

IMPORTÂNCIA, OCORRÊNCIA EM PORTUGAL E MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DAS REACÇÕES ÁLCALI-AGREGADO EM BETÕES. CONTRIBUIÇÃO DOS CONHECIMENTOS GEOLÓGICOS

Relevance and evaluation methods of alkali-aggregate reactions in concrete and their occurrence in Portugal.

The contribution of geologic knowledge

HENRIQUE S. SILVA*

J. DELGADO RODRIGUES**

RESUMO — As reacções álcali-agregado encontram-se com relativa frequência nos betões de ligantes hidráulicos cujos efeitos podem ser muito prejudiciais para as obras com eles construídas. Este tipo de reacções desencadeia-se entre agregados reactivos (siliciosos ou dolomíticos) e os álcalis dos cimentos ou de outros agregados, e é propiciado pelo meio extremamente básico reinante no seio do betão. Nesse contexto, a caracterização adequada das formações geológicas, fonte de agregados, pode dar um importante contributo para os processos de diagnóstico e de prognóstico deste tipo de deterioração dos betões, nomeadamente porque dispõe de ferramentas importantes para identificação das espécies potencialmente reactivas. No presente artigo, referem-se alguns aspectos relacionados com a fenomenologia da alteração, com as formações geológicas potencialmente fornecedoras de agregados reactivos e com os métodos mais usuais para a sua identificação petrográfica e mineralógica. Estes aspectos são ilustrados com resultados de alguns casos estudados.

SYNOPSIS — Alkali-aggregate reactions may be considered one of the more deleterious causes of concrete structures degradation. Their kinetics depend on the reactivity of natural aggregates containing species of reactive aggregates (silicic or dolomitic ones) and on the alkali content of the cement matrix and of the aggregates themselves. The occurrence of such reactions may act as a severe limitation of the structures performance, reason why an adequate evaluation of the geologic materials is highly recommendable for defining the appropriate concrete mixes where those reactions might be avoided and for identifying the causes, the actual effects and the predictable behaviour of structures. This paper deals with some geological aspects, characteristic of Portuguese aggregates, and presents some information on the petrographic and mineralogic identification techniques which are illustrated with results obtained in some studied cases.

* Geólogo, Assistente de Investigação, LNEC

** Geólogo, Investigador-Coordenador, LNEC

1 — INTRODUÇÃO

O betão é constituído basicamente por uma mistura endurecida de partículas rochosas (os agregados), ligante (natural ou artificial) e água:

Nos betões com ligantes naturais de natureza argilosa, margosa, etc., e com ligantes artificiais como a cal hidráulica ou o cimento Portland (normal ou modificado), os componentes são directa ou indirectamente derivados de formações rochosas, sendo admissível concluir que os aspectos geológicos, *sensum latum*, desempenham um papel condicionador das características finais do produto.

Todos os materiais utilizados, de uma forma ou de outra, apresentam características resultantes da evolução geológica e determinam as propriedades do betão e o seu comportamento face às solicitações ambientais e estruturais a que vai estar sujeito.

Em termos genéricos, o betão pode equiparar-se a uma rocha de composição química e petrográfica variando entre limites relativamente amplos, embora com componentes bem definidos. Como todas as rochas, também o betão sofre alteração com o passar do tempo, sendo a natureza dessa alteração e taxas variável consoante a composição, propriedades e condições de utilização do betão.

Entre as principais causas da deterioração do betão importa aqui analisar as reacções químicas entre os constituintes ou entre estes e o ambiente. Destas reacções resultam geralmente modificações nas propriedades do betão (mecânicas e hidráulicas) e na sua reologia que acarretam efeitos estruturais e consequências a nível funcional das obras.

As reacções químicas entre os constituintes do betão, nomeadamente as reacções álcali-agregado (álcali-sílica e álcali-carbonato), constituem algumas das principais causas de deterioração das estruturas [1]. Na generalidade, trata-se de reacções de que resultam expansões que conduzem ao desenvolvimento de tensões elevadas e fissuração, sendo frequentemente acompanhadas do aparecimento de exsudações à superfície do betão.

No entanto, é importante salientar que nem sempre as reacções álcali-agregado se desenvolvem isoladamente de outros tipos de fenómenos de alteração química, de que se destacam como mais significativos os relacionados com as reacções sulfato-alumina-magnésio (processos conducentes à formação de sulfoaluminatos de cálcio expansivos, como por exemplo a etringite, ou à desdolomitização de agregados dolomíticos) e com a dissolução do hidróxido de cálcio. É mesmo frequente observarem-se situações em que ocorrem simultaneamente reacções álcali-agregado, reacções sulfato-alumina, dissolução de hidróxido de cálcio e carbonatação do betão, embora com importâncias relativas distintas [2].

Nos números seguintes referem-se alguns aspectos relacionados com o desenvolvimento das reacções álcali-agregado e com a influência da natureza dos materiais; faz-se uma breve apreciação sobre as possibilidades da sua ocorrência em Portugal e apresentam-se alguns métodos de identificação e análise deste tipo de fenómenos que são ilustrados com resultados de alguns casos estudados.

2 — CONDICIONAMENTO GEOLÓGICO

2.1 — Desenvolvimento das reacções

As reacções álcali-agregado tornam-se possíveis mercê da ocorrência simultânea de um conjunto de factores, de que se destacam, pela sua importância:

- Para as reacções álcali-sílica: sílica potencialmente reactiva, álcalis (geralmente sódio e potássio) e meio extremamente básico.
- Para as reacções álcali-carbonato: álcalis, carbonato de magnésio (geralmente dolomite ou calcário dolomítico) e meio básico.

Para o desenvolvimento de qualquer destas reacções torna-se indispensável a presença de água livre em teores que, regra geral, deverão ser superiores a 80% do grau de saturação.

Na Fig. 1 indica-se esquematicamente a forma como estas reacções se desenvolvem no seio do betão.

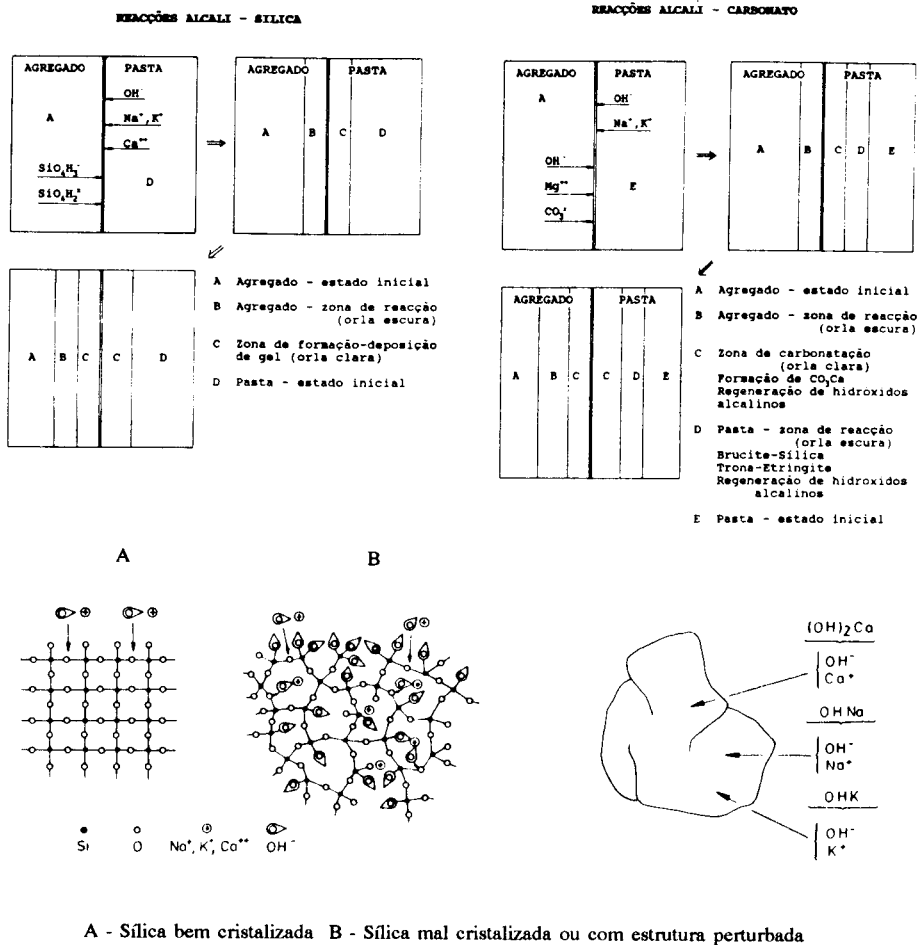
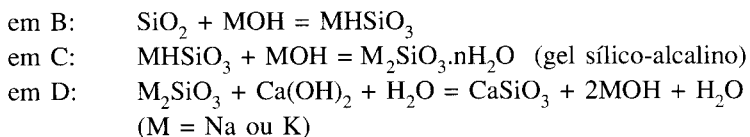


Fig. 1 — Representação esquemática das reacções álcali-agregado no seio do betão e do ataque a formas de sílica por soluções alcalinas

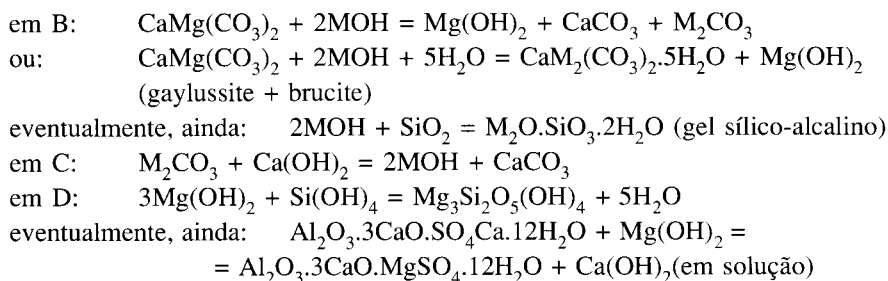
As principais reacções químicas que se processam ao longo das sucessivas fases de desenvolvimento dos processos que podem conduzir à desagregação do betão são esquematizadas como se indica [3, 4, 5, 6]:

a) reacções álcali-sílica



A expansão resulta da formação e deposição do gel sílico-alcálico no seio do betão (na pasta, no agregado ou na interface entre ambos).

b) reacções álcali-carbonato



A expansão neste tipo de reacções deve-se à formação e deposição, no seio do betão, de carbonatos calco-alcálicos, de gel sílico-alcálico e, eventualmente, de gaylussite.

2.2 — Os materiais

Os minerais ou rochas mais usuais que podem fornecer iões (de silício e alcalinos) necessários às reacções álcali-sílica são os que constam do Quadro 1 [7, 8, 9]. Em Portugal, ocorrem formações geológicas em cuja constituição entram alguns minerais e rochas que, pela sua natureza, podem ser considerados potenciais fornecedores dos componentes essenciais às reacções álcali-agregado, podendo constituir, por isso, fonte de agregados potencialmente reactivos.

Quanto às formas de sílica potencialmente reactivas com os álcalis, ocorrem com mais frequência o quartzo cataclástico (com forte extinção ondulante), algumas variedades de rochas com calcedónia (liditos, metaliditos e ftanitos) e, mais raramente, quartzo chértico, cherte e sílex. O quartzo cataclástico anda associado aos granitos, sobretudo calco-alcálicos, aos granodioritos, aos quartzitos, a rochas gnáissicas, a alguns metapelitos (xistosos, grauvacóides e corneânicos) e a areias aluvionares. A sua característica reactiva é reconhecida pela presença da extinção ondulante quando observadas ao microscópio petrográfico. As formas de calcedónia e os chertes ocorrem com maior frequência associados a formações xistosas (sobretudo xistos grafitosos e ampelitos) e quartzíticas, em silcretes e em areias aluvionares. O sílex ocorre com

QUADRO I

Propriedades dos solos

Principais minerais e rochas potencialmente reactivos.

COM SILICA POTENCIALMENTE REACTIVA			
MINERAIS		ROCHAS	
Opala		Jaspe	
Calcedónia		Lidito	(Opala, Calcedónia, Cherte)
Silex		Ftanito	
Cherte		Diatomito	
Quartzo tectonizado		Xisto silicioso	
Tridimite		Filito	
Cristobalite		Grauvaque	>30% quartzo tectonizado
Obsidiana		Corneana	(Cherte, Silex)
		Quartzito	
		Granitoide	
		Vulcanitos	(Riol., Dac., Andes, Bas.)
		Calcário	Siliciosos
		Dolomito	(Silex, Cherte)
POTENCIALMENTE FORNECEDORES DE ALCALIS			
MINERAIS		ROCHAS	
Sanidina (K)		Granito	(alcalino, hiperalcalino)
Ortoclase (K)		Riolito	
Microclina (K)		Sienito	
Leucite (K)		Traquito	
Albite (Na)		Corneana feldspática	
Oligoclase (Na)		Leptinito	
Nefelina (Na)		Arcose	
Sodalite (Na)			

<div>AGREGADO (feldspato)</div> <div> Na^+ K^+ </div> <div> $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2^+$ $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_3^+$ </div>	<div>PASTA OH^-</div> <div> Ca^{++} H^+ </div>	<div>Troca iónica</div> <div>Hidrólise</div>	<div>Silicatos</div>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------

mais frequência no seio dos calcários compactos (nomeadamente nas formações do Jurássico superior e do Cretácico) e em zonas de interface com algumas formações vulcânicas (normalmente basálticas).

Os cimentos, em cuja constituição entra sódio e potássio derivados das rochas de que é fabricado (calcário, margas, etc.), podem constituir uma das principais fontes de álcalis para as reacções. É geralmente aceite [3, 7] que o teor em álcalis do cimento não deverá ultrapassar 0,6 % ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$), para além do qual terão que ser tomadas medidas para adequar a composição do betão a essa situação (por exemplo, inadmissibilidade de agregados reactivos ou utilização de aditivos).

Os materiais rochosos para agregados em cuja constituição existe sódio ou potássio podem, em certas circunstâncias, fornecer estes iões para as reacções, sendo as formações pertencentes

à família dos granitos, dos sienitos e dos ectinitos (por exemplo, os xistos e grauvaques do Carbónico Alentejano) aquelas onde a probabilidade da sua ocorrência é maior. São, portanto, as rochas ígneas e metamórficas que podem desempenhar um papel mais relevante no suprimento de iões alcalinos. A alteração natural das rochas torna mais fácil a libertação dos iões, pelo que nalgumas delas é significativamente incrementado o potencial reactivo dos agregados quando fabricados com materiais alterados. Nos granitos, por exemplo, quer a sílica quer os álcalis são tornados mais móveis com a alteração, tendo sido descritos casos em que as reacções expansivas tiveram esta origem [10].

A água pode, em certas circunstâncias, constituir também fonte de iões alcalinos, particularmente as águas da chuva junto às orlas marítimas, ou águas de circulação superficial ou subterrânea, sobretudo em contacto com formações evaporíticas (por exemplo, certas zonas das Bacias Mezo-Cenozóicas Ocidental e Algarvia).

Do que se referiu sobre a potencialidade reactiva aos álcalis dos diversos tipos de agregados, é natural que, numa primeira análise, a observação da Carta Geológica de Portugal forneça indicações globais quanto à distribuição das formações geológicas indicadas como sendo potencialmente portadoras das condições propiciadoras ao desenvolvimento de reacções álcali-agregado.

Assim, as zonas onde a frequência de ocorrência de formações geológicas com formas de sílica potencialmente reactiva é mais elevada distribuem-se predominantemente pelo Minho e Trás-os-Montes, Beira Alta e Alentejo. Aí se encontram rochas graníticas (sobretudo calco-alcalinas), quartzíticas e xisto-grauváquicas. Com menor frequência de ocorrência, encontram-se as formações sedimentares (calcários com sílex, silcretes, diatomitos e aluviões com metapelitos, quartzo cataclástico e calcedónico, etc.) que se distribuem pelas Beiras, Estremadura e Alentejo, com maior incidência na Beira Litoral, na Beira Baixa, nas bacias do Tejo e do Sado e no litoral Algarvio.

Quanto aos álcalis, as formações potencialmente fornecedoras encontram-se com maior frequência no Minho, no Douro Litoral, na Beira Alta e no Baixo Alentejo. Com excepção do Baixo Alentejo, onde predominam os xistos e grauvaques, os sienitos e algumas rochas vulcânicas, é de esperar que a maior contribuição possa provir sobretudo de rochas da família dos granitos.

2.3 — Os efeitos da alteração

As reacções químicas assinaladas conduzem à formação de produtos sílico-alcalinos (inicialmente geles amorfos que podem evoluir ou não para estados subcristalinos ou cristalinos do tipo zeólito), que possuem na sua estrutura mineralógica elevado número de cadeias livres disponíveis para absorver grande número de moléculas de água e expandir.

A hidratação destes produtos origina geralmente pressões expansivas e osmóticas cuja grandeza varia em função da sua viscosidade, mas que podem atingir valores da ordem de 14 MPa [4]. Em consequência, podem gerar-se efeitos estruturais, tais como modificação dos estados de tensão, deformação e fissuração. São característicos os estilos de fissuração aparentes à superfície das obras, tais como o poligonal (tipo “craquelet”) ou o orientado, cujo aparecimento é consequência da natureza dos estados de tensão estrutural que lhes deu origem.

3 — METODOLOGIAS DE ESTUDO. EXEMPLOS

3.1 — Métodos de análise

Os estudos relativos ao desenvolvimento de deteriorações do betão devidas a reacções álcali-agregado situam-se em dois domínios: o do prognóstico e o do diagnóstico. Embora as atitudes perante estes domínios devam ser diferentes, em ambos se recorre a ensaios e técnicas semelhantes.

O prognóstico aplica-se a dois tipos de situações:

a) a obra ainda não existe e pretende-se estudar os materiais a utilizar, com recurso, por vezes, à confecção de betões e argamassas experimentais;

b) a obra já existe e pretende-se estudar a potencialidade reactiva (total ou residual) dos betões utilizados.

Por sua vez, o diagnóstico aplica-se a situações em que a obra já existe e o betão está afectado por deteriorações cuja identificação é indispensável para encontrar as melhores soluções para resolver o problema.

Em qualquer destas situações, pode-se recorrer a um conjunto de procedimentos de ensaio e de análise, especificados em normas e regras instituídas (Normas e Especificações ASTM, BS, do LCPC, etc.), e definir ou adaptar procedimentos específicos adequados a problemas não enquadráveis nos procedimentos normalizados.

Entre os métodos seguidos para o estudo deste tipo de deterioração do betão, quer a nível do prognóstico quer do diagnóstico, salientam-se as análises petrográficas, mineralógicas e químicas consagradas nos estudos de materiais rochosos naturais ou ligeiramente modificadas para ir ao encontro de especificidades próprias.

Para o estudo petrográfico do betão ou dos agregados, para além das rotinas definidas pelo petrógrafo, influenciadas pela sua experiência pessoal, utilizam-se as técnicas de identificação mineralógica geralmente seguidas em microscopia petrográfica [11]. Recorre-se, para o efeito, ao uso de um microscópio petrográfico de transmissão ou de reflexão, em que se observam lâminas de betão geralmente com espessuras que variam entre 40 e 20 micron. Entre os parâmetros petrográficos com mais significado para a identificação e caracterização mineralógica citam-se os índices de refração, o tipo e ângulo de extinção, o sinal de alongamento, o carácter do sinal óptico e a birrefringência. Habitualmente, os estudos petrográficos e mineralógicos precedem os estudos de natureza físico-química. Estes são hoje correntemente efectuados com recurso a diversos métodos, entre os quais se referem os difractométricos, a microscopia electrónica e as microanálises por microsonda electrónica ou por dispersão de energia de raios-x, por exemplo [12, 13].

Porém, a observação prévia da deterioração do betão “in situ” ou em amostras de mão pode constituir um passo importante no sentido do diagnóstico, por um lado, e da definição do plano de recolha de amostras para estudos mais completos, por outro. O recurso a métodos e equipamentos ligeiros de fluorescência por excitação com radiação ultra-violeta permite alcançar esse objectivo. Os minerais de natureza zeolítica ou os geles contendo iões alcalinos revelam fluorescência intensa que permite reconhecer a sua existência.

3.2 — Exemplos

Existem em Portugal estruturas em betão afectadas por deteriorações resultantes de reacções álcali-agregado que têm vindo a ser identificadas e estudadas. Os exemplos que a seguir se apresentam não têm como objectivo o tratamento sistemático e completo das situações detectadas, mas tão somente ilustrar as potencialidades de algumas técnicas utilizadas no seu estudo.

Na fotografia da Fig. 2 mostra-se uma secção de betão de uma estrutura hidráulica afectado por reacção álcali-silica. Os agregados são de vários tipos: os de maior dimensão são predominantemente de quartzito extraído de formações ordovícicas, em que alguns grãos de quartzo apresentam forte extinção ondulante e os de menor são de quartzo, metapelitos (sobretudo xisto e grauvaque), feldspatos e micas extraídos de depósitos aluvionares do rio Alva, no centro de Portugal. Trata-se de uma barragem com 45 anos que veio a revelar um comportamento estrutural que indiciava fenómenos de expansão do betão, os quais foram identificados como resultantes de reacções álcali-silica. Na fotografia observa-se parte de um agregado silicioso (quartzo criptocristalino) profundamente alterado, com microfissuras evidentes e empastelamentos de gel, orlado por um anel de gel sílico-alcalino; no interior do anel ocorrem fissuras de retracção preenchidas por deposições secundárias de gel. Os agregados vizinhos denotam idênticos sinais de alteração.

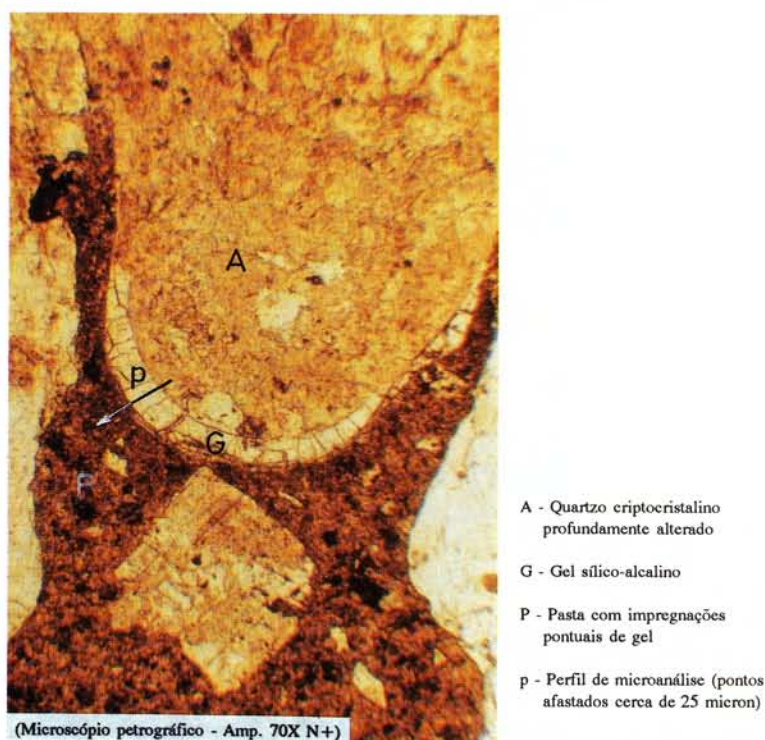
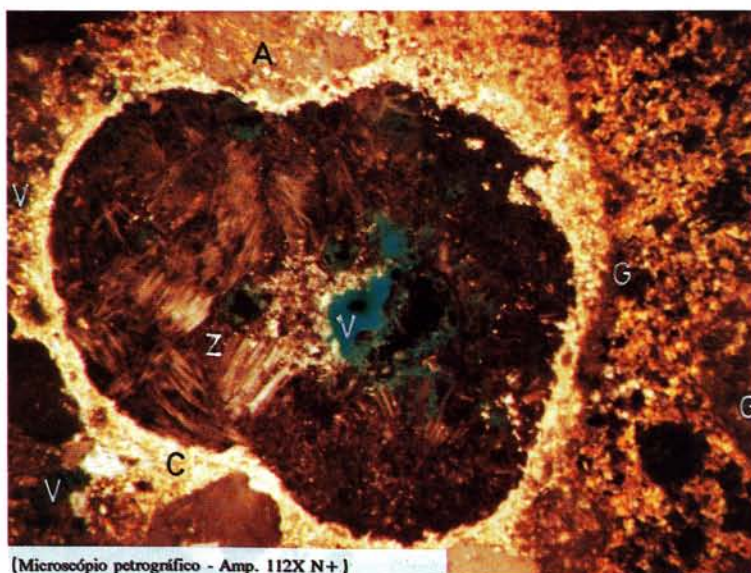


Fig. 2 — Microfotografia de uma amostra de betão com agregados profundamente alterados e deposições de gel sílico-alcalino

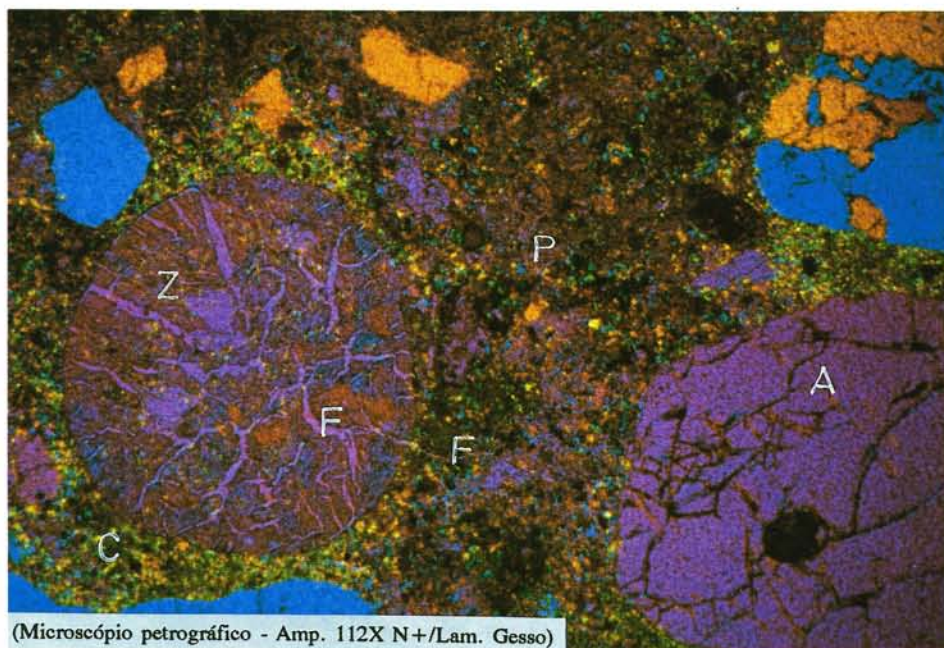
A utilização de substâncias impregnantes coloridas pode constituir um precioso auxiliar para a identificação da fissuração e dos vazios (poros ou outros resultantes da desagregação dos produtos friáveis da reacção), contribuindo também para a determinação de alguns parâmetros físicos do betão (índice de vazios, relação a/c, etc.). Estes aspectos estão bem patentes na fotografia da Fig. 3. Nesta imagem pode observar-se: um poro da pasta preenchido com produto de reacção álcali-sílica, em que são bem visíveis os cristais de um zeólito do grupo da Heulandite, um alumino-silicato calco-alcálico; uma orla exterior de pasta carbonatada que faz a transição para a pasta onde ocorrem zonas contaminadas com gel sílico-alcálico; e vazios, quer no interior do poro quer na pasta, preenchidos com resina verde.



- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| A - Agregado feldspático alterado | G - Gel disperso na pasta (produto de reacção) |
| C - Orla de pasta carbonatada | V - Vazios preenchidos com resina verde |
| Z - Zeólito (produto de reacção) | |

Fig. 3 — Microfotografia de uma amostra de betão impregnada com resina corada, evidenciando um poro preenchido por zeólito

Tratando-se o gel sílico-alcálico de um produto amorfo e frequentemente isotrópico, torna-se possível o seu rápido reconhecimento com recurso também a técnicas polarográficas utilizadas em observação com microscópio petrográfico. Na fotografia da Fig. 4, em que se provocou um atraso de um comprimento de onda nos raios luminosos, verifica-se um realce das zonas isotrópicas correspondentes ao produto da reacção (gel amorfo e zeólito) que adquirem, assim, tonalidades de vermelho intenso. Note-se o preenchimento de um poro circular com gel sílico-alcálico, em cujas fissuras de retracção se depositou gel de uma fase posterior, o qual se encontra ligado por uma microfissura que atravessa a pasta a um agregado de quartzo criptocristalino, bastante alterado. A pasta encontra-se profundamente contaminada com gel.



A - Quartzo criptocristalino alterado

F - Fissura entre o poro e o agregado

C - Orla de pasta carbonatada

P - Pasta com fortes impregnações de gel

Z - Gel e zeólito

Fig. 4 — Microfotografia de uma amostra de betão evidenciando um poro preenchido por gel onde são nítidas duas fases de deposição: a 1.^a corresponde a produto que entretanto atingiu estrutura cristalina e a 2.^a corresponde a gel mais recente, ainda amorfo, depositado nas fendas de retracção do primeiro

No gráfico da Fig. 5 pode-se observar o resultado de microanálise, efectuada com microsonda electrónica, do perfil indicado na Fig. 2. Nele se mostra a distribuição dos álcalis, do cálcio e da sílica. É nítida a contaminação do agregado quartzítico com iões cálcio (orla de reacção) e a zona de maior concentração do gel sílico-alcálico (orla de deposição).

Como se referiu no número anterior, a utilização “in situ” de métodos de observação expeditos podem ser muito úteis para o diagnóstico. A fotografia da Fig. 6 dá conta da utilização da fluorescência com radiação ultra-violeta em amostras extraídas de uma outra obra cujo betão está também afectado por reacção álcali-sílica. São nítidas as zonas alteradas, cuja fluorescência mais intensa corresponde a concentrações de gel sílico-alcálico. São perceptíveis duas situações distintas: A) em que a pasta está menos afectada e ocorrem alguns agregados mais ou menos alterados; e B) em que a pasta e os agregados estão uniforme e fortemente afectados. Os constituintes do betão são agregados quartzíticos, quartzo e quartzo calcedónico (ftanita), partículas de metapelitos, de feldspatos alcalinos e de biotite, ligados por cimento Portland. A deterioração do betão, de que resultou expansão e fissuração intensa, originou alterações das propriedades mecânicas e hidráulicas da obra, com importantes consequências ao nível do seu comportamento.

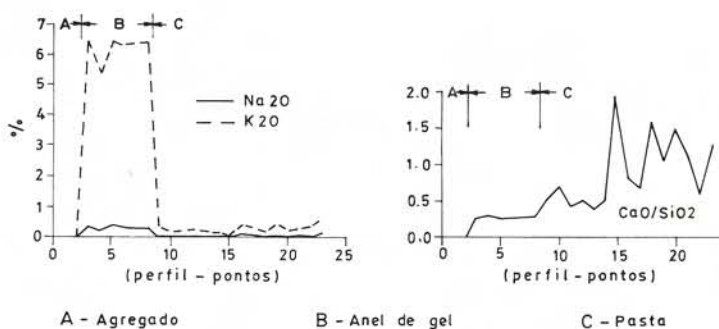
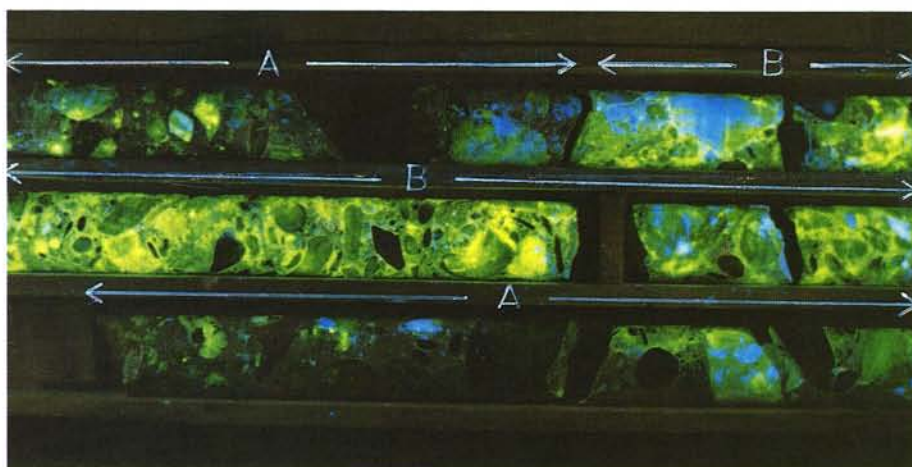


Fig. 5 — Gráfico de distribuição dos álcalis e da relação cálcio-silica ao longo do perfil indicado na Fig. 2



A - Zona de média alteração dispersa

B - Zona de profunda alteração uniforme

Fig. 6 — Fotografia de ensaio de fluorescência em amostras de betão extraídas do corpo da obra por sondagem

4 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

O que se expôs anteriormente permite salientar três ordens de questões:

- 1 — Existem em Portugal formações rochosas que podem constituir fontes de agregados com potencialidade reactiva no domínio das reacções álcali-agregado, pelo que o aparecimento deste tipo de deterioração é quase uma consequência natural dessa existência. A sua adequada caracterização geológica deverá, por isso, constituir um requisito essencial, especialmente quando se trate de obras sujeitas a ambientes propiciadores do desenvolvimento deste tipo de deterioração, cujas exigências funcionais a não tolerem.

- 2 — Algumas estruturas de betão já reconhecidas estão afectadas por esse tipo de deterioração e é possível que a prazo outras venham a ser identificadas como tendo patologias dessa natureza.
- 3 — Com os conhecimentos técnico-científicos e tecnologia disponível para o estudo destes fenómenos, é possível o acompanhamento e observação dessas situações, por forma a actuar em tempo oportuno e minimizar as consequências da degradação.

AGRADECIMENTO

À Direcção-Geral dos Recursos Naturais (DGRN), à Electricidade de Portugal (EDP), ao Laboratório da Direcção-Geral de Geologia e Minas (LDGGM) e ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Departamentos de Barragens, Geotecnia e Materiais de Construção) agradecem-se todos os apoios facultados para os trabalhos de investigação desenvolvidos e em curso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRAGA REIS, M.O. — *Implicação das reacções álcali-agregado na durabilidade das estruturas de betão*. 2.^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa, 1990.
- [2] IDORN, G.M. — *Durability of concrete structures in Denmark. A study of field behaviour and microscopic features*. PhD Thesis, Copenhagen, 1967.
- [3] COUTINHO, A. S. — *O fabrico e propriedades do betão*. LNEC, Lisboa, 1973.
- [4] FRENCH, W.J. — *Reactions between aggregates and cement paste — an interpretation of the pessimum*, in *Stability of Concrete Aggregates*, Blackwell Sc. Publ., Londres, 1980.
- [5] POOLE, A. B. e SOTIROPOULOS, P. — *Reactions between dolomitic aggregate and alkali pore fluids in concrete*, in *Stability of Concrete Aggregates*, Blackwell Sc. Publ., Londres, 1980.
- [6] DENT GLASSER, L. S. e KATAOKA, N. — *The chemistry of alkali-aggregate reaction*, *Cement and Concrete Research*, vol. 11, U.S.A., 1981.
- [7] ICOLD — *Alkali-aggregate reaction in concrete dams. C.M.C.D., ICOLD, Paris*, 1989.
- [8] POOLE, A.B. — *Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion*. The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Londres, 1992.
- [9] BAOGUO, M. e KEHAO, C. — *On magnesite aggregate reaction and ways for improvement*. The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Londres, 1992.
- [10] COUTINHO, A. S. — *Influence de la nature minéralogique de l'agrégat sur la décomposition des mortiers et bétons de ciment Portland exposés à l'eau de mer*. Cahiers de la Recherche n° 27, Colloque RILEM, Palermo, 1965.
- [11] KERR, P.F. — *Optical Mineralogy*. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., Londres, 1959.
- [12] BRAGA REIS, M. O. — *Análise por difracção de raios-x*. ITMC 4, LNEC, Lisboa, 1986.
- [13] RODRIGUES, M. P. — *Caracterização físico-química de superfícies*. ITMC 7, LNEC, Lisboa, 1989.