



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO

PROJECTO FCT
PTDC / ECM / 118372 / 2010



Tarefa 2

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELLentSUStainableCONCcrete)

PLANEAMENTO DOS ENSAIOS DOS BETÕES

RELATÓRIO

Abril de 2013

Financiamento FCT/POCTI



União Europeia

FEDER



Governo da República Portuguesa

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice de figuras

Figura 1. Equipamento para o ensaio de abaixamento.....	6
Figura 2. Medição do abaixamento de betão.....	6
Figura 3 - Formas de abaixamento	6
Figura 4. Remoção do excesso de betão.	7
Figura 5. Vibração do betão por agulha vibratória.	7
Figura 6. Pesagem do conjunto.....	7
Figura 7. Ensaio do teor de ar.....	9
Figura 8. Ensaio do Funil V	9
Figura 9. Ensaio da Caixa L	11
Figura 10. Ensaio da segregação no peneiro	12
Figura 11. Secção A-A através do anel J	13
Figura 12. Anel J com espaçamento estreito (à esq.) e com espaçamento largo (à dta.)	13
Figura 13. Equipamentos utilizados.....	14
Figura 14. Pesagem do provete.....	14
Figura 15. Roturas satisfatórias de provetes cúbicos e cilíndricos	15
Figura 16. Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos e cilíndricos.....	15
Figura 17. Medição da velocidade de propagação de ultra-sons.	17
Figura 18. Posicionamento do provete.....	18
Figura 19. Determinação do módulo de elasticidade: estação de ensaio, prensa hidráulica, provete cilíndrico.....	20
Figura 20. Ensaio de desgaste.....	22
Figura 21. Medição da altura do provete.....	22
Figura 22. Provetes imersos a 1/3 da sua altura.	23
Figura 23. Balança hidrostática.	23
Figura 24. Superfícies pintadas com tinta epóxida.	25
Figura 25. Provetes pulverizados com solução de fenoftaleína.	25
Figura 26. Exsicador e bomba de vácuo.	27
Figura 27. Penetração dos cloretos.	27
Figura 28. Aplicação do betume polimérico.	28
Figura 29. Aparelho de leitura da retracção.	28

Índice de tabelas

Tabela 1. Ensaio ao betão no estado fresco.	5
Tabela 2. Ensaio mecânico ao betão.	14
Tabela 3. Ensaio de durabilidade ao betão.	22

1. Introdução

O presente documento dá cumprimento ao estabelecido com a FCT, no âmbito de projectos de investigação científica e de desenvolvimento tecnológico, que requer a apresentação de relatórios periódicos.

Este relatório apresenta os ensaios a realizar aos betões no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete), descrevendo os procedimentos experimentais.

Desta forma, com esta campanha experimental, pretende-se determinar o comportamento no estado fresco e endurecido de diferentes betões produzidos com agregados reciclados (AR). Estes serão avaliados através da sua comparação com betões de referência (BR) produzidos na sua totalidade com agregados naturais (AN).

2. Técnicas e normas experimentais

A determinação das características dos betões no estado fresco será feita através de ensaios, como o cone de Abrams, massa volúmica e teor de ar. Na análise do betão endurecido, a nível de propriedades mecânicas, serão realizados ensaios à resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade, resistência à abrasão e ultra-sons. Relativamente à análise das características de durabilidade dos betões serão realizados ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, resistência à carbonatação e resistência à penetração por cloretos.

2.1. Ensaio ao betão no estado fresco

A caracterização do betão no estado fresco, ou seja, a determinação da sua consistência, densidade e compacidade, constitui uma fundamental ferramenta de controlo da produção dos betões. Com o intuito de avaliar os referidos parâmetros, o presente estudo inclui os ensaios apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaio ao betão no estado fresco.

Estado fresco	Ensaio de abaixamento	NP EN 12350-2:2009
	Massa volúmica	NP EN 12350-6:2009
	Teor de ar	NP EN 12350-7:2009
	Escoamento no funil V (betão auto-compactável)	NP EN 12350-9:2010
	Escoamento na caixa L (betão auto-compactável)	NP EN 12350-10:2010
	Segregação no peneiro (betão auto-compactável)	NP EN 12350-11:2010
	Espalhamento no anel J (betão auto-compactável)	NP EN 12350-12:2010

2.1.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

A quantificação da trabalhabilidade é essencial para identificar betões com aplicações idênticas. Neste sentido, para assegurar que as amassaduras respeitem os limites previamente impostos de abaixamento (125 ± 10 mm), irá optar-se por alterar a relação A/C, uma vez que é presumível que níveis crescentes de incorporação de agregados reciclados de betão afectem negativamente esta propriedade. Irá ser seguida a metodologia de ensaio especificada pela norma NP EN 12350-2 (2009) “*Ensaio o betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento*”. Para realizar o procedimento normativo, é necessário: molde de metal de forma troncocónica (Figura 1); varão de compactação; funil que permita ser acoplado ao topo do molde tronco-cónico (Figura 2); régua com uma precisão maior ou igual a 5 mm (Figura 1 e 2); placa / superfície não absorvente, lisa, rígida e plana (Figura 1); colher de pedreiro; pano molhado e cronómetro. Em relação à amostra de ensaio, esta é constituída por um número de tomas repartidas pelo volume total de betão fresco e deverá estar protegida de qualquer contaminação, ganho ou perda de água e variações bruscas de temperatura durante todo o processo de amostragem, transporte e manuseamento. Na realização do ensaio, o molde é colocado sobre a placa, devendo-se humedecer os dois materiais. Em seguida, o molde é enchido com a amostra recolhida. O enchimento deverá ser faseado por três camadas cuja altura, após compactação, deverá ser idêntica (1/3 da altura do molde); a compactação é materializada por 25 pancadas, executadas com o varão de compactação, distribuídas sobre toda a secção transversal da camada mas apenas na sua espessura; no preenchimento da última camada, deverá compensar-se a redução de altura após compactação com uma quantidade suplementar de betão; durante todo o processo de enchimento, deve-se manter o molde fixo contra a placa / superfície com os pés sobre as abas (ou com os elementos de fixação). Após a compactação da camada de topo, a superfície é rasada através de movimentos de rolamento com o varão de compactação, devendo-se remover o excesso de betão. Posteriormente, o molde é retirado cuidadosamente,

devendo toda a operação de desmoldagem ser executada em 5-10 s através de um deslocamento único e firme, sem transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional. Finalmente, após a remoção do molde o valor do abaixamento é registado. O abaixamento (h) é quantificado pela diferença entre a altura do molde, 300 mm, e o ponto mais alto do provete após desmoldagem. O ensaio só é válido se o betão permanecer substancialmente intacto e simétrico, conforme ilustrado na Figura 3 a). Caso o provete se deforme identicamente à Figura 3 b), é necessário retirar outra amostra e repetir o ensaio.



Figura 1. Equipamento para o ensaio de abaixamento.



Figura 2. Medição do abaixamento de betão.

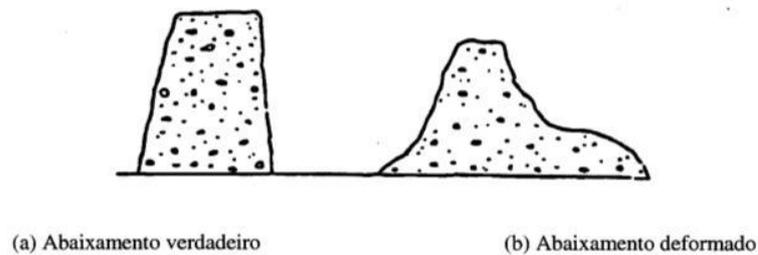


Figura 3 - Formas de abaixamento

2.1.2. Massa volúmica

A quantificação da massa volúmica do betão no estado fresco permitirá realizar um controlo de produção *in loco* sobre os betões com agregados reciclados de betão. O ensaio será realizado de acordo com o especificado pela norma NP EN 12350-6 (2009) “*Ensaio do betão fresco - Parte 6: Massa volúmica*”. Segundo o procedimento constante da norma, é necessário o seguinte material: recipiente estanque, rígido e resistente à pasta de cimento, com a face interna lisa e com bordo superior com acabamento plano

(Figura 4); dispositivo de compactação do betão (Figura 5); balança de precisão superior ou igual a $\pm 0,1\%$ da massa a determinar (Figura 6); rasoira de aço; colher de pedreiro e pano húmido. A amostra é constituída por um número de tomas repartidas pelo volume total de betão fresco e deverá estar protegida de qualquer contaminação, ganho ou perda de água e variações bruscas de temperatura durante todo o processo de amostragem, transporte e manuseamento. Na execução do procedimento de ensaio, o recipiente vazio é pesado e a sua massa é registada. Após a anotação do valor, o recipiente é cheio com a amostra recolhida. O enchimento deverá ser faseado por duas camadas e respectiva compactação; o período de compactação deverá ser o adequado e limitado a quaisquer indícios de segregação ou exsudação; caso a compactação seja efectuada com agulha vibratória, é necessário assegurar o seu posicionamento vertical e evitar o seu contacto com o recipiente. Após o enchimento do recipiente, a superfície é nivelada com o auxílio de colher de pedreiro e de rasoira, sendo removido o excesso de betão. O recipiente com o betão fresco é pesado e a sua massa registada.



Figura 4. Remoção do excesso de betão.



Figura 5. Vibração do betão por agulha vibratória.



Figura 6. Pesagem do conjunto.

A massa volúmica é determinada através da seguinte expressão (1):

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V_R} \quad (1)$$

Onde:

D - massa volúmica do betão fresco (kg/m^3);

M_1 - massa do recipiente (kg);

M_2 - massa do recipiente com o provete de betão fresco (kg);

V_R - volume do recipiente (m^3).

2.1.3. Teor de ar

O teor de ar incorporado é uma propriedade fundamental para garantir a qualidade de um betão, quer seja para verificar limites máximos e mínimos desejáveis de ar incorporado, quer para identificar teores de vazios no betão. O ensaio será realizado de acordo com o especificado pela norma NP EN 12350-7 (2009). Para realizar o procedimento normativo, é necessário: aparelho medidor de ar incorporado (Figura 7); proveta; água e colher de pedreiro. Na sua execução, o aparelho medidor de ar é preenchido com betão no estado fresco, inicialmente, até a 1/3 da altura do aparelho, seguido de compactação. O método de compactação consiste em aplicar 25 pancadas distribuídas uniformemente pelo betão fresco, seguidas de 20 pancadas com um martelo de borracha na lateral do aparelho. Repete-se o procedimento para 2/3 e para a totalidade da altura do aparelho. Alisa-se a superfície e limpa-se os bordos do recipiente. A campânula é posicionada e fecha-se as cavilhas. As válvulas laterais deverão estar abertas (posição para cima) e verifica-se se a campânula está despressurizada (accionando a válvula correspondente). Injecta-se água pela válvula da esquerda, de forma a expulsar o ar do betão, e, quando a água sair pela outra válvula em fluxo contínuo e limpo, fecha-se as duas válvulas ao mesmo tempo. Liberta-se a bomba de pressão e acciona-se a mesma até que o ponteiro ultrapasse a marca vermelha em aproximadamente 10 mm. Acciona-se cuidadosamente a válvula de descompressão (válvula circular à direita) até que o ponteiro estabilize sobre a marca vermelha. Por fim, acciona-se a válvula de descompressão da esquerda mantendo-a premida até que o ponteiro estabilize e o valor indicado corresponde à percentagem de ar na mistura.



Figura 7. Ensaio do teor de ar.

2.1.4. Escoamento no funil V (betões auto-compactáveis)

O ensaio de escoamento no funil V permite a determinação do tempo de escoamento para avaliar, de forma indirecta, a viscosidade, através da capacidade de escoamento por uma zona confinada. O ensaio será realizado de acordo com o especificado pela norma NP EN 12350-9 (2010) “*Ensaaios do betão fresco - Parte 9: Betão auto-compactável- Ensaio de escoamento no funil V*”. Segundo o procedimento constante da norma, é necessário o seguinte material (Figura 8): placa de base, régua ou fita de medição, cronómetro, nível, recipiente com volume de 10 l, colar (opcional) com massa aproximada de 9 kg que permite que o ensaio seja realizado por uma pessoa.



Figura 8. Ensaio do funil V.

Na execução do procedimento de ensaio, deve-se garantir o equipamento que está correctamente nivelado e fixado, impedindo qualquer tipo de movimento; as superfícies interiores do funil devem ser humedecidas e qualquer concentração de água existente deve ser removida. Como amostra devem ser recolhidos, no mínimo, 12 l de betão auto-compactável. De seguida, enche-se o funil sem aplicar qualquer tipo de agitação ou compactação e rasa-se a sua superfície superior; sem deixar passar mais de 10 ± 2 segundos, abre-se a comporta inferior do funil e, em simultâneo, inicia-se a contagem do tempo de escoamento (t_v) com recurso a um cronómetro. O tempo de escoamento corresponde ao intervalo entre a abertura da comporta e o instante em que, observando o funil de cima para baixo, surja o primeiro raio de luz no fundo do funil, com a aproximação de 0,5 segundos. O escoamento deve ser

contínuo e sem bloqueios, mas, caso ocorra, deve-se proceder à repetição do ensaio com outra amostra. Se o bloqueio persistir, o betão auto-compactável deve ser considerado como não tendo a viscosidade e a capacidade de passagem adequadas.

2.1.5. Escoamento na caixa L (betões auto-compactáveis)

O ensaio de escoamento na caixa L foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-10 (2010) “*Ensaaios do betão fresco. Parte 10: Betão auto-compactável. Ensaio de escoamento na caixa L*” e permite avaliar a fluidez do betão auto-compactável através da sua capacidade de passagem. Permite ainda uma avaliação visual da capacidade de auto-nivelamento do betão auto-compactável. Durante o ensaio, deve-se garantir que o equipamento (Figura 9) está correctamente nivelado e fixado, impedindo a ocorrência de movimentos; as superfícies interiores da caixa devem ser humedecidas e qualquer concentração de água existente deve ser removida. A amostra a recolher deverá conter, no mínimo, 14 l de betão auto-compactável para posteriormente encher a caixa L, sem aplicar qualquer tipo de agitação ou compactação e rasar a superfície superior. Deve-se esperar 60 ± 10 segundos antes de abrir a comporta de separação das secções vertical e horizontal num movimento contínuo. Quando o movimento do betão cessar, mede-se a altura de betão ΔH_1 em três pontos, correspondente à secção vertical da caixa, e a altura de betão ΔH_2 igualmente em três pontos, correspondente à secção horizontal da caixa.



Figura 9. Ensaio da caixa L.

O índice de capacidade de passagem na caixa L (PL) é calculado, com a aproximação de 0,01, a partir da razão entre as profundidades médias do betão auto-compactável pela expressão $PL = H_1/H_2$. A profundidade média do betão H_1 é a diferença entre a altura da secção vertical e a média das três leituras de ΔH_1 . Quanto à profundidade média do betão H_2 , é a diferença entre a altura da secção vertical e a média das três leituras de ΔH_2 .

2.1.6. Segregação no peneiro (betões auto-compactáveis)

O ensaio de segregação no peneiro permite a obtenção do valor da parcela segregada, em percentagem, com o objectivo de avaliar a capacidade do betão auto-compactável de manter a sua composição homogénea, no estado fresco. A norma vigente correspondente a este ensaio é a NP EN 12350-11 (2010) “*Ensaio do betão fresco. Parte 11: Betão auto-compactável. Ensaio de segregação no peneiro*”.

A execução dos procedimentos de ensaios inclui: recolher uma amostra de betão com aproximadamente 10 l num recipiente nivelado, tapado, sem perturbações, e registar qualquer ocorrência de exsudação; assegurar que a balança está nivelada e registar a massa do peneiro (m_p) em gramas, colocando seguidamente o peneiro com o fundo na balança e a mesma a zero; após 15 minutos, verter contínua e cuidadosamente o betão ($4,8 \pm 0.2$ kg), de acordo com a Figura 10, incluindo alguma água exsudada, de uma altura de 50 cm para o centro do peneiro e registar a massa do betão (m_c) em gramas; deixar o betão no peneiro e aguardar 2 minutos; ao fim desse tempo, retirar o peneiro e registar a massa do conjunto ainda na balança (fundo e material passado) (m_s) em gramas.

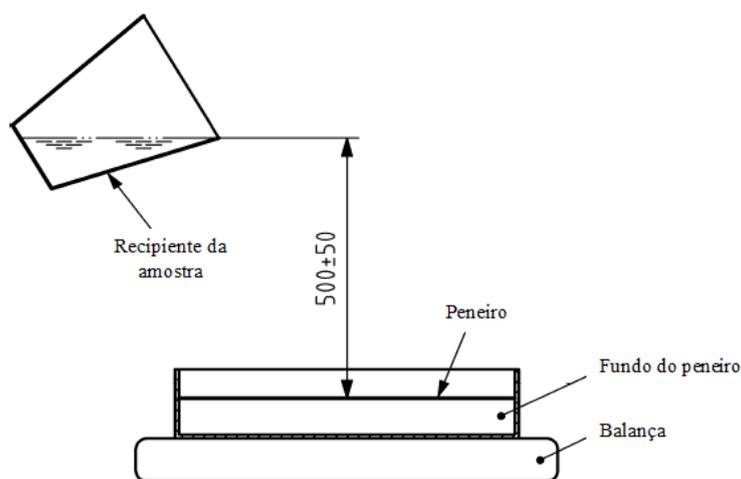


Figura 10. Ensaio da segregação no peneiro.

A parcela segregada (SR) corresponde à proporção da amostra que passou através do peneiro, relativamente à quantidade vertida, e é calculada pela expressão $SR=100 (m_p + m_s)/m_c$.

2.1.7. Espalhamento no anel J (betões auto-compactáveis)

O ensaio de espalhamento no anel J é realizado de acordo com a norma NP EN 12350-12 (2010) “*Ensaio do betão fresco. Parte 12: Betão auto-compactável. Ensaio de espalhamento no anel J*” e permite a obtenção do valor da capacidade de passagem PJ, com o objectivo de avaliar a capacidade de passagem e de deformabilidade do betão auto-compactável. Este ensaio permite também avaliar a compatibilidade entre a máxima dimensão do agregado e o espaçamento entre varões.

Este ensaio consiste na execução do ensaio de espalhamento e medições dos respectivos diâmetros com o cone de Abrams no meio do anel J (Figuras 11 e 12); deve-se então colocar uma régua rígida e medir as diferenças relativas de altura entre o bordo inferior da régua e a superfície do betão na posição central (Δh_0) e em quatro posições fora do anel J, Δh_{x1} e Δh_{x2} , na direcção x, e Δh_{y1} e Δh_{y2} , na direcção perpendicular a x, com uma aproximação de 1 mm.

A capacidade de passagem do anel J (PJ) pode ser determinada através da expressão (2):

$$PJ = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} + \Delta h_0 \quad (2)$$

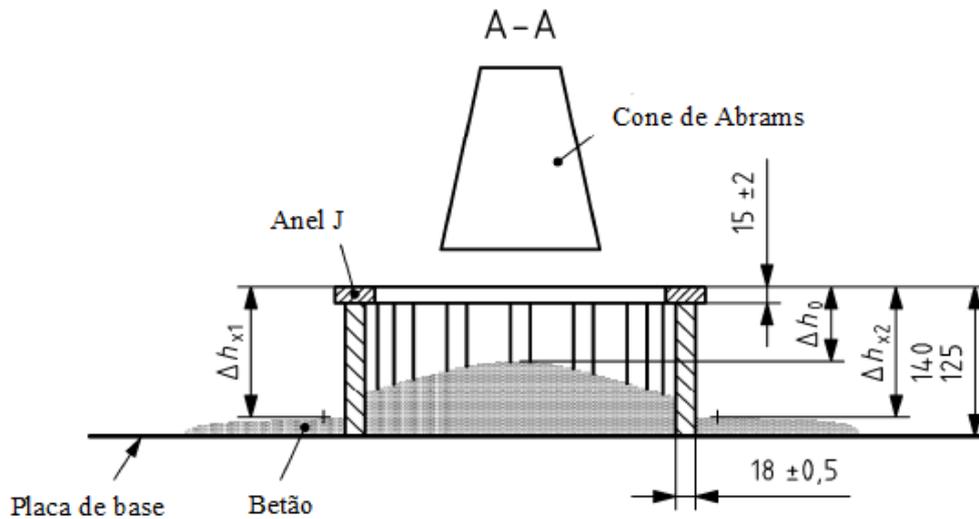


Figura 11. Secção A-A através do anel J.

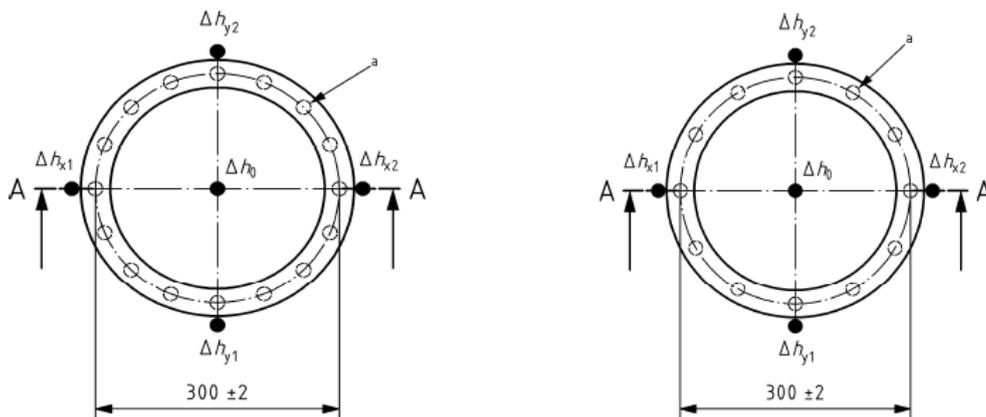


Figura 12. Anel J com espaçamento estreito (à esquerda) e com espaçamento largo (à direita).

2.2. Ensaio mecânicos ao betão no estado endurecido

Neste subcapítulo, serão apresentados os ensaios a realizar ao betão endurecido (Tabela 2), de modo a se compreender quanto a incorporação de agregados reciclados de betão vai influenciar o comportamento mecânico dos diferentes betões produzidos relativamente a um betão de referência.

Tabela 2. Ensaio mecânicos ao betão.

Estado endurecido	Resistência à compressão	NP EN 12390-3:2011
	Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6:2011
	Módulo de elasticidade	LNEC E 397:1993
	Resistência à abrasão	DIN 52108: 2010

2.2.1. Resistência à compressão

Com a realização deste ensaio, pretende-se determinar a capacidade resistente dos diferentes betões quando comprimidos com tensão uniforme. Será seguida a metodologia de ensaio especificada pela norma NP EN 12390-3 (2011) “*Ensaio ao betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*”. Para realização do procedimento normativo, é necessário o seguinte equipamento: prensa hidráulica (Figura 13); deflectómetro / transdutor; *data logger*, acoplado à prensa hidráulica e deflectómetro; pano para limpeza dos provetes; rede de protecção, para os provetes com roturas frágeis; balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar (Figura 14).



Figura 13. Equipamentos utilizados.



Figura 14. Pesagem do provete.

O ensaio é realizado em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e o respectivo período de cura é variável (7, 28 e 56 dias). Todos os provetes são mantidos durante 24 horas na zona de betonagem de modo a adquirirem resistência suficiente para serem desmoldados e transportados até à zona de cura. Para execução do procedimento, o provete é retirado do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida. O excesso de humidade e/ou sujidade do provete devem ser retiradas e o valor da massa do provete registada (este dado não tem contribuição directa para os resultados do ensaio mas é um bom indicador da presença de vazios que justificam, eventualmente, resultados anómalos). Com as superfícies da máquina de ensaio limpas, o provete deve ser colocado numa posição centrada, relativamente ao prato inferior da máquina, para evitar qualquer tipo de excentricidade; o plano correspondente à face de acabamento do provete não deverá ser uma superfície de ensaio, isto é, não deverá coincidir com nenhum dos pratos da máquina. Relativamente

aos cilindros, é utilizado um disco que permite eliminar as rugosidades da superfície de acabamento e assim obter uma distribuição uniforme de carga. A carga deve ser aplicada a uma velocidade constante de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s de forma contínua e sem choques até a rotura ser atingida. O valor da carga máxima é registado. Após o ensaio, deve-se inspecionar a rotura de cada provete e classificá-la como satisfatória (Figura 15) ou não satisfatória (Figura 16), conforme estipulado na norma NP EN 12390-3.

A resistência à compressão de cada provete é dada pela seguinte expressão (3):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Onde:

f_c - resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm²);

F - carga máxima (N);

A_c - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²).

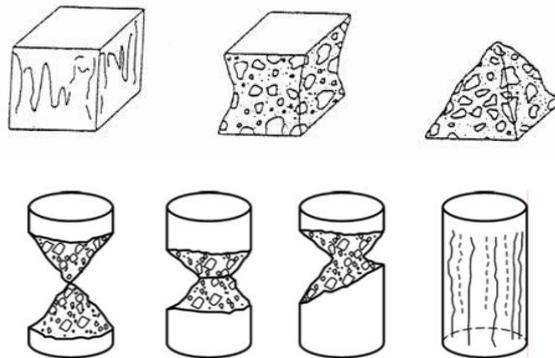


Figura 15. Roturas satisfatórias de provetes cúbicos e cilíndricos

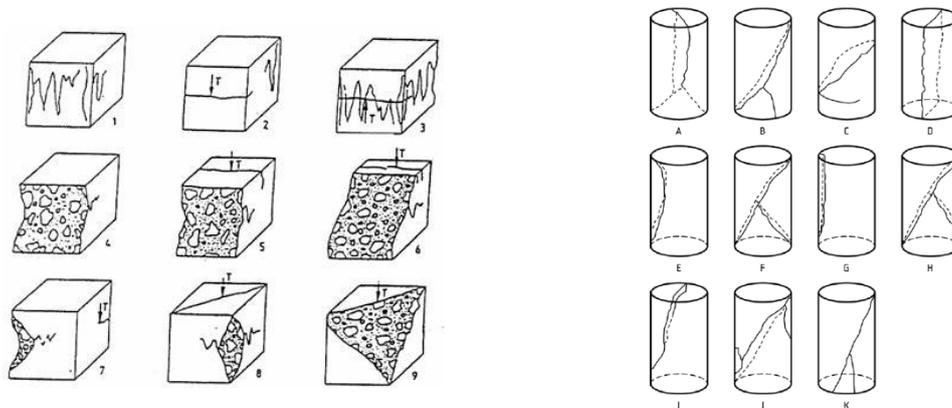


Figura 16. Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos e cilíndricos

Para cada idade, a resistência à compressão dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes respectivos.

2.2.2. Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons

A determinação da velocidade de ultra-sons, através de um método não-destrutivo, permite obter, indirectamente, informação sobre características mecânicas, homogeneidade e vazios. A comparação das velocidades de propagação entre os diferentes espécimes deverá reflectir a aplicação de superplastificantes e ainda a presença de agregados reciclados nos betões.

O ensaio será realizado de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007) “*Ensaio do betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons*”. O procedimento constante da norma requer: aparelho de medida da velocidade de propagação dos ultra-sons, equipado com transdutor (Figura 17); emissor e transdutor receptor; cilindro de calibração; material de contacto que permita homogeneização da superfície do provete. Os provetes são preparados de forma idêntica ao ensaio de resistência à compressão. Para a realização do provete de ensaio, o equipamento de medição dos ultra-sons é ligado e calibrado através do cilindro de calibração (elemento cuja velocidade de propagação é, por definição, de 25 μ s). As faces de medição devem ser definidas (todas as superfícies opostas, excluindo a face de acabamento e respectiva face oposta), sendo aplicado um material de contacto que permita a homogeneização das superfícies do provete (preencher vazios superficiais, evitar zonas rugosas). Posteriormente, os provetes devem ser colocados de forma alinhada, em faces opostas e sobre o material de contacto, preferencialmente em posição central na superfície do provete. O tempo de propagação, t_i , é registado e o processo é repetido para o restante par de superfícies opostas do provete. A velocidade de propagação de ultra-sons é obtida através da expressão (4):

$$v_i = \frac{S_i}{t_i} \quad (4)$$

Onde,

v_i - velocidade de propagação de ultra-sons (m/s);

s_i - distância percorrida pela onda entre o emissor e o receptor (m);

t_i - intervalo de tempo que a onda demora do transdutor emissor ao receptor (μ s).



Figura 17. Medição da velocidade de propagação de ultra-sons.

2.2.3. Resistência à tracção por compressão diametral

A resistência do betão à tracção, relevante no âmbito dos estados limite de serviço, pode ser determinada por ensaios de tracção pura, de flexão simples ou de compressão diametral. A difícil execução do primeiro e a necessidade de provetes cilíndricos para o ensaio do módulo de elasticidade (não destrutivo) levaram à adopção do ensaio de compressão diametral. Será seguida a metodologia de ensaio especificada pela norma NP EN 12390-6 (2011) “*Ensaio ao betão endurecido - Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes*”. Para efectuar o procedimento normativo, é necessário: prensa hidráulica; posicionador / estrutura de suporte dos provetes em aço (Figura 18); peça de carga em aço; faixas de cartão prensado e pano para limpeza dos provetes. O ensaio é realizado em provetes cilíndricos de geometria definida por 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O período de cura, idêntico em todos os espécimes, é de 28 dias. Os provetes devem ser mantidos durante 24 horas na zona de betonagem de modo a adquirirem resistência suficiente para serem desmoldados e transportados até à zona de cura. Para execução do ensaio, o provete deve ser retirado do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida, removendo o excesso de humidade e/ou sujidade. As superfícies da máquina de ensaio devem ser limpas e o provete colocado no posicionador, sendo centrado em relação aos pratos para evitar qualquer tipo de excentricidade. As faixas de cartão prensado são posicionadas nas geratrizes de base e de topo e, na geratriz de topo, é sobreposta a peça de carga. A carga é aplicada a uma velocidade constante de 0,04 a 0,06 MPa/s, de forma contínua e sem choques até se atingir a rotura. Finalmente, o valor da carga máxi-

ma atingida é registado. A resistência à tracção por compressão de cada provete é dada pela seguinte expressão (5):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (5)$$

Onde:

f_{ct} - resistência à tracção por compressão diametral (MPa ou N/mm²);

F - carga máxima (N);

L - comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d - dimensão da secção transversal (mm).

A resistência à tracção por compressão dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes respectivos.



Figura 18. Posicionamento do provete.

2.2.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade de um betão permite caracterizar a sua rigidez, ou deformabilidade, através da análise da relação tensão / extensão (σ / ϵ) em regime de deformações elásticas. Deste modo, as respostas das estruturas às solicitações impostas são forçosamente influenciadas por este parâmetro, tanto ao nível das deformações como na distribuição dos esforços.

Comprova-se, no entanto, que a relação σ / ϵ de um betão não é linear, pelo que não existirá um valor único para o módulo de elasticidade num elemento sujeito a variação de cargas. Deste modo, é usual definir-se a recta que estabelece módulo de elasticidade

como a tangente na origem da curva σ/ε , ou ainda, como a secante entre dois pontos de tensão conhecida da mesma curva. Na campanha experimental, será determinado o módulo de elasticidade secante do betão, após uma sucessão de ciclos de carga e descarga, para um nível de tensão igual a 1/3 da resistência média à compressão (f_{cm}). Será seguida a metodologia indicada pela especificação LNEC E-397 (1993) “*Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão*”. Para realizar o procedimento constante da norma, é necessário (Figura 19): prensa hidráulica; extensómetros eléctricos adesivos; *data logger*, acoplado à prensa hidráulica e extensómetros e pano para limpeza dos provetes. O ensaio é realizado em provetes cilíndricos de geometria definida por 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O período de cura de 28 dias é idêntico para todos os espécimes. Para execução do ensaio, o provete deve ser retirado do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida, removendo o excesso de humidade e/ou sujidade. A estrutura de extensómetros é colocada na envolvente do provete, sendo limpas as superfícies da máquina de ensaio. Os discos de neoprene são colocados nas superfícies de ensaio e o provete é posicionado evitando qualquer excentricidade de carregamento. É utilizada uma rótula metálica para assegurar a transmissão exclusiva de esforço axial, verificando-se o correcto posicionamento do provete pela diferença registada nos dois extensómetros ($|\varepsilon_{ext1} - \varepsilon_{ext2}|$) que deverá, após cada ciclo de carga, ser inferior a 10%. Seguidamente é aplicada uma tensão inicial de 0,5 a 1,0 MPa (σ_i), aumentada de forma contínua, a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa/s, até atingir 1/3 da tensão média de resistência à compressão. As extensões e tensões iniciais e finais são registadas e é efectuado um novo ciclo de carga. Após cada ciclo, é confirmado se a diferença entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$) é inferior a 1×10^{-5} ; caso o limite não seja satisfeito, é necessário repetir o ciclo de carga, efectuando-se os ciclos necessários até que o ponto anterior seja verificado ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| < 1 \times 10^{-5}$).



Figura 19. Determinação do módulo de elasticidade: estação de ensaio, prensa hidráulica, provete cilíndrico.

Considerando que a diferença entre as médias das variações de extensão entre dois ciclos consecutivos verifica a expressão (6):

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_i - \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_{i+1} \right| < 1 \times 10^{-5} \quad (6)$$

O módulo de elasticidade em compressão (E_c) é dado pela seguinte expressão (7):

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad (7)$$

Onde:

E_c - módulo de elasticidade em compressão (GPa);

$\sigma_{i,n}$ - tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);

$\sigma_{f,n}$ - tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);

$\varepsilon_{i,n}$ - extensão correspondente à tensão $\sigma_{i,n}$, registada no ciclo n ;

$\varepsilon_{f,n}$ - extensão correspondente à tensão $\sigma_{f,n}$, registada no ciclo n .

2.2.5. Resistência à abrasão

A avaliação da resistência ao desgaste por abrasão é extremamente importante em elementos estruturais de betão à vista, canais hidráulicos, superfícies de revestimento, ou seja, em elementos de betão onde a capacidade de suportar acções que suscitem a saída não propositada de material sólido dum dada superfície seja importante. Na realização do ensaio, será seguida a norma alemã DIN 52108 (2010) “*Testing of inorganic non-metallic materials: Wear test with grinding wheel according to Böhme*”. Para efectuar o procedimento normativo, é necessário: máquina de abrasão de Böhme (Figura 20); pó abrasivo; estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; balança de precisão de $\pm 0,1$ g; paquímetro (Figura 21); escova para limpeza da máquina de abrasão e provetes e pano

para limpeza dos provetes. Os provetes têm uma geometria paralelepípedica, de bases quadradas paralelas com $71 \pm 1,5$ mm de aresta e com uma área de teste de 50 ± 2 cm², com altura, não uniformizada, de cerca de 50 mm. Estes são obtidos por corte de cubos de 100 mm de aresta, após os 91 dias de idade estipulados pela norma. Uma vez terminado o processo de corte, os provetes são sujeitos a secagem em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingirem massa constante. Para realizar o procedimento de ensaio, deve-se medir a altura inicial do provete em nove pontos marcados previamente na face oposta à de teste. A máquina de abrasão deve ser limpa, distribuindo uniformemente 20,0 g de pó abrasivo ao longo do trilho de abrasão. O provete é posicionado no mecanismo de fixação, sendo carregada a face de topo com um carregamento vertical, centralizado, de uma pressão de contacto de $30 \pm 0,3$ kPa, de modo a assegurar o atrito suficiente entre o provete e o conjunto abrasivo (disco e pó). A rotação do disco de Böhme é iniciada a uma velocidade de 30 ± 1 rpm, de forma a completar 22 voltas. O ensaio de resistência à abrasão inclui 16 ciclos de teste por provete. Após cada ciclo de teste, a superfície de teste do provete e o disco de Böhme devem ser limpos. O provete deve ser rodado 90° em torno do seu eixo vertical, sempre no mesmo sentido, distribuindo novamente 20 g de pó abrasivo no trilho de abrasão. Terminados os 16 ciclos, o provete realiza quatro voltas, consumindo 320 g de pó abrasivo. Concluídos os 16 ciclos de teste, o provete deve ser limpo, predeterminando a altura dos nove pontos medidos. A redução da altura do provete por abrasão resulta da diferença entre a média das n alturas iniciais ($L_{i,j}$) e a média das n alturas finais ($L_{f,j}$), através da seguinte expressão (8):

$$\Delta L = \overline{L_{i,j_n}} - \overline{L_{f,j_n}} \quad (8)$$

Onde:

ΔL - perda média de espessura (mm);

$L_{i,j}$ - espessura inicial do provete, medida no ponto j (mm);

$L_{f,j}$ - espessura final do provete, medida no ponto j (mm);

n - número de pontos marcados no provete.



Figura 20. Ensaio de desgaste.

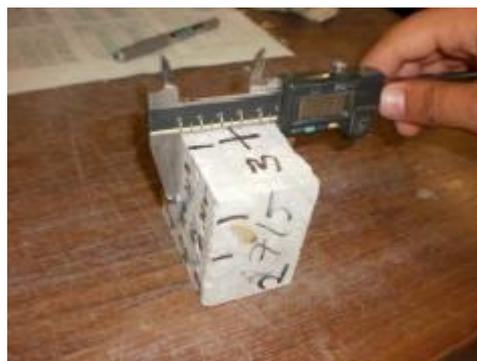


Figura 21. Medição da altura do provete.

2.3. Ensaio de durabilidade ao betão no estado endurecido

Neste subcapítulo, são apresentados os ensaios a realizar para caracterizar o desempenho em termos de durabilidade dos betões fabricados (Tabela 3).

Tabela 3. Ensaio de durabilidade ao betão.

Durabilidade	Resistência à carbonatação	LNEC E 391:1993
	Absorção de água por capilaridade	LNEC E 393:1993
	Absorção de água por imersão	LNEC E 394:1993
	Resistência à penetração por cloretos	LNEC E 463:2004

2.3.1. Absorção de água por imersão

O ensaio da absorção por imersão é uma maneira indirecta de avaliar a porosidade interna do betão. Assim, será possível caracterizar o comportamento dos betões à entrada de água e outros agentes nocivos. Este ensaio será realizado de acordo com a norma LNEC E-394 (1993) “*Determinação da absorção de água por imersão*”. Para realizar o procedimento constante da norma, é necessário: recipiente, com capacidade suficiente para provetes de betão e água para cobri-los (Figura 22); balança de precisão de $\pm 0.05\%$ da massa do provete (Figura 23); tanque com água; estufa ventilada à temperatura de 105 ± 5 °C. Os provetes têm uma geometria cúbica com 10 cm de aresta, sendo ensaiados após 28 dias de idade. Na execução do ensaio, o provete é introduzido num recipiente com água, imergindo-se progressivamente 1/3 deste, em intervalos de uma hora. Este deve permanecer no recipiente com água até alcançar massa constante. Posteriormente, a massa do provete saturado com superfície seca (m_1) e a massa hidrostática após saturação (m^2) são pesadas. Por fim, o provete é secado em estufa ventilada à tem-

peratura de 110 ± 5 °C até alcançar massa constante (m^3). A absorção de água por imersão (%) é obtida pela expressão (9):

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

A_i - absorção de água por imersão (%);

m_1 - massa do provete saturado no ar (g);

m_2 - massa hidrostática do provete saturado (g);

m_3 - massa do provete seco (g).



Figura 22. Provetes imersos a 1/3 da sua altura.



Figura 23. Balança hidrostática.

2.3.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite quantificar a absorção de água por ascensão através dos vasos capilares. Este método, tal como a absorção por imersão, é considerado uma maneira indirecta de avaliar a porosidade interna do provete de betão. A absorção por capilaridade surge pelas diferenças de pressão entre a superfície livre da água e a superfície livre, dessa mesma água, no interior dos vasos capilares (Coutinho, 1997). O ensaio será realizado segundo a norma LNEC E-393 (1993) “*Determinação da absorção de água por capilaridade*”. O procedimento normativo requer: máquina de serra capaz de cortar provetes; estufa ventilada à temperatura de 40 ± 5 °C; balança de precisão de $\pm 0.05\%$ da massa do provete; apoios plásticos; nível; tabuleiro metálico e campânula. Os provetes têm dimensão prismática, de secção circular, com comprimento de 100 mm e diâmetro de 150 mm. Para a sua obtenção, a meio do período de cura (14 dias), é necessário transformar provetes inicialmente produzidos, com 300 mm de comprimento, em três provetes de ensaio com 100 mm de comprimento, com o

auxílio da máquina de corte. Para a realização do ensaio, o provete, preparado como referido, é seco em estufa ventilada à temperatura de 40 ± 5 °C durante 14 dias. Terminado este período, o provete é retirado da estufa e com a sua temperatura estabilizada, é pesado e a sua massa registada. Posteriormente, o provete é colocado numa bandeja sobre apoios, de modo a que a sua base (face cortada do provete) esteja em contacto com a água. A bandeja deve ser preenchida até que o nível de água atinja 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete, sendo tapada com uma campânula, de modo a evitar a evaporação. Ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas, o provete é retirado da água, sendo registada a altura capilar e efectuada a sua pesagem. A absorção de água por capilaridade (g/mm^2) ao fim de 3, 6, 24 e 72 h é obtida através da expressão (10):

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A_s} \quad (10)$$

Onde:

A_c - absorção de água por capilaridade, no instante t_i (g/mm^2);

M_i - massa do provete, quando este esteve em contacto com a água durante o tempo t_i (g);

M_0 - massa do provete seco em estufa (g);

A_s - área da face inferior do provete, que esteve em contacto com a água (mm^2).

2.3.3. Resistência à carbonatação

O ensaio de carbonatação permite obter uma noção clara acerca da resistência do betão, em termos de durabilidade, à penetração do dióxido de carbono até às armaduras. Como a penetração do gás depende da porosidade do betão, a condição de cura deste é muito importante para controlar a formação de uma microestrutura porosa. Neste ensaio, serão efectuadas leituras a provetes que estiveram 7, 28, 56 e 91 dias expostos a um ambiente rico em dióxido de carbono. A metodologia e os princípios adoptados no ensaio de carbonatação seguirão a norma LNEC E-391 (1993) “*Betões: Determinação da resistência à carbonatação*”. Para realização do procedimento constante da norma, é necessário: máquina de serra capaz de cortar provetes; balança de precisão de $\pm 0.1\%$ da massa do provete; tinta epóxida (Figura 24); trincha; câmara de carbonatação; escopro; marreta; solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% e craveira (Figura 25). Os provetes têm uma geometria cilíndrica, com diâmetro de 100 mm e 40 mm de altura. Para a sua obtenção, ao fim do período de cura de 28 dias, os provetes inicialmente produzidos, com 250 mm de altura, são cortados, obtendo-se provetes de ensaio com 40 mm de altura. O período

de cura é de 28 dias, estando os provetes imersos em água à temperatura de 20 ± 2 °C, durante os primeiros 14 dias, e depois em câmara seca ($60 \pm 5\%$ de humidade relativa e 20 ± 2 °C) nos restantes 14 dias. Os ensaios serão realizados após os provetes se encontrarem na câmara de carbonatação à 7, 28, 56 e 91 dias. Após o período de cura, o provete é protegido com uma tinta isolante nos topos, para que o acesso do CO₂ seja feito apenas pela superfície lateral. Depois do isolante seco, o provete é então introduzido na câmara de carbonatação. Nas datas referidas, o provete é retirado da câmara e, com o auxílio de um escopro e um martelo, é partido em quatro partes. Uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% é aplicada nas superfícies fracturadas, sendo medida a profundidade de carbonatação com uma craveira. A resistência à carbonatação de cada tipo de betão é determinada através da média da profundidade de carbonatação dos três provetes, sendo que a profundidade de carbonatação de cada provete é obtida através da média de oito leituras.



Figura 24. Superfícies pintadas com tinta epóxi-da.



Figura 25. Provetes pulverizados com solução de fenolftaleína.

2.3.4. Resistência à penetração de cloretos

A permeabilidade do betão é um factor importante, que afecta a durabilidade do betão. Esta controla a quantidade de entrada de humidade que poderá conter agentes nocivos para o betão. A permeabilidade do betão depende da conectividade dos vasos capilares presente na matriz cimentícia. É largamente aceite que a penetração dos cloretos no betão será tanto maior quanto maior for a permeabilidade deste. Este ensaio, tal como o da resistência à carbonatação, é extremamente importante, devido ao efeito nefasto que estes agentes produzem na despassivação das armaduras das estruturas de betão. Para a realização do ensaio, será seguida a metodologia e os princípios adoptados no ensaio de

resistência à penetração de cloretos presentes na norma LNEC E-463:2004 “*Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*”. O procedimento normativo requer: água destilada; hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂); cloreto de sódio (NaCl); hidróxido de sódio (NaOH); craveira; máquina de serra capaz de cortar provetes; balança de precisão de ± 0.1% da massa a quantificar; exsiccador, capaz de albergar, no mínimo, três provetes; bomba de vácuo (Figura 26); mangas de borracha de silicone; braçadeiras de aço inoxidável; reservatório plástico; multímetro; escopro; marreta e nitrato de prata (AgNO₃) (Figura 27). Os provetes têm forma cilíndrica, com um diâmetro de 100 mm e 50 mm de altura. A 14 dias do fim do período de cura, de 28 ou de 91 dias, transforma-se os provetes de 250 mm de altura em provetes de ensaio com 50 mm de altura, com o auxílio da máquina de corte. Durante os restantes 14 dias, os provetes estão em câmara seca (60 ± 5% de humidade relativa e 20 ± 2 °C). Para a realização do ensaio, os provetes são colocados na câmara de vácuo, sujeitos, durante 3 horas, a pressões entre 10 e 50 mbar. Em seguida, é introduzida uma solução saturada de hidróxido de cálcio na câmara, sem desligar a bomba, até os provetes estarem completamente cobertos. Passado uma hora, a bomba de vácuo é desligada, permanecendo os provetes em contacto com a solução de Ca(OH)₂ durante mais 18 ± 2 horas, à pressão atmosférica. Terminado este período, os provetes são retirados da câmara e colocados no equipamento de migração. Deve ser preparada a solução anódica e catódica e, instalada uma corrente eléctrica contínua de 30 V em cada contentor. Através de um multímetro, a intensidade de corrente que passa em cada contentor é medida, procedendo-se à correcção da voltagem. Depois, em função da corrente inicial, a duração do ensaio (t) é determinada, segundo a especificação LNEC. As temperaturas, inicial e final, da solução anódica devem ser medidas. Em seguida, os provetes são lavados com água e, com o auxílio de um escopro e um martelo, são partidos em metade. Por fim, sobre uma das superfícies fracturadas, é aplicada uma solução de nitrato de prata e, com uma craveira, é medida a profundidade de penetração dos iões cloretos. O coeficiente de migração de cloretos (m²/s), em regime não estacionário, é determinado através das seguintes expressões ((11) a (13)):

$$D_{\text{nssm}} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (11)$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (12)$$

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E}} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (13)$$

Onde:

D_{nssm} - coeficiente de migração em regime não estacionário (m^2/s);

R - constante dos gases perfeitos, $R=8,314$ ($\text{J} \times \text{K}^{-1} \times \text{mol}^{-1}$);

T - temperatura média entre o início e o fim do ensaio na solução anódica (K);

U - voltagem aplicada no circuito (V);

L - espessura do provete (mm).

erf^{-1} - inverso da função erro;

c_d - concentração de cloretos para a qual a prata reage;

c_0 - concentração de cloretos no cátodo.



Figura 26. Exsicador e bomba de vácuo.



Figura 27. Penetração dos cloretos.

2.3.5. Retracção

Uma cura inadequada do betão poderá ser responsável de muitos dos fenómenos nefastos posteriores. Um destes fenómenos está relacionado com as tensões induzidas pela retracção do betão por evaporação da água. Isto poderá levar à formação de microfissuras no betão, que facilitarão a entrada de água e outros agentes nocivos. O ensaio à retracção permite determinar a variação das dimensões dos provetes ao longo de um determinado período de tempo. A metodologia e os princípios adoptados no ensaio de determinação da retracção seguirão a norma LNEC E-398 (1993) “*Betões: Determinação da retracção e da expansão*”. O procedimento normativo em causa requer: betume polimérico (Figura 28); lixa; pastilhas metálicas e aparelho de medição de extensões com uma precisão de 10^{-6} m (Figura 29). Os provetes têm forma prismática, de secção quadrada, com comprimento de 600 mm e aresta de 150 mm. A retracção começa a ser

medida logo após a desmoldagem, às 24 ± 1 horas de idade, servindo a leitura inicial de ponto de referência para as leituras seguintes. Para a realização do ensaio, são colocadas duas pastilhas metálicas a $1/3$ e $2/3$ do comprimento da linha média de uma das maiores faces do provete (desmoldado). Em seguida, para proteger as pastilhas e mantê-las imóveis, é aplicado um betume polimérico à volta das mesmas. É efectuada a primeira leitura, sendo considerada como o ponto de referência para as leituras seguintes. Os provetes são colocados na câmara seca, efectuando-se as diversas leituras nos 90 dias seguintes à primeira. A determinação dos valores da retracção (ε) é feita segundo a expressão (14):

$$\varepsilon = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (14)$$

Onde:

ε - Retracção (m/m);

d_i - distância inicial, de referência, entre pastilhas metálicas (m);

d_f - distância final, após um determinado tempo relativamente ao início do ensaio, entre pastilhas metálicas (m).



Figura 28. Aplicação do betume polimérico.



Figura 29. Aparelho de leitura da retracção.

3. Bibliografia

COUTINHO, A. (1988) - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II e III, 4ª edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

DIN 52108 (2010) - Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme.

LNEC E 397 (1993) - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão, LNEC.

LNEC E-391 (1993) - Betões: Determinação da resistência à carbonatação. LNEC, Lisboa.

LNEC E-393 (1993) - Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade. LNEC, Lisboa.

LNEC E-394 (1993) - Betões: Determinação da absorção da água por imersão - Ensaio à pressão atmosférica. LNEC, Lisboa.

LNEC E-463 (2004) - Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC, Lisboa.

NP EN 12350-2 (2009) - Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento, IPQ.

NP EN 12350-6 (2009) - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica, IPQ.

NP EN 12350-7 (2010) - Ensaio do betão fresco: Determinação do teor de ar, Métodos pressiométricos, IPQ.

NP EN 12350-9 (2010) - Ensaio do betão fresco: Betão auto-compactável, Ensaio de escoamento no funil V, IPQ.

NP EN 12350-10 (2010) - Ensaio do betão fresco: Betão auto-compactável, Ensaio de escoamento na caixa L, IPQ.

NP EN 12350-11 (2010) - Ensaio do betão fresco: Betão auto-compactável, Ensaio de segregação no peneiro, IPQ.

NP EN 12350-12 (2010) - Ensaio do betão fresco: Betão auto-compactável, Ensaio de espalhamento no anel J, IPQ.

NP EN 12390-3 (2011) - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, IPQ.

NP EN 12390-6 (2011) - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes, IPQ.

NP EN 12504-4 (2007) - Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, IPQ.

Lisboa, 19 de Abril de 2013

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Alexandra Rosa
Bolsaira de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto