida interconectividade entre os poros. O elevado teor de carbono das cinzas volantes também pode justificar o ocorrido pois, como é sabido, as partículas de carbono apresentam uma grande apetência em absorver água.

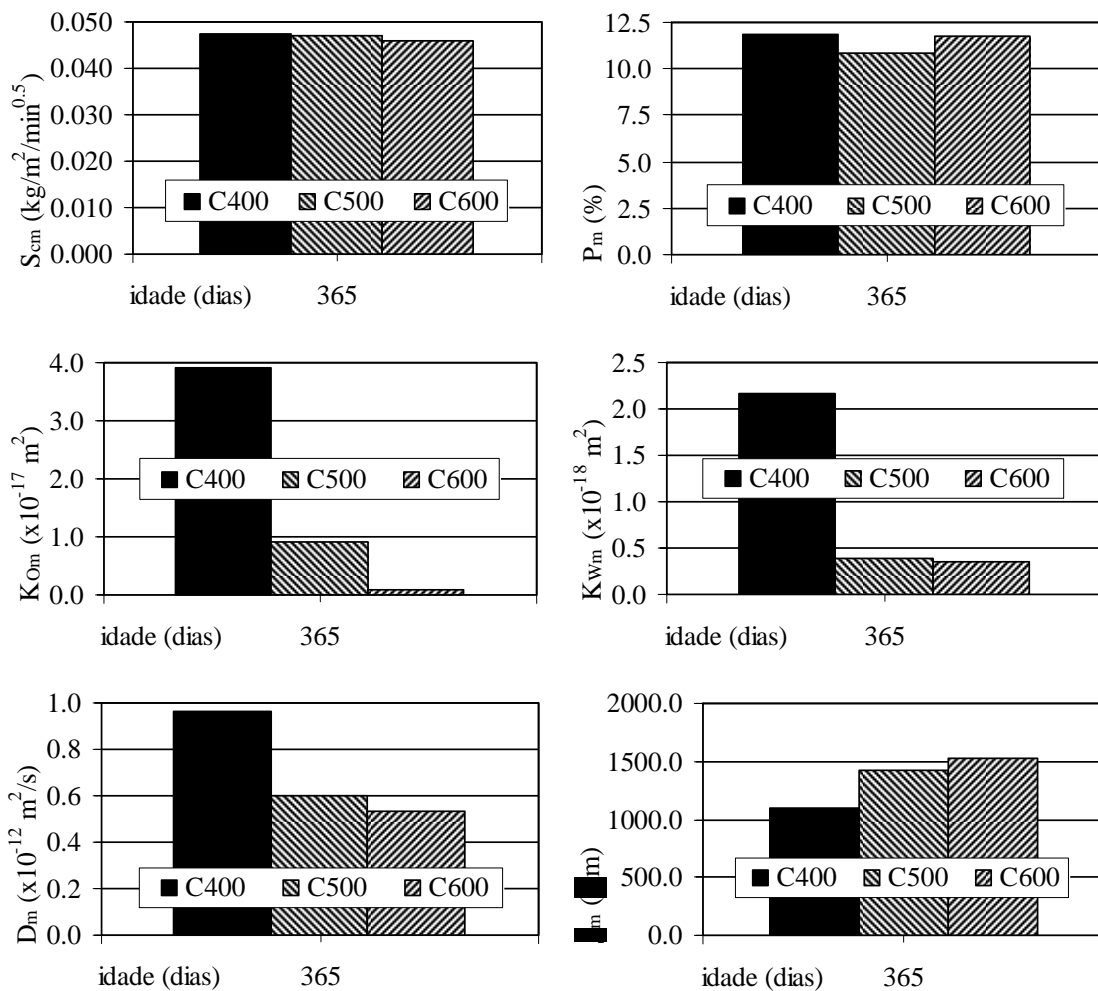


Figura 9 – Resultados dos ensaios de durabilidade.

### 6.5. Permeabilidade ao oxigénio e à água

Observando os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade ao oxigénio ( $K_{Om}$ ) e à água ( $K_{Wm}$ ), é possível constatar que o aumento da quantidade de ligante suscitou uma redução dos respectivos coeficientes de permeabilidade, influenciando favoravelmente o desempenho das composições. Este aspecto é aparentemente mais relevante quando a composição C400 é comparada com as restantes. Relativamente à permeabilidade à água, parece não haver ganhos significativos em aumentar a quantidade de ligante de 500 (C500) para  $600 \text{ kg/m}^3$  (C600). Os resultados obtidos, em geral, revelaram-se reduzidos sendo possível classificar os betões estudados como de elevada resistência à penetrabilidade dos fluidos testados.

### 6.6. Penetração de cloretos

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 9, o coeficiente de difusão dos cloretos por migração ( $D_m$ ) diminui com o aumento da dosagem de ligante. Este efeito é mais pronunciado aquando do acréscimo de ligante de 400 para  $500 \text{ kg/m}^3$  do que de 500 para  $600 \text{ kg/m}^3$ . Atendendo aos resultados experimentais apresentados por Gjörv (1996), os valores de  $D_m$  determinados indicam que estes betões são dotados de uma extrema resistência à penetração de cloretos.

### 6.7. Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica foi determinada utilizando a intensidade de corrente inicial do ensaio de migração de cloretos. Os valores da resistividade eléctrica ( $\rho_m$ ) foram determinados de acordo com a lei de Ohm. A Tabela 3 e a Figura 9 mostram que, em geral, os resultados obtidos estão em concordância com os alcançados no ensaio de migração de cloretos. Os resultados demonstram que existe uma forte relação entre o coeficiente de difusão dos cloretos por migração ( $D_m$ ) e a resistividade eléctrica ( $\rho_m$ ) e que esta grandeza permite detectar as diferenças de resistência à penetração de cloretos associadas às diferentes quantidades de ligante e respectivas razões A/L usadas.

## 7. CONCLUSÕES

O BED devido, fundamentalmente, à sua elevada durabilidade, é especialmente adequado para construções situadas em ambientes particularmente agressivos. A utilização deste tipo de betão permite que as estruturas possam ter um elevado tempo de vida útil, de 100, ou mais, anos e pode ser considerado como uma das maiores evoluções sofridas na tecnologia dos betões. Contudo, esta evolução não pode ser considerada como revolucionária e os BED devem ser entendidos como uma continuidade dos betões convencionais. São betões que podem ser produzidos com o mesmo tipo de materiais mas onde é exigido um controlo criterioso das matérias-primas e da sua colocação em obra. A principal diferença destes betões reside no facto de os BED incluírem um adjuvante SP que permite uma redução substancial da relação A/L, para valores inferiores a 0.4.

Os BED são fabricados, em geral, recorrendo a uma elevada dosagem de cimento, e são dotados de elevadas resistências mecânicas e durabilidade acrescida. Contudo, para a maioria das aplicações práticas, a resistência à compressão de um betão convencional é suficiente. No entanto, não é expectável que estes BED venham a ser de utilização generalizada, mas sim, que, tal como actualmente, sejam aplicados em situações particulares

tais como pontes e edifícios altos.

Por outro lado, é sabido que a produção e o consequente consumo de cimento deve ser diminuído com o objectivo de contribuir para a sustentabilidade da construção. Contudo, esta diminuição não deve comprometer o necessário desempenho das estruturas de betão, de forma a garantir a manutenção de períodos de vida útil suficientemente alargados. Assim, se a substituição de elevados volumes de cimento por subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes, se revelar exequível, será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental. Neste contexto, os betões com elevado volume de cinzas volantes, podem ser uma alternativa bastante interessante. A campanha experimental desenvolvida permitiu concluir que:

- é possível produzir betão de elevada trabalhabilidade com cerca de 35 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade utilizando apenas 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 400 kg/m<sup>3</sup> de ligante (C400). Uma vez que este valor de resistência à compressão é suficiente para cumprir os requisitos exigidos na grande maioria das aplicações práticas de betão estrutural, a necessidade de obtenção de níveis de resistência correntes não parece ser obstáculo à utilização mais generalizada deste tipo de betões;
- aumentando a quantidade de ligante para 500 (C500) ou 600 kg/m<sup>3</sup> (C600) e mantendo a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes de 60%, é possível garantir a obtenção de valores de resistência à compressão mais elevados, atingindo aos 28 dias de idade aproximadamente 45 MPa ou 55 MPa, respectivamente;
- comparando este tipo de betão com o betões sem inclusão de adições, constata-se que os betões com elevado volume de cinzas volantes podem-se considerar vantajosos no que concerne ao desenvolvimento da resistência ao longo do tempo. Os resultados obtidos demonstram que é possível atingir resistências à compressão aos 365 dias de idade com cerca de 40 MPa (C400), 60 MPa (C500) e 80 MPa (C600);
- todos os indicadores de durabilidade aferidos indicam que este tipo de betões apresenta elevada durabilidade, o que possibilita a sua classificação como BED.

Portanto, estes betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes, dotados de elevada trabalhabilidade e incorporando materiais de baixo custo apresentam vantagens significativas quando comparados com os betões convencionais. Tendo em vista a generalização da sua aplicação, é importante realçar que, em geral, os requisitos relacionados com as características mecânicas são perfeitamente alcançáveis e que este tipo de betão permite erigir construções mais duráveis e contribuir de maneira significativa para a sustentabilidade da construção.

Contudo, deve ser salientado que os ensaios realizados não englobaram a totalidade das acções ambientais, nomeadamente a resistência ao gelo-degelo. Relativamente a este tipo de agressividade, será expectável que estes betões, devido ao elevado teor de carbono das cinzas volantes, não mantenham o mesmo nível de desempenho.

É também importante referir que as condições de cura reais em obra podem diferir consideravelmente das testadas, o que pode comprometer drasticamente o desempenho destes betões. Para que a aplicação em obra deste tipo de betões tenha sucesso é fundamental assegurar que a cura e conservação sejam particularmente cuidadas.

## 8. REFERÊNCIAS

Abrams, D.A., Design of concrete mixtures, *Structural materials research laboratory*, Chicago (1918).

Aïtcin, P.-C., The use of superplasticizers in high performance concrete, *High performance concrete – from material to structure*, Yves Malier ed., E&FN SPON, London, 14-33 (1992).

Almeida, I.R., Aspectos práticos relacionados com a produção e a utilização dos concretos de alto desempenho, *Engevista*, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, I (1), 73-82 (1995).

Appleton, J., Travassos, N., Appleton, P., Edifício do centro de coordenação e controlo de tráfego do porto de Lisboa – Com inclinação sobre o Tejo, *Engenharia e Vida*, II (14), 22-29 (2005).

Camões, A., Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, 1-456 (2002).

Camões, A., Betões de Elevado Desempenho com Elevado Volume de Cinzas Volantes, *Engenharia Civil/Civil Engineering*, Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 23, 55-64 (2005).

Camões, A., Durability of High Volume Fly Ash Concrete, *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21, 8 p. (2006).

Coutinho, A.S., *Fabrico e propriedades do betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Volume I, Lisboa, 1-401 (1988).

E378, Betões – guia para a utilização de ligantes hidráulicos, Documentação normativa, *especificação LNEC*, Lisboa, 1-11 (1996).

ERMCO, European ready-mixed concrete industry statistics – year 2005, 1-12 (2006).

Larrard, F., Ultra fine particles for making very high performance concretes, *High performance concrete – from material to structure*, Yves Malier ed., E&FN SPON, London, 34-47 (1992).

Gjørsv, O.E., Performance and Serviceability of Concrete Structures in the Marine Environment, *Proceedings of Symposium on Concrete for Marine Structures*, Edit. P.K. Mehta, CANMET/ACI, 259-279 (1996).

Malhotra, V.M., Mehta, P.K., *High Performance, High Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*, CANMET, Ottawa, Canada (2002).

Mehta, P.K., Durability of concrete – fifty years of progress?, *Durability of concrete*, P. Kumar Mehta ed., Second International Conference, Montreal, Canada, 1-30 (1991).

Mehta, P.K., Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments, *Advances in cement and concrete*, Proceedings of an Engineering Foundation Conference, Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar ed., University of New Hampshire, ASCE, 243-256 (1994).

Mehta, P.K., Advancements in concrete technology, *Concrete International*, ACI, 21 (6), 69-76 (1999a).

Mehta, P.K., Concrete Technology for Suitable Development, *Concrete International* 21 (11), 47-53 (1999b).

Mehta, P.K., Aïtcin, P.-C., Principals underlying the production of high performance concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, ASTM, 12 (2), 70-78 (1990).

Neville, A.M., Aïtcin, P.-C., High-performance concrete – an overview, *Materials and structures / Matériaux et constructions*, 31 (206), 111-117 (1998).

NP EN 206-1, Betão – parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, *IPQ*, Lisboa, 1-84 (2005).

NP ENV 206, 1993, Betão – comportamento, produção e critérios de conformidade, *IPQ*, Lisboa, 1-54 (1993).

- PCA, Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association (2003).
- Price, W.H., The practical qualities of cement, *ACI journal*, proceedings, 71, 436-444 (1974).
- Russell, H.G., ACI defines high performance concrete, *Concrete International*, ACI, 21 (2), 56-57 (1999).
- Smith, D.C., The promise of high performance concrete, *Public roads on-line*, <http://www.tfhr.gov/pubrds/fall96/p96au31.htm> (1996).
- Swamy, R.N., Cement replacement materials, Survey University Press, London (1986).
- Taborda, J., Bridge Vasco da Gama – high performance concrete, *Proceedings of the 12th European Ready Mixed Concrete Congress ERMCO98*, Lisboa, 723-735 (1998).
- Tennis, P.D., Portland cement characteristics – 1998, *Concrete technology today*, Portland cement association, 20 (2), 1-3 (1998).
- Zia, P., Preface, *High performance concrete in severe environments*, ACI SP-140, Paul Zia ed. (1993).

## Projecto de durabilidade de betão

Rui Miguel Ferreira <sup>1</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

### RESUMO

A grande maioria das especificações para betão são de natureza prescritivas. É do conhecimento comum geral que estas especificações limitam a capacidade dos intervenientes no processo construtivo em tirar partido do conhecimento e da experiência adquirida, bem como a de aproveitar materiais economicamente disponíveis.

Especificações prescritivas tradicionais tratam o betão de uma forma demasiado simplista, assumindo que um conjunto de especificações prescritivas resultarão na produção de um betão com o mesmo desempenho, quando na realidade o betão, como a maioria dos materiais, varia consideravelmente. Duas amassaduras com proporções de constituintes idênticas poderão exibir propriedades muito diferentes.

Por outro lado, as especificações baseadas no desempenho realçam as propriedades tais como a consistência, a resistência, a durabilidade, e a estética, premiando a qualidade, a inovação e o conhecimento tecnológico para além de promover um uso melhorado dos materiais.

De forma a obter uma durabilidade controlada e um desempenho de longa duração de estruturas de betão armado é necessário uma atenção especial na fase de projecto da estrutura. Desenvolvimentos recentes sobre procedimentos baseados na avaliação do desempenho têm criado as bases para o projecto de durabilidade de estruturas de betão armado. Apesar da falta de dados relevantes, esta abordagem tem sido aplicada com sucesso em várias estruturas de betão armado onde foram especificados requisitos para um maior controlo da durabilidade e da vida útil.

Neste artigo são abordados, genericamente, os princípios fundamentais relacionados com a execução de um projecto de durabilidade. É comparado a utilização de requisitos prescritivos com os de desempenho. As vantagens da abordagem baseada no desempenho são demonstradas através de um exemplo com a aplicação de um modelo de degradação.

---

<sup>1</sup> Professor Auxiliar (rmf@civil.uminho.pt)



## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, as normas apenas contêm exigências específicas quanto ao projecto de estruturas tendo em conta a capacidade de carga dos seus elementos. A durabilidade é muitas vezes colocada em segundo plano e por isso as exigências para a durabilidade são tipicamente implícitas nas normas de estabilidade estrutural.

A durabilidade das estruturas de betão é geralmente baseada em requisitos prescritivos. Exemplo disso são as exigências de recobrimento mínimo, máxima razão água/cimento, quantidade mínima de cimento e tipo de cimento. Ao aplicar estes requisitos, o projectista assume que uma determinada estrutura atinge uma vida de serviço longa mas não especificada, isto é, não quantificada. Esta situação é, em muitos casos, inaceitável. A exigência de um formato de projecto que incorpore a durabilidade e vida de serviço da estrutura nasceu do crescente interesse expresso pelos donos-de-obra em colocar exigências para a vida útil de serviço da estrutura. Actualmente, começa-se a compreender que a durabilidade é parte essencial na qualidade e desempenho das estruturas e que a qualidade e custo total inclui não só o custo de construção mas também o de manutenção e reparação.

O controlo da durabilidade de estruturas de betão armado será um dos principais desafios para o engenheiro do futuro. O passado ensinou-nos que o procedimento tradicional de projecto, construção e uso de estruturas de betão armado não tem resultado no desempenho de longa duração esperado. Os processos de deterioração, em particular a corrosão das armaduras, as reacções álcali-agregado, e os ataques de sulfatos têm causado imensos danos a estruturas. De forma a melhorar esta situação um novo conceito de projecto de durabilidade precisa de ser implementado (Fluge 2001). De forma análoga ao procedimento de projecto estrutural, o projecto de durabilidade deve ser baseado no desempenho tendo em conta a natureza probabilística da agressividade ambiental, dos processos de degradação e das propriedades dos materiais envolvidos.

De forma a obter uma durabilidade controlada e um desempenho de longa duração de estruturas de betão armado é necessário uma atenção especial na fase de projecto da estrutura. Desenvolvimentos recentes sobre procedimentos baseados na avaliação do desempenho têm criado as bases para o projecto de durabilidade de estruturas de betão armado (DuraCrete 2000). Apesar da falta de dados relevantes, esta abordagem tem sido aplicada com sucesso em várias estruturas de betão armado onde foram especificados requisitos para um maior controlo da durabilidade e da vida útil (Gehlen 1999, Leira 2000).

## 2. ABORDAGEM PRESCRITIVAS VS. ABORDAGEM DE DESEMPENHO

As normas e as especificações são a referência para comparação da qualidade e manutenção da uniformidade de produtos. A conformidade com normas pode ser baseada quer em requisitos prescritivos quer em requisitos de desempenho. As normas de betão são de uma forma geral do tipo prescritivo, com requisitos para diversos parâmetros que controlam a qualidade do betão em relação às condições de exposição e da espessura de recobrimento do betão das armaduras. Não há indicação da vida útil espectável e não há indicações de como variar os valores prescritos de forma a verificar uma determinada vida útil pretendida (Helland 2001). O projectista terá que adivinhar qual a vida útil esperada ao recorrer a determinada norma. Esta resulta numa situação inaceitável que não tem em conta as necessidades quer do projectista quer do dono da obra.

As normas prescritivas são fáceis de aplicar porque baseiam-se em abordagens simplificadas que se aplicam geralmente, a muitas situações, mas não a todas. Possuem também limitações, como a tendência em resultar, na melhor das hipóteses, em projectos

demasiado conservadores, e, em alguns casos, potencialmente perigosos (Gjørv 2001). Exemplo disso são as exigências de recobrimento mínimo, máxima razão água/cimento, quantidade mínima de cimento, teor de ar e tipo de cimento. As normas prescritivas são afectadas pela escolha de materiais e se o produtor/construtor compreende claramente a sua aplicação.

A abordagem de requisitos de desempenho permite ao engenheiro otimizar o projecto, e alcançar um benefício potencial em termos de custo, sem sacrificar a segurança geral da estrutura (Bukowski 1996). Esta abordagem concentra-se no objectivo a alcançar em vez do meio como o obter. O desempenho desejado é especificado e não o método de ensaio nem o material a utilizar para o alcançar. Podem existir graus de requisitos de desempenho. O desempenho não tem que ser absoluto, contudo nunca deve comprometer outros atributos da estrutura. Tem a vantagem de retirar barreiras à inovação e permitir a optimização do custo. A abordagem de desempenho requer que hajam ensaios de referência e/ou meios aceitáveis para calcular o desempenho, ou uma combinação dos dois (Bickley 2006).

Ao comparar ambas as abordagens, verifica-se que a prescritiva descreve uma solução aceitável enquanto que a de desempenho descreve a solução necessária. A abordagem baseada em desempenho requer ensaios e verificação do material específico, enquanto que normas prescritivas assumem que a verificação tenha sido efectuada, o que nem sempre garante a implementação adequada em obra (Bukowski 1996).

A transição de normas prescritivas para normas de desempenho nem sempre é fácil; requer ponderação e experiência em desenvolver ensaios de desempenho que avaliam os materiais em condições aplicáveis na vida real. Para além disso, uma compreensão clara da escolha de materiais nem sempre é obtida, que mais complica a abordagem de desempenho.

### 3. NOÇÃO DE PROJECTO DE DURABILIDADE

O projecto de durabilidade ajuda a melhorar o controlo da durabilidade e garantir o cumprimento da vida útil da estrutura. Tem como objectivo garantir um nível de segurança aceitável contra a degradação. Tal como para o projecto estrutural, o procedimento para elaborar o projecto de durabilidade deve basear-se no desempenho da estrutura. O projecto de durabilidade permite ao projectista ajustar ou adaptar o projecto estrutural de forma a enfrentar a agressividade ambiental e relacioná-lo com a vida útil de projecto e com os custos totais da estrutura (Rostam 2001).

O dono da obra, ao definir requisitos presentes e futuros a que a construção, deve definir e cumprir um guia de projecto que inclua também a vida útil desejada e o nível necessário de manutenção e monitorização da estrutura, dentro dos limites orçamentais previstos. O projectista, ao preparar as especificações e condições de projecto (incluindo os esquemas de controlo de qualidade propostos), deve identificar as condições ambientais e quantificar a qualidade do betão e o recobrimento necessário para resistir a essas condições, bem como o tipo de monitorização da estrutura, se estipulado pelo dono da obra. É da responsabilidade do dono da obra exigir qualidade e uma vida útil longa, verificar o desempenho da estrutura entregue e, mais importante, estar disposto a pagar pela qualidade (Rostam 1994).

Existem, normalmente, duas estratégias para abordar um projecto de durabilidade. A primeira estratégia, evitar a degradação da estrutura devido à agressividade do meio envolvente, pode subdividir-se em três diferentes tipos de medidas (DuraCrete 2000): 1) mudar o micro ambiente recorrendo, por exemplo, a membranas ou revestimentos; 2) seleccionar materiais não reactivos, como por exemplo, agregados, cimentos resistentes a sulfatos ou cimentos com baixa teor de alcalis; 3) inibir as reacções recorrendo a, por

exemplo, protecção catódica, ou introduzindo ar. É de salientar que estas medidas não levam à protecção total das estruturas. A eficiência destas medidas depende de vários factores como, por exemplo no caso de revestimentos, da espessura e da permeabilidade. A segunda estratégia consiste em seleccionar e aplicar composições de materiais e detalhes estruturais para resistir, durante um período de uso específico, à degradação da estrutura. As estruturas podem tornar-se mais resistentes à agressividade do meio se adoptarmos procedimentos adequados que minimizem a superfície exposta, como por exemplo, um recobrimento apropriado ou uma composição de betão adequada podem impedir a corrosão das armaduras.

A modelação dos mecanismos de degradação é, em princípio, aplicável a ambas as estratégias. No entanto, existe pouca informação sobre a eficiência dos revestimentos e de diversas medidas protectoras. Como tal, a estratégia sugerida para a modelação dos mecanismos de deterioração num projecto de durabilidade é a segunda. Consequentemente, o princípio base é resistir aos mecanismos de deterioração relevantes, através de uma selecção de composição óptima de materiais e uma espessura de recobrimento adequada. Um procedimento recomendado para elaboração do projecto de durabilidade é apresentado na Figura 1 (Ferreira 2004).

A análise de durabilidade baseia-se na determinação da probabilidade de ocorrência de um dado acontecimento, por exemplo do acontecimento que marca o fim da vida útil da estrutura. Este acontecimento pode descrever-se como uma função estado limite  $G(x,t)$  em que  $x$  representa o vector das variáveis básicas e  $t$  o tempo. Esta função caracteriza-se por apresentar um valor negativo quando o acontecimento ocorre. Pode escrever-se esta função como:

$$G(x,t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

em que

$R(t)$  - representa a função das variáveis de resistência, dependente do tempo;

$S(t)$  - representa a função das variáveis de carga, dependente do tempo.

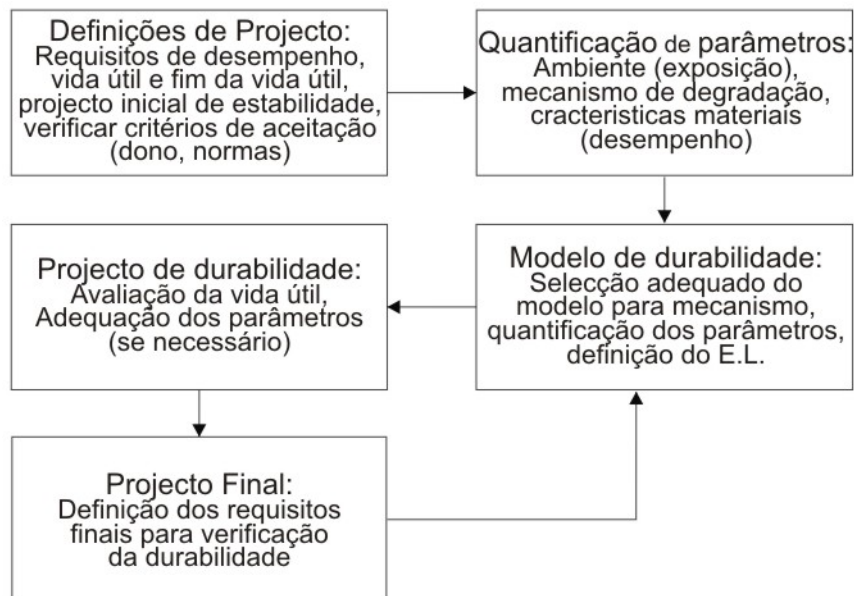


Figura 1 – Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil de componente de construção [11].

A vida útil média é alcançada quando os valores médios de  $R(t)$  e  $S(t)$  se cruzam, enquanto que a vida de útil de projecto, calculada com base em métodos probabilísticos, é dependente da segurança escolhida como objectivo. Para um estado limite de utilização, o

valor recomendado é aproximadamente igual a 7 % (EN 1990 2002).

O projecto de durabilidade deve ser baseado em: definições realistas e suficientemente precisas das acções ambientais, que dependem do tipo de degradação; parâmetros materiais para o betão e a armadura; e modelos realísticos para simulação do processo de degradação. O ponto de partida é a colecção de todas a informação necessária para a implementação do modelo. Esta informação pode ser dividida em três grupos: o ambiente, a estrutura e o material (betão).

A análise do ambiente é crucial pois é baseada nesta informação que a carga ambiental é dimensionada. É necessário definir bem a localização da estrutura, identificar a direcção dos ventos predominante e quantificar a agressividade (se necessário, recorrendo a estruturas vizinhas). A análise da estrutura fornece informação sobre a protecção física existente: deve-se juntar informação quanto à vida útil pretendida e o estado limite que o define, identificar os elementos estruturais de acordo com as classes de exposição, estudar as superfícies expostas e protegidas, identificar o recobrimento nominal de projecto e o tipo de aço utilizado. As propriedades do betão fornecem informação sobre a qualidade do betão a ser utilizado. A informação necessária é a classe de betão, a razão a/c, o tipo e quantidade de cimento, e se possível um indicador de durabilidade relevante.

Com a compilação da informação necessária, o projectista pode iniciar a análise da durabilidade, efectuando a modelação da degradação do betão recorrendo a um modelo, e, conseqüentemente, à avaliação do desempenho. Este procedimento é demonstrado no exemplo a seguir apresentado.

Com base nos resultados obtidos e tendo em conta o estado limite considerado, o desempenho é classificado como sendo aceitável ou não. No caso de ser inaceitável, é necessário intervir no projecto de forma a melhorar o desempenho. Pode-se intervir ao nível do material, do projecto estrutural e ao nível do ambiente, atenuando a sua agressividade.

O resultado da análise fornece algumas garantias que a vida útil será alcançada desde que haja o acompanhamento adequado que permite ainda avaliar a evolução do estado da estrutura ao longo do tempo. Inspecções e ensaios são, portanto, parte integral do projecto de durabilidade.

Esta abordagem não implica que seja dada menos atenção a factores relacionados com o projecto estrutural ou com processos construtivos como a cura, execução, detalhes apropriados, etc. De facto, esta abordagem apenas pode ser usada se for implementada segurança e qualidade suficientes para assegurar que as consequências dos factores ligados ao projecto e aos processos de construção sejam minimizadas. Da mesma forma que o projecto estrutural, o projecto de durabilidade deve ser desenvolvido com base em análises probabilísticas que considerem o meio envolvente e o desempenho estrutural.

#### 4. A DURABILIDADE DE ACORDO COM AS NORMAS

Para alcançar o período de vida útil de projecto especificado para a estrutura, devem ser tomadas medidas adequadas para proteger cada elemento estrutural das acções ambientais relevantes. Os requisitos de durabilidade devem ser considerados na concepção estrutural, na selecção dos materiais, nos pormenores construtivos, na execução, no controlo da qualidade, nas inspecções, nas verificações em disposições particulares (por exemplo, utilização de aço inoxidável, revestimentos, protecção catódica, etc.). Na ausência de Normas Europeias para ensaios do desempenho do betão, os requisitos para o método de especificação da resistência às acções ambientais são estabelecidos em termos de propriedades do betão e de limites para a sua composição. O Eurocódigo 2 (NP ENV 1992-1-1:1998) e a NP EN 206-1 (2005) especificam os requisitos (prescritivos) para a obtenção de um betão durável.

#### 4.1. Classes de exposição ambientais

A deterioração do betão pode resultar das condições ambientais a que o betão está exposto, de reacções químicas expansivas internas (reacções álcali-agregado e reacções sulfáticas) ou de outras acções, normalmente tratadas no cálculo estrutural (por exemplo: acções térmicas, fluência, retracções, desgaste). O Eurocódigo 2 define as condições de exposição como sendo as condições químicas e físicas a que a estrutura está exposta para além das acções mecânicas.

As acções ambientais estão classificadas na NP EN 206-1 em seis grupos, três relativos à deterioração do betão por corrosão das armaduras por acção do dióxido de carbono e dos cloretos provenientes da água do mar ou de outras origens (XC, XS e XD), dois relativos à deterioração do próprio betão pelo gelo/degelo (XF) ou por ataque químico (XA) e um grupo (X0) para quando não há risco de corrosão de metais ou de ataque do betão. Estes grupos (com excepção de X0) estão divididos em classes de exposição, que são apresentados através da descrição sumária do ambiente e de exemplos informativos.

A composição do betão afecta quer a protecção das armaduras quer a resistência do betão aos ataques. O Anexo E do NP EN 206-1 apresenta as classes de resistência indicativas para as diferentes classes de exposição. Tal pode conduzir à escolha de classes de resistência mais elevadas do que as que seriam necessárias no cálculo estrutural.

#### 4.2. Requisitos de durabilidade

O Anexo F da NP EN 206-1 apresenta as recomendações para a escolha dos valores limite para a composição e para as propriedades do betão em função das classes de exposição. Os valores foram estabelecidos com base num tempo de vida útil pretendido para a estrutura de 50 anos, considerando o uso de cimento do tipo CEM I e de agregados graúdos com uma máxima dimensão compreendida entre 20 mm e 32 mm. As classes de resistência mínimas foram deduzidas a partir da relação entre a razão água/cimento e a classe de resistência do betão fabricado com cimento da classe de resistência 32.5.

Os requisitos para cada classe de exposição devem ser especificados em termos de:

- tipos e classes de materiais constituintes permitidos;
- máxima razão água/cimento;
- mínima dosagem de cimento;
- mínima classe de resistência à compressão do betão (opcional);
- e quando relevante, o mínimo teor de ar do betão.

De acordo com a NP EN 206-1, se o betão estiver em conformidade com os valores limite, presume-se que o betão da estrutura satisfaz os requisitos de durabilidade para a utilização pretendida nas condições ambientais específicas. Este pressuposto é válido desde que:

- o betão seja devidamente colocado, compactado e curado, face ao uso previsto, (de acordo com a ENV 13670-1 (2005));
- o betão tenha o recobrimento das armaduras mínimo exigido para a condição ambiental relevante;
- a classe de exposição apropriada seja seleccionada;
- seja feita a manutenção prevista.

Os requisitos relacionados com as classes de exposição podem ser estabelecidos utilizando métodos de especificação do betão baseados no desempenho que considerem a durabilidade e ser especificados em termos de parâmetros relacionados com o desempenho.

No Anexo J da NP EN 206-1 é dada orientação para a utilização de um método alternativo de especificação do betão baseado no desempenho que considere a durabilidade.

Convém referir que no Documento Nacional de Aplicação da NP EN 206-1 é feita referência à especificação *LNEC E 464:2004 - Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais* (que substitui a LNEC E 378) em que são indicados outros valores limite para garantir um betão com 50 anos de vida útil e as condições da sua utilização.

#### 4.3. Recobrimento

O recobrimento das armaduras é a distância entre a superfície da armadura (incluindo ganchos, cintas, estribos e armadura de pele, quando relevante) que fica mais próxima da superfície de betão. O recobrimento nominal deve ser especificado no projecto. O valor nominal do recobrimento de projecto deve ser utilizado nos cálculos e deve ser indicado nas peças desenhadas. É definido como um recobrimento mínimo  $c_{min}$ , adicionado de uma margem de cálculo para as tolerâncias de execução,  $\Delta c_{dev}$ :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (2)$$

Para o cálculo do recobrimento nominal,  $c_{nom}$ , deve-se majorar, ao nível do projecto, o recobrimento mínimo para ter em conta as tolerâncias de execução ( $\Delta c_{dev}$ ). O recobrimento mínimo deverá ser aumentado do valor absoluto da tolerância de execução, considerado como susceptível de o reduzir. Para edifícios, indica-se a tolerância de execução aceitável na ENV 13670-1. Esta tolerância, normalmente, também é suficiente para outros tipos de estruturas. O valor recomendado de  $\Delta c_{dev}$  a utilizar em Portugal, é de 10 mm (NP ENV 13670-1, 2005). Em determinadas situações, a tolerância de execução admissível e, por conseguinte, a margem  $\Delta c_{dev}$ , pode ser diminuída.

O recobrimento mínimo das armaduras,  $c_{min}$ , deve assegurar a transmissão eficaz das forças de aderência, a protecção do aço contra a corrosão (durabilidade) e uma adequada resistência ao fogo. Deve utilizar-se o maior valor de  $c_{min}$  que satisfaça, simultaneamente, os requisitos de aderência e de condições ambientais.

## 5. EXEMPLO DE UM PROJECTO DE DURABILIDADE – A MODELAÇÃO

Para este exemplo, pressupõem-se que o principal mecanismo de degradação é a corrosão das armaduras induzidas pela presença de cloretos no betão. O mecanismo que define este processo de degradação é apresentado na Figura 2 (Tuutti 1982).

Durante a fase de iniciação, o betão não é danificado, contudo a frente de cloretos progride para o interior até alcançar a armadura. Quando atingir uma concentração crítica junto da armadura, inicia-se a corrosão desta. Este acontecimento marca o início da fase de propagação, em que, na presença de oxigénio e humidade suficiente, ocorre a corrosão da armadura. Posteriormente, surgem fissuras seguido do destacamento do betão de recobrimento.

O estado limite de utilização adoptado para este exemplo é o início de corrosão. Este fenómeno, de fácil detecção, marca o fim da fase de iniciação e o início da fase de propagação.

O modelo a seguir adoptado é baseado na segunda Lei de Fick para a difusão (Ferreira 2004). Foram efectuadas alterações à Lei de forma a ter em conta a variação do coeficiente de difusão com o tempo resultante da hidratação do cimento e aumento da densidade do betão (Takewaka 1988), e o efeito da temperatura (Pruckner 2001). Contudo, é de salientar que todo

o modelo tem as suas limitações, contudo é a responsabilidade do engenheiro compreender essas limitações e avaliar os resultados obtidos à luz delas.

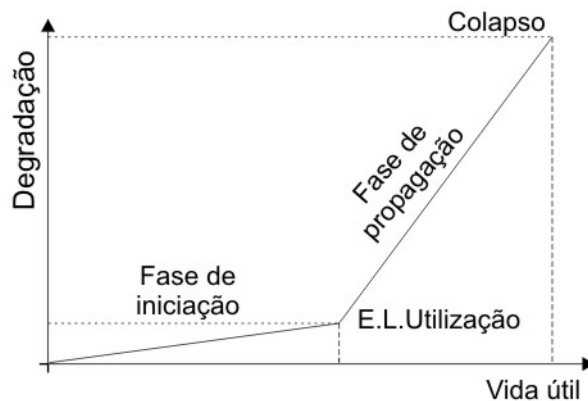


Figura 2 – Esquema do mecanismo de degradação para a corrosão (Tuutti 1982).

A expressão que é utilizada para avaliar o estado limite de início de corrosão é a seguinte:

$$S(t) = x_C(t) = 2 \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \left( \frac{C_{CR} - C_0}{C_S - C_0} \right) \right) \cdot \sqrt{D_0 \cdot \frac{T}{294K} \cdot \exp \left[ -\frac{E_A}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{294K} \right) \right] \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^\alpha \cdot t} \quad (3)$$

em que:

- $x_C$  – espessura de recobrimento (m);
- $D_0$  – coeficiente de difusão no tempo  $t_0$  (m<sup>2</sup>/s);
- $C_{CR}$  – concentração crítica de cloretos (% cloretos/ peso cimento);
- $C_S$  – concentração superficial de cloretos (% cloretos/ peso cimento);
- $C_0$  – concentração inicial de cloretos (% cloretos/ peso cimento);
- $\alpha$  – factor que tem em conta a influencia da idade no  $D_0$ ;
- $E_A$  – energia de activação para a difusão de cloretos (J/mol);
- $T$  – temperatura (Kelvin);
- $R$  – constante de gás;
- $t$  – período de exposição (s);
- $t_0$  – período de referencia (s);
- $\text{erf}^{-1}$  – inverso da função erro.

Tendo definido qual o principal mecanismo de degradação e a forma como será modelado, o desempenho do betão da estrutura pode ser analisado. A aplicação do modelo passa pela definição dos parâmetros para a nossa situação específica. Para tal, é necessário caracterizar o ambiente, a qualidade do betão e as características geométricas da estrutura.

A partir do projecto de estabilidade, é possível obter a classe de resistência do betão e o recobrimento adoptado. Neste exemplo, assume-se que a vida útil da estrutura é de 50 anos, o tipo de cimento previsto é o CEM I 42,5, a classe de resistência C30/37. Para simplificar o exemplo, admitiu-se que a temperatura média anual é de 21°C e que a concentração inicial de cloretos no betão é nula. Com base na experiência ou em ensaios laboratoriais prévios, é necessário quantificar o desempenho do betão com as características acima descritas. Dado que o mecanismo de degradação é a corrosão induzida por cloretos, para simplificação assume-se que a penetração de cloretos ocorre apenas devido à difusão. Assim sendo, na Tabela 1 são apresentados os valores para os parâmetros relevantes para aplicação do modelo

e avaliação do desempenho do betão.

A aplicação do modelo é realizada de forma probabilística. Os parâmetros devem ser caracterizados estocasticamente de forma a incorporarem a sua variabilidade inerente. Desta forma, o resultado da análise será uma probabilidade de rotura de cerca de 7 %, definida pelo estado limite de iniciação de corrosão, em vez do habitual valor médio.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para a análise do desempenho da durabilidade

Variáveis	Média	Desvio Padrão
$D_0$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	10.0	2.0
$C_{CR}$ (%/peso betão)	0.45	0.05
$x_C$ (mm)	45	10
$C_S$ (%/peso betão)	2.6	0.3
$t/t_0$ (anos/dias)	50/28	-
$\alpha$	0.4	0.05

Na Figura 3 é apresentado o resultado da avaliação do desempenho da durabilidade do betão. Verifica-se que, caso a análise tenha sido efectuada apenas com valores médios, o resultado obtido terá indicado que demoraria 15 anos a iniciar a corrosão. Com a análise probabilística, e assumindo o valor aproximado de 7 % como limite para verificação do estado limite de utilização (EN 1990 2002), o desempenho do betão é insuficiente sendo que o limite é excedido após 3 anos.

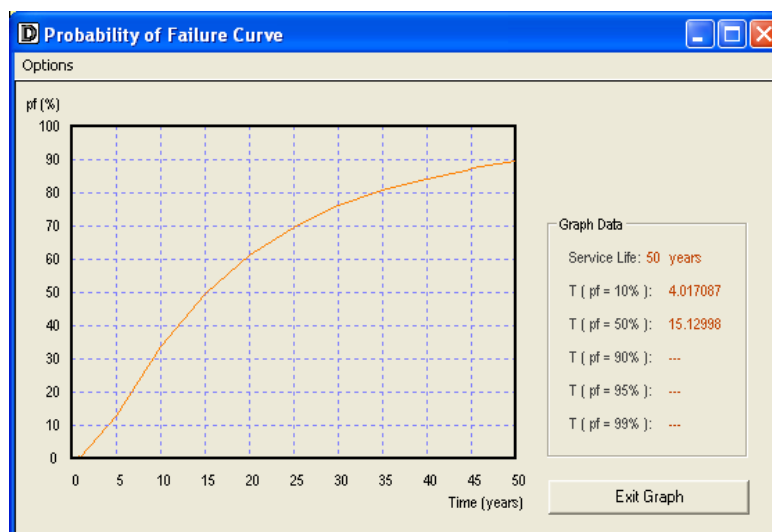


Figura 3 – Resultado gráfico da primeira análise do desempenho de durabilidade do betão, realizado com Duracon (2004).

Os resultados desta primeira análise auxiliam o projectista a adequar a qualidade do betão e as características do projecto de estabilidade de forma a melhorar o desempenho de durabilidade do betão. Desta forma, neste exemplo aumentou-se o recobrimento para 55 mm e melhorou-se a qualidade do betão, aumentando a dosagem de cimento e diminuindo a razão a/c, o que se traduz na alteração do coeficiente de difusão para  $6.0 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. Com estas alterações, o betão passa a ter o desempenho apresentado na Figura 4.



Para o mesmo estado limite, o betão passa a desempenhar adequadamente durante quase 25 anos, metade da vida útil pretendida. Se bem que representa uma melhoria significativa em relação à primeira análise, ainda não é suficiente. O projectista tem que ter em conta que melhorar a qualidade do betão ou intervir na estrutura tem consequências económicas. Neste exemplo, aumentar ainda mais o recobrimento ou melhorar a qualidade do betão poderá ser dispendioso. Existem alternativas como mudar o tipo de cimento por outro mais indicado para este tipo de ambiente (Ferreira 2004b) ou aplicar uma superfície protectora de forma a atrasar o ingresso de cloretos no betão (Ferreira 2004c).

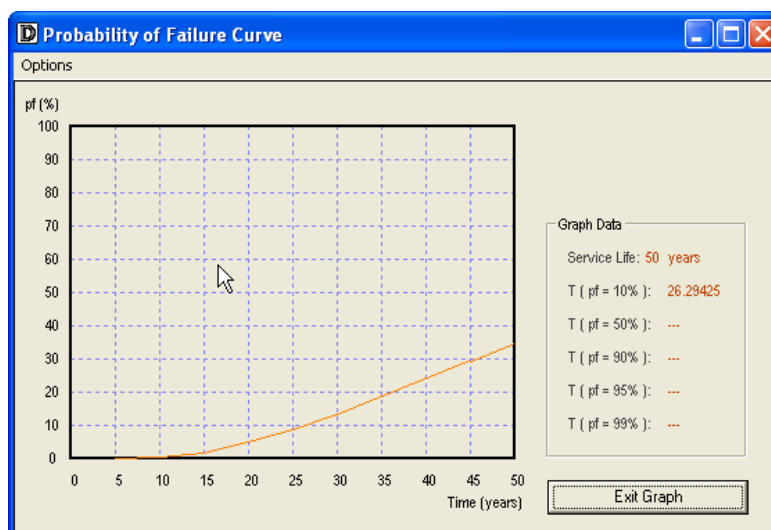


Figura 4 – Resultado gráfico da segunda análise do desempenho de durabilidade do betão, realizado com Duracon (2004).

É da responsabilidade do projectista estudar diferentes alternativas e analisar o desempenho de durabilidade. Apenas com uma abordagem de desempenho é possível recorrer a este tipo de análise. Por fim, é necessário definir um plano de controlo de qualidade de forma a verificar que o desempenho obtido em obra corresponde, efectivamente, ao desejado.

## 6. CONCLUSÕES

Começa-se a entender que a durabilidade é parte essencial na qualidade e desempenho das estruturas e que a qualidade e custo total inclui não só o custo de construção mas também o de manutenção e reparação. O controlo da durabilidade de estruturas de betão armado será um dos principais desafios para o engenheiro do futuro. O passado ensinou-nos que o procedimento tradicional de projecto, construção e uso de estruturas de betão armado não tem resultado no desempenho de longa duração esperado.

O projecto de durabilidade ajuda a melhorar o controlo da durabilidade e garantir o cumprimento da vida útil da estrutura. Tem como objectivo garantir um nível de segurança aceitável contra a degradação. Tal como o projecto estrutural, o procedimento para elaborar o projecto de durabilidade deve basear-se no desempenho da estrutura. O projecto de durabilidade permite ao projectista ajustar ou adaptar o projecto estrutural de forma a enfrentar a agressividade ambiental e relacioná-lo com a vida útil de projecto e com os custos totais da estrutura. O princípio base do projecto da durabilidade é resistir aos mecanismos de deterioração relevantes, através de uma selecção de composição óptima de materiais e uma espessura de recobrimento adequada.

O projecto de durabilidade deve ser baseado em: definições realistas e suficientemente

precisas das acções ambientais, dependendo do tipo de degradação; parâmetros materiais para o betão e a armadura; e modelos realísticos para simulação do processo de degradação. Esta abordagem apenas pode ser usada se for implementada segurança e qualidade suficientes para assegurar que as consequências dos factores ligados ao projecto e aos processos de construção sejam minimizadas.

A importância da necessidade de informação relevante sobre o desempenho de durabilidade da estrutura antes do processo de tomada de decisões é incalculável. Esta abordagem demonstra como essa informação pode ser gerada. A influência de diversos parâmetros pode ser rapidamente avaliadas e o processo de tomada de decisões significativamente melhorado, optimizando o desempenho de durabilidade da estrutura.

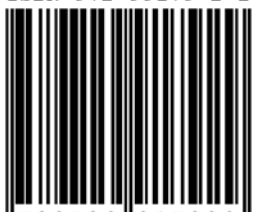
Para estruturas novas, este procedimento serve de base à definição de critérios gerais de durabilidade. Para estruturas existentes, este procedimento serve para avaliar a restante vida útil.

## 7. REFERÊNCIAS

- Bickley, J., Hooton, R.D., Hover, K.C.; Preparation of a Performance-based Specification for Cast-in-Place Concrete. RMC Research Council, 2006, pp. 155
- Bukowski, R.W.; Risk and Performance standards. NIST Building and Fire Research Laboratory, USA, 1996
- DuraCrete. General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union - Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Document R 15, 109 p. (2000)
- Duracon, Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures - Software Manual. University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal, (2004)  
<http://www.civil.uminho.pt/duracon>
- EN 1990, Eurocode: Basis of structural design-Stage 34. CEN, Brussels, 2002.
- Ferreira, M.; Probability based durability design of concrete structures in marine environment. Tese PhD, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2004 (a).
- Ferreira, M.; Nilsson, L; GjØrv, O.E.; et al; Blast furnace Slag Cements for Concrete Durability in Marine Environment. 4th Int.Con. on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, 2004 (b).
- Ferreira, R. M.; Liu, G.; Nilsson, L.; GjØrv, O .E.; Blast-Furnace Slag Cements for Concrete Durability in Marine Environment. CONSEC 04, 4th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, pp 109-116, 2004 (c)
- Fluge, F.; Marine chlorides - A probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1. Dura-Net - Third Workshop Service Life Design of Concrete Structures. TromsØ 2001, pp48-68.
- Gehlen, C.; Schiessl, P., (1999) Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel. Structural Concrete, No. 2, pp. 1-7.
- GjØrv, O.E.: Controlled service life of concrete structures and environmental consciousness, Proceedings, International Workshop on Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, ed. by O.E. GjØrv and K. Sakai, E & FN Spon, London and New York, pp. 1-13, 2000
- Helland, S.; Basis of design. Structural and service life design, a common approach. DuraNet - Third Workshop "Service Life Design of Concrete Structures – From Theory to Standardisation.", TromsØ, pp16-23, 2001.
- Leira, B. J., Hynne, T., Lindgård, J., "Marine Concrete Structures Subjected to Chloride Attack: Probabilistic Lifetime Assessment", Proceedings, The ETCE/OMAE2000 Joint Conference: Energy for the New Millennium. American Society of Mechanical Engineers (ASME), New Orleans, USA, 2000.
- LNEC E-464, Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa, 2005.

- NP EN 206-1:2005 Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. CEN, Brussels, 2005.
- NP ENV 13670-1, Execução de estruturas em betão. Parte 1: Regras gerais. CEN, Brussels, 2005.
- NP ENV 1992-1-1, Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios. CEN, Brussels, 1998.
- Pruckner, F., (2001) Corrosion and protection of reinforcement in concrete measurements and interpretation, University of Vienna, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Doctoral Thesis, p.232.
- Rostam, S.; Schiessl, P.; Service Life Design in Practice - Today and Tomorrow. Proceedings of the International Conference "Concrete Across Borders", Odense Denmark 1994.
- Rostam, S.; Service Life Design of Concrete Structures - The potentials of the DuraCrete Methodology. DuraNet - Third Workshop Service Life Design of Concrete Structures. Tromsø 2001, 48-68.
- Takewaka, K.; Mastumoto, S.; (1988) Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, ACI SP 109-17, ACI, pp. 381-400.
- Tuutti, K.; Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. Report No. CBI Research FO 4:82. 1982, Tuutti, K.: Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. Performance of Concrete in Marine Environment, pp. 223-236.

ISBN 972-99179-2-2



9 789729 917929