

Degradação do betão por reacções sulfáticas internas. Metodologia para o seu diagnóstico e prognóstico.

A. Santos Silva¹, D. Soares¹, L. Matos¹, M. Salta¹, A. Pavoine², L. Divet²

1 - LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa.

2 – LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Physico-chimie des Matériaux, Paris, France

RESUMO

Uma nova patologia tem vindo a revelar-se em algumas obras de arte, essencialmente nos elementos estruturais de maiores dimensões e mais maciços das pontes. Trata-se de um fenómeno expansivo interno, cuja origem é a Reacção Sulfática Interna (RSI) provocada pela formação de etringite retardada (DEF, do inglês *Delayed Ettringite Formation*). Tendo em conta alguns condicionalismos que têm sido impostos à indústria da construção, nomeadamente no que se refere à obtenção de elevadas resistências mecânicas iniciais, tem sido necessário recorrer quer ao emprego de elevadas dosagens de cimento quer à utilização de cimentos mais reactivos. Esta crescente situação propicia, por via do desenvolvimento de elevados calores de hidratação, o provável surgimento, nos próximos anos, de vários casos de estruturas degradadas por RSI.

O diagnóstico desta patologia apresenta alguma dificuldade, devido à complexidade da formação da etringite retardada, dado que a etringite é um mineral que se encontra igualmente nos betões sãos, e também pelo facto dos sintomas correntemente observados nas estruturas serem similares aos da reacção álcalis-sílica (RAS).

Esta comunicação visa apresentar os métodos de diagnóstico e de prognóstico desta patologia, ilustrados com alguns casos de estudo.

PALAVRAS-CHAVE

Delayed Ettringite Formation, Diagnóstico, Degradação, Expansão, Petrografia.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm surgido casos de degradação de estruturas de betão atribuídos à reacção sulfática interna, também conhecida por formação de etringite retardada (Delayed Ettringite Formation ou DEF). A DEF tem afectado elementos de betão de grande massa betonados in-situ [1,2], com composição particularmente sensível e em condições de exposição com contacto frequente com a água. Este fenómeno tem particularmente atingido betões que sofreram tratamentos térmicos relativamente elevados (> 65° C) [3-5] ou quando existem grandes massas de betão e com forte dosagem de cimento. Aliás, os primeiros casos no Mundo de DEF foram descobertos em travessas de caminho-de-ferro que haviam sido sujeitas a tratamento térmico. Em Portugal, a descoberta da DEF e das suas consequências deletérias é recente, com poucos casos ainda recenseados [6], mas

são já suficientemente importantes que justificam a necessidade da sua divulgação e dos meios para o seu diagnóstico/prognóstico.

2. METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO E DE PROGNÓSTICO

O diagnóstico da DEF é uma tarefa que pode ser complicada dado que a etringite é um produto que ocorre normalmente nos betões sãos. Acresce ainda que, os seus sintomas nas estruturas, nomeadamente o aparecimento de fissuração multidireccional, são similares aos de outra reacção expansiva – a RAS.

A metodologia de diagnóstico que é proposta [7] baseia-se numa avaliação que tem em conta, simultaneamente, aspectos microscópicos, próprios do material, e macroscópicos, ligados ao tipo de estrutura e ao grau de exposição (ciclos humedificação-secagem, imersão permanente, etc.). A recolha de informações relativa à composição e aplicação do betão são elementos úteis, pois podem ser relacionados com a patologia desta reacção.

Os ensaios em laboratório realizados sobre carotes de betão retiradas da estrutura, constituem a base indispensável do diagnóstico. Para tal é necessário que se retirem carotes em zonas alteradas e em zonas sãs. Dessa forma é possível dispor dum ponto de referência que possibilite a compreensão da ocorrência do fenómeno em determinadas zonas da estrutura. Por outro lado, é possível que numa zona aparentemente sã a reacção já esteja presente o que possibilita que se possa intervir preventivamente. De assinalar que as amostragens devem ser suficientemente profundas para serem representativas das temperaturas máximas atingidas nos elementos de betão. No caso contrário, o material é susceptível de não evidenciar a presença de produtos de degradação, os quais poderão estar presentes mais no interior.

A microscopia, quer a óptica (MO) como a electrónica de varrimento (MEV), é a única técnica que permite identificar os produtos resultantes da DEF. Esta técnica permite distinguir a etringite normal (figura 1a), resultante da hidratação do cimento, da etringite deletéria de propriedades expansivas (figura 1b). A distinção das formas expansiva e não expansiva da etringite é bastante delicada, no entanto, a observação da morfologia, associada à sua localização, pode dar uma informação pertinente sobre o carácter expansivo da etringite. De facto, a etringite de morfologia acicular em que os cristais estão bem individualizados, corresponde à etringite não expansiva que precipitou nos poros da matriz cimentícia do betão. A etringite expansiva apresenta uma morfologia comprimida e encontra-se essencialmente localizada nas interfaces pasta/agregado.

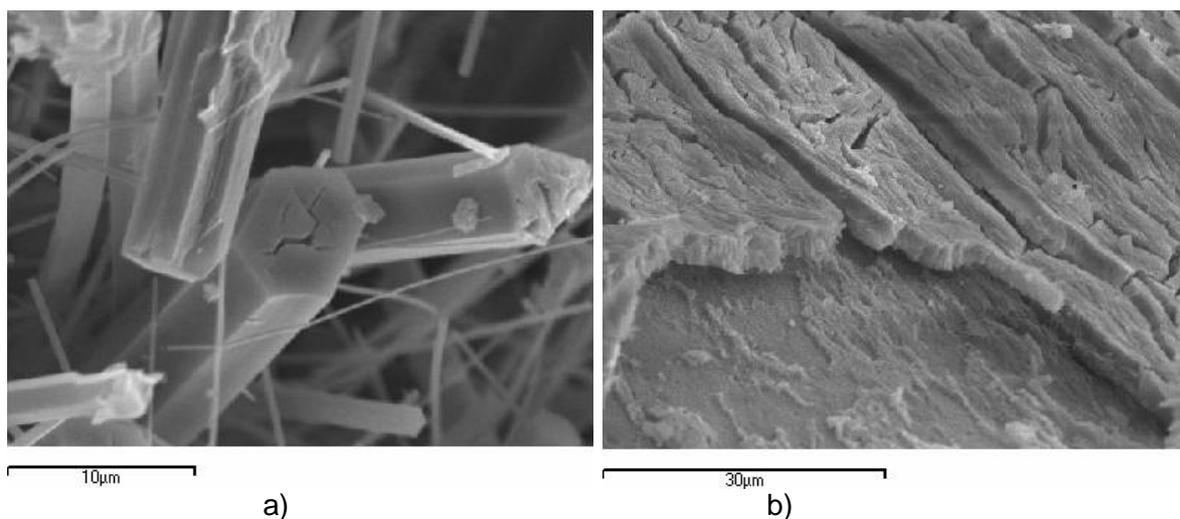


Figura 1 – Aspectos ao MEV de (a) etringite bem cristalizada, de morfologia acicular, não expansiva; e (b) de etringite mal cristalizada, de aspecto comprimido, e expansiva.

Em complemento da observação ao MEV, é necessário proceder-se à caracterização química do betão de forma de determinar a origem dos sulfatos (internos ou externos) implicados na reacção sulfática e verificar a presença de outros factores necessários ao desenvolvimento da DEF, como o teor de álcalis.

A temperatura é o factor primordial no mecanismo da DEF, pelo que a determinação da temperatura máxima atingida pelo betão durante a sua colocação e cura constitui um elemento importante para confirmar o diagnóstico. O LCPC [8] desenvolveu uma metodologia simples de cálculo que permite avaliar se uma determinada peça de betão deve ser considerada como susceptível de vir a desenvolver a DEF. O método baseia-se na determinação de parâmetros relacionados com as propriedades do betão (dosagem dos constituintes – cimento, adições e água; massa volúmica do betão; resistência à compressão do cimento aos 2 e 28 dias; calor de hidratação do cimento; e espessura da peça) e tem também em conta a geometria do elemento de betão em análise.

O prognóstico futuro da evolução da DEF pressupõem ainda a realização de ensaios de expansão residual sobre carotes de betão retiradas da estrutura devendo evitar-se a intercepção com fissuras ou armaduras. O diâmetro recomendado das carotes é de 100 mm. Os provetes para ensaio são equipados com pernos para realização de medidas de expansão (figura 3a), e colocados em condições aceleradoras da reacção durante um ano [9]. Na figura 3b mostram-se os resultados de expansão obtidos para dois provetes correspondentes a diferentes profundidades da mesma carote de betão. Os resultados mostraram maiores expansões para as zonas mais profundas, isto é, as mais atingidas pelas temperaturas elevadas durante a cura.

Além dos ensaios de expansão residual, a marcação e quantificação das fissuras é também uma forma de avaliar o desenvolvimento da DEF na estrutura. No entanto esta avaliação tem que ser efectuada de forma precisa, fiável e reproduzível ao longo do tempo. Existem métodos simples de quantificação da fissuração, como o método do LPC 47 [10], que consistem em medir com um fissurómetro todas as fissuras presentes numa determinada área ao longo do tempo, sendo a fissuração expressa em unidades de comprimento.

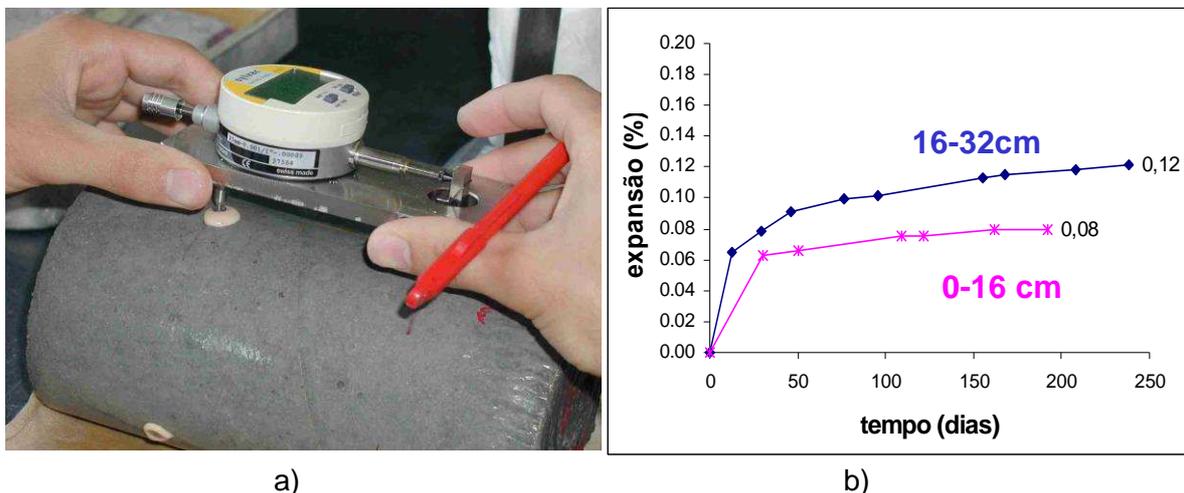


Figura 3 – a) Sistema de medida da expansão residual; b) Resultados de expansão residual duma mesma carote mas correspondente a diferentes profundidades do betão.

3. ESTUDO DE CASOS

Os casos de estudo que se vão apresentar foram estudados pelo LNEC e por razões de confidencialidade vão ser referenciados por uma letra. Tratam-se de três pontes em que as degradações ocorridas afectavam essencialmente as partes mais maciças da estrutura.

3.1 Ponte A

Esta ponte foi construída no início dos anos 90 e encontra-se exposta a ambiente marítimo. Na sua construção foram utilizados vários elementos pré-fabricados em betão pré-esforçado e armado. Apesar duma grande supervisão durante a construção, passados 10 anos após a sua conclusão detectaram-se fissuras em pilares betonados in-situ, com um padrão de fissuração que é normalmente típico da ocorrência de reacções expansivas internas (figura 4a). Apesar do ambiente agressivo a que se encontra exposto, o betão não apresentava grandes problemas relacionados com a corrosão das armaduras. O diagnóstico revelou como principal causa da fissuração a ocorrência de DEF (figura 4b). Essa situação foi atribuída a uma forte dosagem de cimento ($> 400 \text{ kg/m}^3$) e à grande massa de betão nas zonas atingidas (maciços de encabeçamento), que foi ainda agravada pela utilização de agregados reactivos aos álcalis. Os ensaios de prognóstico efectuados revelaram existir ainda potencial para a expansão do betão por DEF.

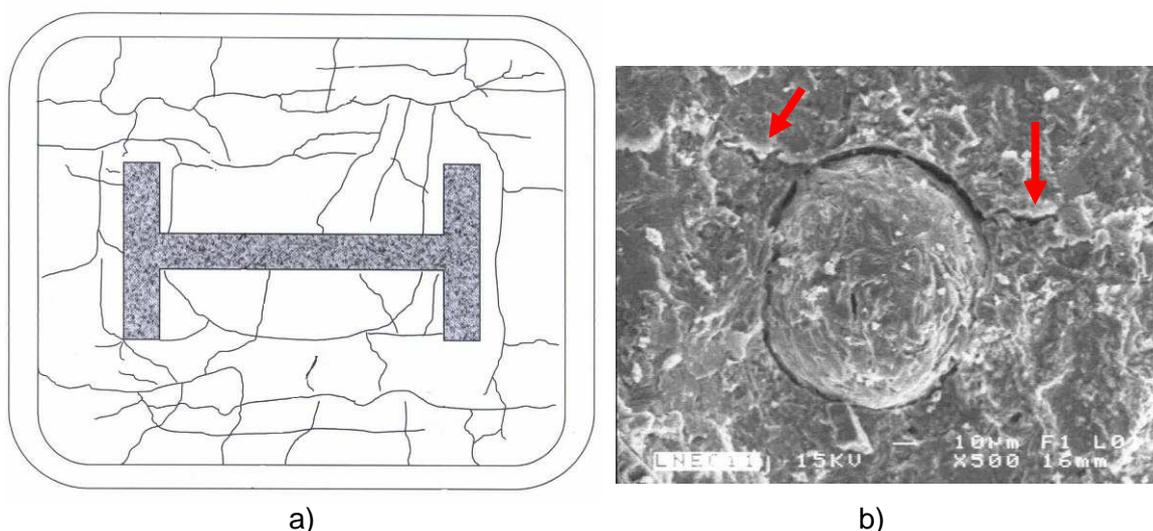


Figura 4 – a) Mapeamento das fissuras no elemento afectado por DEF; b) Imagem obtida ao MEV que mostra um poro no betão totalmente preenchido por DEF e onde é também visível microfissuras que irradiam do poro em resultado da expansão.

3.2 Ponte B

A ponte de betão armado foi construída em finais dos anos 70 e situa-se na região Centro de Portugal. Com excepção dos pilares extremos, os pilares restantes encontram-se dentro de água em alguns casos imersos algumas dezenas de metros. A fissuração que foi detectada atinge sobretudo os pilares e seus maciços dentro de água. Importa salientar que a água, a par da alcalinidade elevada do betão, associado aos ciclos de molhagem-secagem, é um dos factores que mais contribui para o mecanismo acelerador da DEF.

Neste caso com a simples observação macroscópica das carotes extraídas nas zonas mais fissuradas da estrutura era evidente que o betão se encontraria afectado por reacções expansivas internas (figura 5a), já que eram evidentes produtos brancos a preencher poros e interfaces agregado-pasta. Os ensaios de diagnóstico vieram confirmar que além da DEF existia também RAS (figura 5b), que neste caso tinha sido devida ao emprego de agregados quartzíticos reactivos aos álcalis. Os ensaios de prognóstico indicaram existir potencial expansivo tanto para a RAS como para a DEF, e quer nas zonas já fissuradas como em zonas não fissuradas da estrutura.

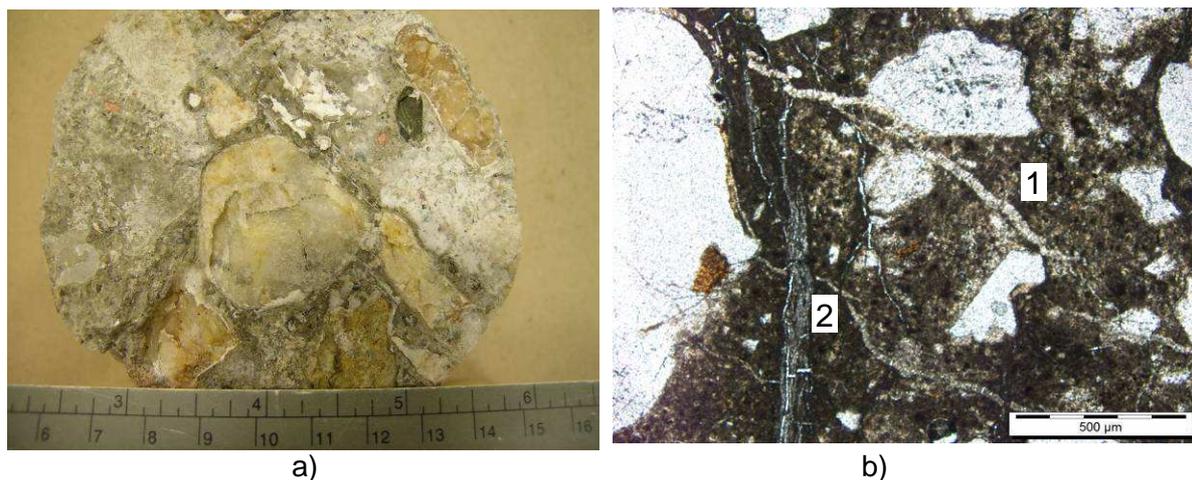


Figura 5 – a) Pormenor da observação duma carote em que é bem visível a presença de produtos brancos em pequenos poros e nas interfaces agregado/pasta; b) Imagem obtida ao MO duma lâmina delgada de betão que mostra a presença de fissuras na pasta, algumas com cerca de 50 µm, preenchidas por produtos da DEF (1) e da RAS (2).

3.3 Ponte C

Esta ponte de betão armado foi construída entre 1994 e 1997 e situa-se na região Norte de Portugal. Na confecção do betão foram utilizados agregados graníticos da região com uma forte dosagem de cimento ($>400 \text{ kg/m}^3$).

Após 10 anos em serviço foi detectada a presença de fissuras em alguns dos pilares e seus maciços, apresentando um padrão que fez suspeitar da ocorrência de reacções expansivas internas – figura 6a.

Os ensaios de diagnóstico vieram mostrar a presença de RAS, devido ao emprego de agregados graníticos reactivos aos álcalis, e de DEF. A DEF terá estado associada uma vez mais à forte dosagem de ligante e há grande espessura das peças de betão afectadas. De salientar que a combinação da RAS com a DEF é muito comum e resulta da instabilidade que a etringite primária apresenta, isto é aquela que resulta da hidratação normal do cimento, em betões com teor de álcalis elevado. Nessas condições os iões sulfato não se combinam e ficam disponíveis na solução intersticial do betão, podendo em determinadas condições vir a precipitar como etringite retardada.

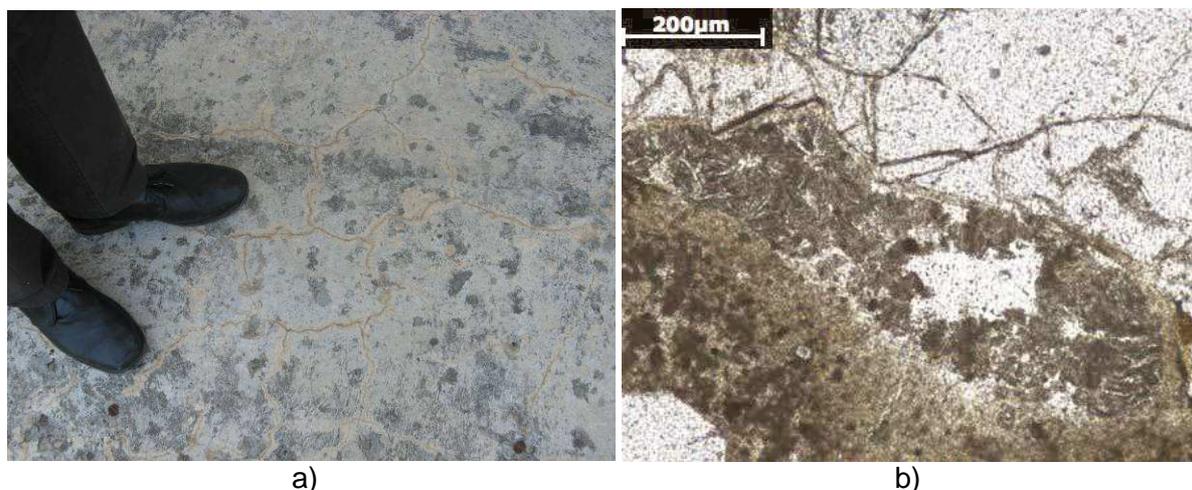


Figura 6 – a) Pormenor do padrão de fissuração no maciço dum pilar da ponte; b) Imagem obtida ao MO duma lâmina delgada de betão que mostra um poro de morfologia irregular junto a uma interface agregado/pasta que se encontra parcialmente preenchido por DEF.

Os ensaios de prognóstico da DEF indicaram que existe potencial para a continuação da reacção expansiva, e que esse potencial é maior nas zonas onde há maior espessura de betão. Este dado é de extrema importância para a hierarquização e selecção dos meios de intervenção.

4. CONCLUSÕES

A DEF é um problema de durabilidade das estruturas de betão que obriga à adopção de metodologias apropriadas de diagnóstico e de prognóstico. Durante a observação de uma estrutura não evidencia sintomas que sejam exclusivamente característicos da sua presença, dado que o tipo de fissuração que provoca é muito idêntico à da reacção álcalis-sílica.

Neste artigo apresenta-se uma metodologia de diagnóstico e de prognóstico que permite não só explicar as origens, como as causas responsáveis para as degradações observadas na estrutura. Possibilita ainda a determinação da evolução do fenómeno e das suas consequências para a estrutura.

Os casos de estudo apresentados evidenciam que esta patologia afecta essencialmente partes maciças das estruturas e betões com elevada dosagem de cimento. Nos três casos de estudo apresentados nunca foi utilizado cimento com adições tipo II. Actualmente já se sabe que uma das medidas mitigadoras da DEF é o emprego de adições tipo II, em quantidade suficiente, em substituição do cimento portland.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o apoio financeiro no âmbito do projecto EXREACT (Mitigação de reacções deletérias expansivas internas em estruturas de betão, PTDC/CTM/65243/2006), e ao projecto DURATINET (Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Área Network) do Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013, co-financiado pelo FEDER.

4. REFERÊNCIAS

- [1] - Hobbs D.W. – “*Expansion and cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation*”, In Proceedings of a ‘technical Session – Ettringite: The sometimes host of destruction (Editor: Bernard Elvin), American Concrete Institute, Seattle, Washington, SP-177, 1999, p. 151-181.
- [2] - Quillin – “Delayed ettringite formation: in-situ concrete”, BRE Report, Centre for Concrete Construction, 2001, p. 1-8.
- [3] - Heinz D., Ludwig U. – “*Mechanism of subsequent ettringite formation in mortars and concretes after heat treatment*”, Proceedings of the 8th International Congress on the chemistry of cement, Vol. V, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, p. 1-6.
- [4] - Heinz D., Ludwig U. – “*Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment*”, American Concr. Inst., SP 100-105, Detroit, 1987, pp. 2059-2071.
- [5] - Heinz D., *et al.* – “*Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes*”, Concrete Precasting Plant and Technology, Issue 11/1989, p. 56-61.
- [6] - Santos Silva, A., Gonçalves, A.F., Pipa, M. – “*Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF*”, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 1240-1249.
- [7] - Divet, L., Pavoine, A., Clement, J.L., Santos Silva, A., “*As reacções expansivas*

internas no betão devidas à formação de etringite retardada. Métodos de diagnóstico e de prognóstico”, Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL 2004, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, PORTO, 2004, Volume 1, p. 83-90.

- [8] - *“Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne”, Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2007, p. 60.*
- [9] - *“Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique-Essai de performance”, Projet de méthode d'essai des LPC n° 59, 2003, p.17.*
- [10] - *“Détermination de l'indice de fissuration d'un parement en béton”, Méthode d'essai LCPC n°47, 1997.*