

AUMENTO DA DURABILIDADE DO BETÃO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE METACAUPLINO E LÁTEX – UM CASO DE ESTUDO

A. CAMÕES

Prof. Auxiliar

UM

Guimarães

P. J. S. CRUZ

Prof. Associado

UM

Guimarães

S. JALALI

Prof. Associado

UM

Guimarães

R. M. FERREIRA

Assistente

UM

Guimarães

SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar o comportamento de betões incorporando adições e aditivos, alguns pilares da nova ponte sobre o Rio Ave foram construídos com diferentes composições. Neste trabalho, são apresentados os resultados experimentais relacionados com o desempenho dos betões fabricados com metacaulino e látex. Os resultados obtidos demonstram que o metacaulino e o látex tornam os betões menos permeáveis à água, melhoram a resistência à penetração de cloretos e não prejudicam o desenvolvimento da resistência à compressão a longo prazo.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de betões convencionais, mesmo em determinadas construções correntes, tem-se revelado, em muitas situações, técnica e economicamente inadequado. Nas últimas décadas, a experiência tem demonstrado que as estruturas de betão armado e pré-esforçado se degradam rápida e prematuramente, causando uma diminuição da sua vida útil. A degradação destas estruturas obriga a efectuar intervenções onerosas, que implicam elevados custos de avaliação, manutenção, reforço e reabilitação, ou mesmo, em casos extremos, a sua integral substituição. Neste contexto, tem-se assistido a um acréscimo substancial no estudo dos aspectos relacionados com o ciclo de vida útil das estruturas.

Sendo parte integrante do projecto, a durabilidade das estruturas de betão, tem sido encarada,

em geral, de uma forma prescritiva, baseada no cumprimento de determinados requisitos, como os impostos na NP EN 206-1 e na EN 1992-1-1. Estes documentos prevêem que a durabilidade das estruturas de betão seja assegurada através da imposição de uma relação água/ligante (A/L) máxima, de uma dosagem mínima de cimento e de uma espessura mínima de recobrimento das armaduras. No entanto, mesmo em estruturas relativamente recentes, executadas em conformidade com os documentos referidos, tem-se observado degradação prematura de elementos de betão armado ou pré-esforçado [1].

A experiência permite demonstrar que uma substituição parcial de cimento portland por adições pozolânicas pode melhorar substancialmente as propriedades relacionadas com a durabilidade dos betões. Em particular, a sílica de fumo e as cinzas volantes têm sido utilizadas correntemente na composição de betões como forma de obter estruturas mais duráveis em ambientes mais exigentes. Contudo, a substituição parcial de cimento por metacaulino apenas surgiu recentemente e, por conseguinte, conhece-se ainda relativamente pouco acerca do efeito desta adição no desempenho dos betões. O conhecimento sobre o comportamento de betões modificados com polímeros, nomeadamente com incorporação de látex é, também, actualmente escasso.

As normas e os regulamentos disponíveis não fazem qualquer tipo de referência à incorporação de metacaulino ou de látex em composições de betão. No entanto, o efeito associado à incorporação destes materiais no desempenho de betões tem vindo a ser abordado em trabalhos de investigação, publicados nestes últimos anos [2, 3]. Estas adições afectam o desempenho dos betões e, em geral, aumentam a resistência à penetração de cloretos, à carbonatação, à reacção álcalis-agregado e à deterioração química. Apesar destas importantes contribuições, é ainda necessário proceder a mais estudos e obter mais informação, nomeadamente em relação ao desempenho comparativo com betões fabricados apenas com cimento e aplicados em obra.

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, no âmbito de um protocolo de colaboração com a AENOR (Auto-estradas do Norte), acompanhou o projecto e a construção da Ponte sobre o Rio Ave, situada na A11/IP9 Braga-Guimarães – IP4/A4, no sublanço Celeirós/Guimarães Oeste (Figura 1).



Figura 1: Vista geral da ponte sobre o Rio Ave



Figura 2: Viaduto de aproximação Este

Os pilares do viaduto de aproximação Este (Figura 2) foram executados recorrendo a diferentes composições de betão. De acordo com o projecto de estruturas, todas as composições foram

fabricadas de modo a pertencer à classe de resistência C30/37. Em relação à composição de controlo (sem inclusão de aditivos ou adições), procedeu-se às seguintes alterações: num dos pilares, o betão foi produzido recorrendo à substituição de 10% da massa de cimento por sílica de fumo; noutra pilar, 20% da massa de cimento foi substituída por cinzas volantes; outro pilar foi executado com um betão em que 10% da massa de cimento foi substituída por metacaulino; o betão utilizado na betonagem de um outro pilar continha látex; e outro foi executado com um betão cuja composição incluía inibidores de corrosão.

Durante a betonagem dos pilares foi recolhido um número significativo de provetes que foram conservados em obra, de modo a simular, pelo menos em parte, as condições reais de exposição. A durabilidade das composições foi avaliada através da realização de ensaios laboratoriais, tendo sido realizados os seguintes: absorção de água por capilaridade e imersão; permeabilidade ao oxigénio e à água; migração de cloretos em estado não estacionário; resistividade eléctrica. A resistência à compressão foi, também, determinada.

Neste trabalho apresentam-se e analisam-se, apenas, os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório, relativos à composição de controlo e às composições com incorporação de metacaulino e de látex.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais, fabrico e conservação

O programa experimental realizado compreendeu o estudo do desempenho das composições de betão indicadas na Tabela 1, pertencentes à classe de resistência C30/37 e classe de abaixamento S3.

Tabela 1 – Composição dos betões

| Material | C30/37 | C30/37MK | C30/37LX |
|---------------------------------------|--------|----------|----------|
| Cimento (kg/m^3) | 350 | 315 | 350 |
| Areia fina (kg/m^3) | 365 | 365 | 365 |
| Meia areia (kg/m^3) | 411 | 411 | 411 |
| Brita 19 (kg/m^3) | 495 | 495 | 495 |
| Brita 25 (kg/m^3) | 522 | 522 | 522 |
| Água (l/m^3) | 155 | 155 | 139 |
| Superplastificante (l/m^3) | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Metacaulino (kg/m^3) | – | 35 | – |
| Látex (l/m^3) | – | – | 17,5 |

O cimento utilizado no fabrico dos três betões foi o cimento portland do tipo CEM I 42.5R. Todas as amassaduras foram produzidas com uma razão A/L igual a 0,44 e com $3,5 \text{ l/m}^3$ de um adjuvante superplastificante dotado de um teor de sólidos de 42% e cuja composição química é baseada em condensados de naftaleno formaldeído sulfonado. Em todas as amassaduras realizadas recorreu-se à mistura de duas areias (areia fina fluvial e meia areia britada) e duas

britas graníticas (brita 19 e brita 25), cujas dosagens foram determinadas por aplicação do método de Faury, sendo a máxima dimensão dos agregados igual a 25 mm. Para além da composição de referência (C30/37), sem inclusão de adições ou aditivos (excepto o superplastificante referido), foram usadas mais duas composições alternativas: uma com incorporação de metacaulino em substituição de 10% da massa de cimento (C30/37MK); e outra com incorporação de 5% da massa de cimento de um aditivo polimérico (látex) disponível comercialmente em solução aquosa (C30/27LX).

Das composições realizadas foram moldados provetes com o objectivo de cumprir um programa experimental relativamente vasto que permitiu caracterizar os betões produzidos de forma abrangente, incidindo na avaliação do comportamento mecânico e na durabilidade. Foram moldados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, e provetes cúbicos com 150 mm e 200 mm de aresta. Após o preenchimento dos moldes, os provetes foram conservados sob películas plásticas até à sua desmoldagem, que ocorreu no dia seguinte. Após esta data, os provetes foram imersos em água durante 28 dias, em recipientes situados no local da obra. Seguidamente, os provetes foram retirados da água e mantidos no local, sujeitos às condições reais de exposição ambiental da estrutura, até próximo da data de realização dos ensaios. Na altura da realização dos ensaios laboratoriais, todas as composições apresentavam uma idade de cerca de 400 dias.

2.2 Procedimentos de ensaio

A resistência à compressão das composições de betão foi determinada em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Os ensaios foram realizados de acordo com a especificação LNEC E226, tendo a face de betonagem dos provetes sido previamente rectificada.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade à pressão atmosférica foram efectuados em provetes cilíndricos com 105 mm de diâmetro e 250 mm de altura, com base no disposto na especificação do LNEC E393. As três composições de betão foram, também, submetidas ao ensaio de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, realizado de acordo com o previsto na especificação LNEC E394.



Figura 3: Ensaio de migração de cloretos (*Nordtest Method NT Build 492*)

Conforme representado na Figura 3, a resistência à penetração de cloretos foi avaliada por intermédio da realização de ensaios acelerados de migração em regime não estacionário. Estes ensaios foram realizados segundo a metodologia proposta pela metodologia proposta pela *Nordtest Method NT Build 492*, que permite determinar o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, D_{ns} . Durante a realização destes ensaios, a resistividade eléctrica, ρ , das diferentes composições foi, também, determinada. Complementarmente, a resistência à penetração de cloretos foi determinada recorrendo ao disposto na ASTM C 1202 (Figura 4).

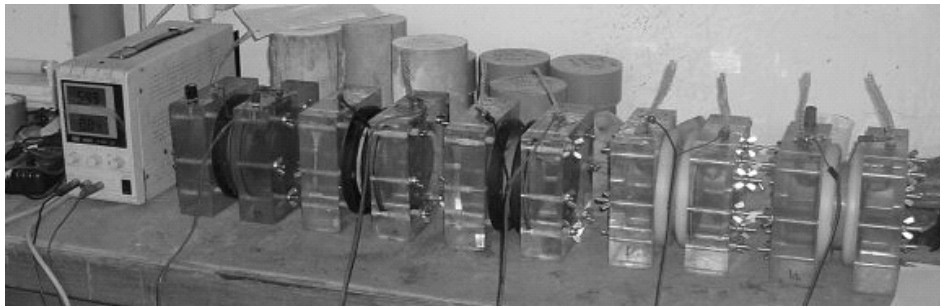


Figura 4: Ensaio de resistência à penetração de cloretos (ASTM C1202)



Figura 5: Ensaio de permeabilidade à água e ao oxigénio

A permeabilidade à água e ao oxigénio de cada uma das composições estudadas foi calculada submetendo a ensaio provetes cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 40 mm de altura (Figura 5). Os ensaios foram realizados com base na especificação LNEC E392, utilizando um equipamento desenvolvido na Universidade de Leeds [4].

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 2 apresentam-se os principais resultados obtidos na campanha experimental realizada. Cada valor corresponde à média dos resultados obtidos em três provetes, seguido, entre parêntesis, do respectivo valor do coeficiente de variação, expresso em percentagem.

3.1 Resistência à compressão

Conforme se pode contactar por observação da Tabela 2, a incorporação de metacaulino ou de

látex praticamente não afectou a resistência à compressão das composições de betão analisadas, sendo os resultados obtidos semelhantes aos da composição de controlo.

Tabela 2 – Resultados obtidos

| | C30/37 | C30/37MK | C30/37LX |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Resistência à compressão, f_{cm} (MPa) | 57,3 (2,9) | 56,1 (2,6) | 55,8 (2,1) |
| Coefficiente de absorção capilar, S_m (kg/m ² /min ^{0.5}) | 0,059 (4,4) | 0,058 (3,2) | 0,049 (7,9) |
| Coefficiente de difusão de cloretos, D_{nsm} (x10 ⁻¹² m ² /s) | 24,4 (8,7) | 8,4 (7,6) | 14,5 (15,9) |
| Penetração de cloretos ASTM C1202, Q (C) | 4978 (5,8) | 2275 (6,0) | 3658 (9,3) |
| Resistividade eléctrica, ρ (Ω m) | 337,8 (5,6) | 601,4 (5,4) | 453,2 (5,4) |
| Absorção de água por imersão, (%) | 10,5 (4,9) | 12,7 (0,7) | 11,0 (1,4) |
| Permeabilidade à água (x10 ⁻¹⁸ m ²) | 6,6 (7,8) | 2,5 (11,3) | 1,9 (12,9) |
| Permeabilidade ao oxigénio (x10 ⁻¹⁷ m ²) | 5,5 (18,0) | 8,3 (8,0) | 2,6 (21,0) |

3.2 Migração e difusão de cloretos

Os coeficientes de difusão de cloretos determinados, e apresentados na Tabela 2, permitem constatar que a incorporação de metacaulino ou de látex é vantajosa, uma vez que os respectivos coeficientes de difusão são inferiores ao da composição de controlo.

De acordo com o critério de classificação proposto por Gjörv [5], e apresentado na Tabela 3, a resistência dos betões à penetração de cloretos pode ser avaliada tendo em conta o coeficiente de difusão, D_{nsm} , determinado recorrendo aos resultados obtidos no ensaio definido na *NT Build 492*. Confrontando os D_{nsm} obtidos com os apresentados na Tabela 3, é possível verificar que a adição de metacaulino transforma o betão de controlo, com resistência reduzida à penetração de iões de cloro, num betão de resistência elevada. A incorporação de látex não parece ser tão efectiva, mas permite aumentar a resistência para um nível moderado.

A ASTM C 1202 classifica o desempenho dos betões face à penetração de iões de cloro em função da carga passada através do provete, Q , de acordo com o apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio *NT Build 492* [5]

| D_{nsm} (x10 ⁻¹² m ² /s) | Resistência do betão |
|--|----------------------|
| > 15 | reduzida |
| 10 – 15 | moderada |
| 5 – 10 | elevada |
| 2,5 – 5 | muito elevada |
| < 2,5 | ultra elevada |

Tabela 4 – Penetração de cloretos de acordo com a carga passada através dos provetes [6]

| Q (C) | Penetração de cloretos |
|-----------------|------------------------|
| > 4000 | elevada |
| > 2000 e < 4000 | moderada |
| > 1000 e < 2000 | reduzida |
| > 100 e < 1000 | muito reduzida |
| < 100 | desprezável |

De acordo com esta classificação, os betões com metacaulino e com látex apresentam uma resistência à penetração de cloretos moderada, enquanto que o betão de controlo é classificado como de elevada penetrabilidade a este tipo de agente agressivo.

Tendo em conta os resultados obtidos nestes dois ensaios, é possível constatar que a incorporação de metacaulino ou de látex contribui para uma melhoria do desempenho do betão, tornando-o mais resistente à penetração de cloretos.

3.3 Resistividade eléctrica

Para um determinado betão, contendo um determinado teor de humidade, a difusão de cloretos está intimamente relacionada com a sua resistividade [7]. Neste sentido, a resistividade fornece indicações acerca da resistência à penetração de cloretos. No entanto, este ensaio acelerado pode não caracterizar completamente a resistência à penetração de cloretos dos betões mas, deverá reflectir a variação de resistência à penetração de cloretos associada às diferenças na composição das pastas ligante dos betões. Este aspecto é confirmado pelos resultados obtidos, que acompanham as tendências verificadas nos restantes ensaios realizados (*NT Build 492* e *ASTM C 1202*).

3.3 Absorção de água

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, por imersão e por capilaridade, revelaram-se pouco sensíveis às variações na composição dos betões testados. No entanto, parece haver uma ligeira tendência para a obtenção de menores valores do coeficiente de absorção capilar no betão com incorporação de látex do que nas outras duas composições. Os reduzidos valores do coeficiente de absorção capilar obtidos demonstram que os betões ensaiados aparentam ser pouco vulneráveis a este tipo de mecanismo de penetração.

3.4 Permeabilidade à água e ao oxigénio

Em relação à permeabilidade à água, verifica-se que, quer a adição de metacaulino quer a incorporação de látex, melhoram o desempenho dos betões, uma vez que a composição de controlo se mostrou mais permeável. No que concerne à permeabilidade ao oxigénio, a composição com metacaulino revelou ser a mais permeável mas, a incorporação de látex permitiu obter valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio inferiores aos da composição de controlo. Os resultados obtidos enquadram-se com os apresentados por outros autores [8, 9] e a ordem de valores registada com o equipamento usado (permeómetro de Leeds) está, também, de acordo com outros resultados [10].

4. CONCLUSÕES

A presente investigação experimental foi baseada num número restrito de variáveis e a avaliação dos diferentes parâmetros foi baseada no ensaio de um número limitado de amostras. Contudo, atendendo aos resultados obtidos, é possível apontar as seguintes conclusões:

Em geral, os parâmetros de durabilidade aferidos indicam que a presença de metacaulino e de

látex nas misturas é benéfica, resultando num betão mais durável. Este efeito é mais relevante relativamente à penetração de cloretos, indiciando que a inclusão de metacaulino ou de látex em betões localizados em ambientes sujeitos a este tipo de agressividade é particularmente favorável.

Os resultados obtidos evidenciam que a utilização de metacaulino ou de látex não influenciou significativamente a resistência à compressão a longo prazo dos betões, sendo os valores semelhantes aos registados na composição de controlo, fabricada apenas com cimento portland.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pela *AENOR – Auto-estradas do Norte, Portugal*. Os autores agradecem à Mota-Engil pela contribuição dada durante a realização deste projecto de investigação.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Årskog, V., Ferreira, R.M., Gjorv, O.E., – “Durability and performance of Norwegian concrete harbor structures”, *Proceedings, CONSEC’04, 4th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*, Seoul, 2004, p. 999-1006.
- [2] Boddy, A. *et al.* – “Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, p. 759-765.
- [3] Rossignolo, J.A.; Agnesini, M.V.C. – “Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 2004, Vol. 26, p. 375-380.
- [4] Cabrera, J.G. – “Design and production of high performance concrete”, *Proceedings of International Conference: Infrastructure Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life Through Better Construction*, Sheffield, 1999, p.1-14.
- [5] Gjorv, O.E. – “Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment”, *Proceedings, Odd E. Gjorv Symposium on Concrete for Marine Structures*, Ed. por P.K. Mehta, CANMET/ACI, 1996, p. 259-279.
- [6] Andrade, C.; Whiting, D. – “A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady accelerated ionic migration”, *Material and Structures*, 1996, RILEM, , Vol. 29, p. 476-484.
- [7] Gjorv, O.E. – “Durability of concrete structures and performance-based quality control”, *Proceedings, International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium – A New Area of Building*, Ed. por Amr S. El-Dieb, Mahmoud M. Reda Taha and Shelly L. Lissel, 2003, Ain Shams University, Cairo, p. 10
- [8] Grube, H.; Lawrence, C.D. – “Permeability of concrete to oxygen”, *RILEM Seminar on Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor exposure*, 1984, Hanover, 68 p.
- [9] Yssorche, M. P *et al.* – “Mesure de la perméabilité à l’air des bétons au moyen d’un perméamètre à charge variable”, *Materials and Structures*, 1995, RILEM, Vol. 28, p. 401.
- [10] Ferreira, R.M. – “Avaliação de ensaios de durabilidade do betão”, Universidade do Minho, tese de mestrado, Guimarães, 2000, 248 p.