Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE DA DETERIORAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO

F. L. COSTA
Engenheiro Civil, Mestrando
UFRGS
Rio Grande do Sul;Brasil
felmcosta@gmail.com

A. S. TORRES
Professora
UFPel
Rio Grande do Sul;Brasil
arielatorres@gmail.com

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo a análise da reação álcali-agregado com o estudo de caso de um Píer, uma estrutura de concreto armado localizado em um ambiente marinho no Brasil. Neste presente trabalho é feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto da reação álcali-agregado, com enfoque na normas Brasileiras, abordando o mecanismo químico, a análise de riscos e a prevenção deste fenômeno patológico. Posto isso, também são relatados os testes da análise petrográfica para a caracterização dos agregados utilizados nas estruturas dos dolfíns de amarração do píer citado. A partir dos resultados adquiridos nos ensaios laboratoriais é possível evidenciar no donfin 3 a presença de minerais característicos da reação álcali-agregado. Todavia, a reação álcali-agregado tem como uma de suas características a distribuição heterogênea ao longo das estruturas afetadas. Motivo pelo qual é muito difícil estabelecer seu grau de desenvolvimento e estágio de evolução. Portanto, não é possível definir se o processo expansivo evidenciado no dolfim 3 ainda continuará ocorrendo no decorrer dos anos.

Palavras-chave: Patologia do concreto, Reação álcali-agregado, Píer.

ABSTRACT

This research aims to analyze the alkali-aggregate reaction with the case study of a pier, a reinforced concrete structure located in a marine environment in Brazil. In the present work is done a literature review on the subject of alkali-aggregate reaction, focusing on Brazilian standards, addressing the chemical mechanism, risk analysis and prevention of this pathological phenomenon. That said, petrographic analyses are also carried out for the characterization of the aggregates used in the structures of mooring dolphins of that pier. The results obtained in laboratory tests reveal the presence of characteristic minerals of the alkali-aggregate reaction in donfin 3. However, the alkali-aggregate reaction has as one of its features the heterogeneous distribution along the affected structures. Reason why it is very difficult to establish their degree of development and evolution stage. Therefore, it is not possible to define if the expansive process evidenced in dolfim 3 will still be occurring over the years.

Keywords: Concrete pathology, alkali-aggregate reaction, pier.

1. INTRODUÇÃO

O píer estudado foi construído na década de 80, sua estrutura foi executada conforme as normas vigentes na época, que já estabeleciam um tempo de vida útil mínimo de 50 anos. Todavia, após 30 anos de uso, é natural a necessidade de manutenção em certas partes da estrutura. Posto isso, foi executado um levantamento de seu estado físico.

A Figura 1 apresenta a localização das estruturas que compõem o Píer.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 9 - Estruturas que compõem o Píer [1]

A zona portuária é considerada um dos ambientes mais severos para a estrutura de concreto armado, pois possui um alto teor de cloretos e sulfatos. Além disso, o local onde o píer está localizado também apresenta características únicas que potencializam os efeitos agressivos de um ambiente marinho. A região possui altas temperaturas no ano todo, o que acelera processos químicos em comparação com lugares mais frios. A variação de maré pode chegar a 8 m [2], dependendo da época do ano, o que ocasiona uma maior zona de variação de maré e, consequentemente, o aumento da superfície da estrutura afetada. A grande variação da altura da água resulta em uma elevada vazão e, como consequência, a velocidade da água sob o píer é bastante alta. Este fenômeno, aliado à grande quantidade de detritos provenientes dos rios que desembocam nas proximidades, resulta em um ambiente que favorece a abrasão das estruturas expostas à água do mar. Também devido à alta vazão de água, ocorre uma movimentação do solo argiloso que se encontra no fundo do mar, fazendo com que aumente a turbidez da água, o que praticamente impossibilita a realização de inspeções subaquáticas.

A partir destes conceitos, este trabalho propõe uma análise da reação álcali-agregado no píer estudado.

2. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A NBR 15577-1:2008 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto, define a reação álcali-agregado (RAA) como:

> Reação química entre alguns constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Sua ocorrência está condicionada à presença simultânea de três fatores: agregado potencialmente reativo, umidade e álcalis. [3]

Trata-se de uma reação fortemente expansiva, que gera tensões internas no concreto e, consequentemente, fissuração. Apesar de dificilmente ser a causa de colapsos, a RAA possibilita a entrada de agentes agressivos que, por sua vez, irão causar a deterioração da estrutura.

É de conhecimento geral que as principais evidências desta manifestação patológica são:

- Fissuras em forma de mapa;
- Depósito de gel esbranquiçado nos poros do concreto;
- Entorno das bordas dos grãos de agregado com coloração característica;
- Descolamento dos grãos do agregado;
- Queda acentuada da resistência à flexão, podendo haver quedas na resistência compressão e principalmente no módulo de elasticidade do concreto, o que poderá ocasionar deformações excessivas.

Abaixo seguem exemplos dos efeitos da RAA no concreto, tanto em nível microscópico, Figura 10, quanto em nível macroscópico, Figura 11, Figura 12a e Figura 12b.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

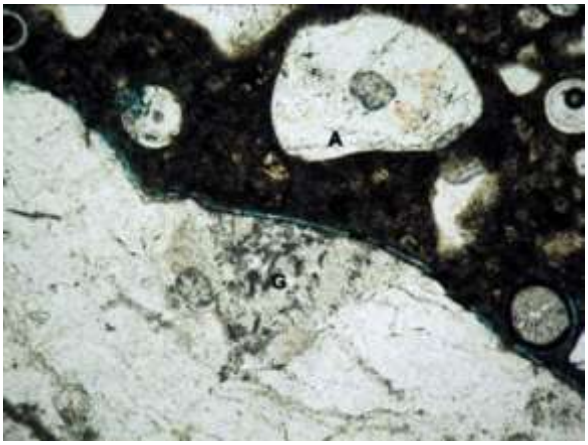

Figura 10 - Aspecto de detalhe do concreto – Dolfim 3 no qual se observa o gel da reação desenvolvendo-se na borda do agregado graúdo. Microscópio de luz transmitida - ampliação 50x [1]



Figura 11 - Fissuras, em formato de mapa, decorrentes da RAA em uma fundação [4]



Figura 12a - Reação álcali-sílica em um bloco de pilar [5]



Figura 4b - Reação álcali-sílica em um piso de concreto **[5]**

Existem três tipos de RAA: Reação álcali sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. Todavia, de interesse prático real, somente há preocupação com a reação álcali-sílica, pelo fato de ocorrerem com uma frequência bem maior. A NBR 15577-1:2008, as define como:

> Reação álcali-sílica (RAS): tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa:

opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, e ntre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve. [3]

Reação álcali-silicato: tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros. Geralmente, esta reação é mais lenta do que a RAS. [3]

Reação álcali-carbonato: tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à desdolomitização da rocha e conseqüente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnesiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote. [3]

2.1. Processo álcali-agregado

O mecanismo e alguns aspectos da reação ainda apresentam incertezas. Todavia, o modelo básico está esclarecido. Segundo Ribeiro e Cunha [6], a reação álcali sílica ocorre quando o agregado utilizado no concreto possui sílica em sua composição, esta sílica reage com os íons alcalinos (Na^+ e K^+) e os hidroxilos (OH^-), presentes na solução intersticial da parte do cimento, produzindo um gel silicato alcalino. Os íons de cálcio (Ca^{2+}), provenientes do hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, formado durante a reação água/cimento no concreto, entram em contato com o gel de silicato alcalino, dando origem a geles de silicatos de cálcio, sódio e potássio. Esses geles absorvem as moléculas de água e se expandem. Dando origem ao fenômeno expansivo da RAA.

Essas reações podem ocorrer de maneira muito lenta, geralmente já após o endurecimento do concreto, de acordo com Poole [7] a deterioração pode ocorrer em questão de dias, ou após anos, ou até décadas, até que os álcalis do cimento reajam completamente com o agregado. Estima-se um tempo médio necessário de 5 a 12 anos para isso se desenvolver.

Os íons do sódio e do potássio são provenientes de impurezas do cimento, e a concentração máxima recomendada destas substâncias é representada pela equação abaixo:

$$(\%N_2O + 0{,}658\%K_2O) \leq 0{,}6\% \text{ do peso do cimento} \quad (1)$$

Ou

$$\leq 3Kg/m^3 \text{ de concreto} \quad (2)$$

Se respeitadas essas proporções de álcalis, a reação álcali agregado é prevenida, independentemente do tipo de agregado utilizado. Todavia, se houver um excesso de cimento na mistura, esta proporção de 0,6% não é mais válida uma vez que os teores de álcalis podem ultrapassar os 3kg/m³.

O tamanho das partículas de sílica também tem influência sobre a velocidade de reação, que quando muito pequenas acabam inibindo o fenômeno expansivo da RAA. Segundo Paulon [8], agregados reativos de dimensões muito reduzidas provocam uma reação profunda e total antes que o gel tenha se formado. Grandes quantidades de materiais finos, devido a sua grande superfície específica, provocam redução rápida na concentração de álcalis de tal forma que os agregados maiores não tenham oportunidade de sofrer as reações secundárias, que provocam a formação do gel expansivo.

Dessa maneira, uma das formas de se impedir a RAA é através da adição de pozolanas no traço do concreto, em especial a microsílica, devido a sua elevada finura braile da ordem de 6000 cm²/g, bem maior que a do cimento que é de 2600 cm²/g. Devido a sua elevada área superficial a sílica presente na pozolana reage com os álcalis do cimento ainda na fase fluida do concreto. Portanto, mesmo que sejam usados agregados reativos no concreto, os álcalis reativos do cimento já terão sido consumidos, eliminando a possibilidade de ocorrer a RAA.

Outros fatores determinantes para a ocorrência da RAA são a temperatura e umidade locais. Quanto maior a temperatura no local, mais rapidamente a reação se desencadeará e, consequentemente, a RAA se manifestará mais cedo. Todavia, para que possa ocorrer a reação, é necessária a presença de água. A mesma pode ser oriunda do contato direto da estrutura com a chuva, água do mar e lençóis freáticos, no caso de fundações, ou do excesso de água, no caso

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

em que o fator água/cimento é superior ao necessário para a hidratação do concreto, ou da própria umidade, quando superior a 85% a 20°C.

Diante disto, podemos estabelecer fatores relevantes para a formação da reação álcali-agregado, sendo eles:

- Agregado potencialmente reativo;
- Elevada umidade;
- Alcalinidade do cimento (teor de $\%N_2O + 0{,}658\%K_2O$);
- Temperatura;
- Granulometria do material, quanto mais fino, mais reativo.

2.2. Análise da reação álcali-agregado

Existem diversos métodos na literatura que procuram caracterizar um agregado quanto a sua nocividade em relação à RAA. No entanto, a norma cita somente a análise petrográfica para caracterizá-los através do método de determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, e também pelo método de determinação da expansão em prismas de concreto.

Através da petrografia é possível identificar a composição química do mineral, assim como sua textura. Nela, o petrógrafo analisa visualmente o agregado, a fim de definir suas características geológicas e, assim, consegue determinar se o mesmo possui algum potencial reativo. No entanto, para um diagnóstico mais preciso, frequentemente é necessário o uso de testes complementares. Pires [9], faz observações importantes quanto as particularidades dos testes:

> Cabe ressaltar o caráter subjetivo dessa análise, devendo ser realizada por um petrógrafo experiente para obtenção de resultados confiantes. É importante mencionar também que a análise petrográfica classifica a rocha (agregado) unicamente quanto ao seu potencial reativo. A análise de expansão deletéria deve ser verificada através de testes que combinem o agregado com o cimento, por exemplo, os ensaios de reatividade de prismas de concreto e de barras de argamassa. [9]

A Norma responsável por essa análise é a NBR 15577-3:2008 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do cimento. A mesma cita que:

> Esta parte da ABNT NBR 15577 estabelece os procedimentos de análise petrográfica por microscopia ótica. Entretanto, pode requerer técnicas complementares, como coloração seletiva de minerais, análise por difração de raios-X (*DRX*), análise termodiferencial (*ATD*), espectroscopia de infravermelho, microscopia eletrônica de varredura (*MEV*) e análise de raios-X por energia dispersiva (*EDX*). [10]

Já o método da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, consiste na imersão de barras de argamassa, contendo o agregado a ser estudado, em uma solução de hidróxido de sódio, NaOH, com concentração de 1N e temperatura de 80 °C por um período de 14 dias. Se o resultado obtido nesse ensaio indicar expansão menor que 0,19% aos 30 dias, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto.

Caso a expansão obtida no ensaio acelerado seja maior ou igual que 0,19% aos 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo nesse ensaio. Nesse caso, pode ser feito o ensaio em prismas de concreto para confirmar o resultado.

O Método de prismas de concreto necessita de um tempo maior para a execução, mas oferece uma maior precisão no resultado. Ele consiste em expor prismas de argamassa, contendo o agregado ao qual se deseja testar, em ambiente saturado com água à temperatura de 38 ºC por 365 dias. Se a expansão for inferior a 0,04% o agregado é considerado potencialmente inócuo, e se superior a 0,04% o agregado é considerado potencialmente reativo.

3. ANÁLISE PETROGRÁFICA - REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Para a análise petrográfica, corpos-de-prova foram extraídos com o objetivo de avaliar sua qualidade e durabilidade, com ênfase na ocorrência de eventuais reações expansivas.

A norma que orienta com relação ao potencial reativo dos agregados para a RAA é a NBR 15577-3:2008. A mesma estabelece os procedimentos de análise petrográfica por microscopia ótica e ainda ressalta que as análises devem ser feitas por um petrógrafo experiente, devido às dificuldades do processo.

Com o intuito de identificar a ocorrência da RAA, o petrógrafo investigou as amostras de concreto, primeiramente de maneira visual e posteriormente, quando necessário, com a ajuda de técnicas complementares. Visando verificar a possibilidade de formação da RAA e também de outros agentes agressivos no futuro, foram observadas as características do concreto, como a porosidade, compacidade, presença de fissuras, entre outros.

Feito isso, os agregados das amostras foram identificados quanto as suas características mineralógicas, com o objetivo de determinar de qual tipo de rocha se tratavam e também a sua reatividade potencial, ou seja, se existe ou não a presença de sílica em sua composição.

4. RESULTADOS

As principais características dos concretos dos dolfins 1,2 e 3, identificadas macroscopicamente e com os microscópios estereoscópico e óptico, encontram-se sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características gerais dos concretos [1]

Amostra	Característica	Amostra 01 Dolfim 01	Amostra 02 Dolfim 02	Amostra 03 Dolfim 03
Aspectos Gerais	Cor da argamassa	Cinza esverdeada	Cinza esverdeada	Cinza esverdeada
	Distribuição dos constituintes	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo
	Proporção dos constituintes	Muito argamassado	Muito argamassado	Muito argamassado
	Aderência argamassa/ agregado graúdo	Boa	Boa	Boa
	Porosidade Macroscópica	Pouco poroso	Pouco poroso	Pouco poroso
	Compacidade	Compacto	Compacto	Compacto
	Adensamento	Normal com raros vazios de exsudação	Normal com raros vazios de exsudação	Normal com raros vazios de exsudação
	Fraturamentos	Não observados	Não observados	Não observados
Aspectos Relativos a Reação Álcali-Agregado	Bordas de reação	Não observadas	Raras e mal definidas	Raras com gel depositado no interior dos agregados
	Poros preenchidos	Não observadas	Não observadas	Presentes
	Microfissuras	Não observadas	Não observadas	Não observadas

Os aspectos gerais do concreto, evidenciados na Tabela 1, servem para determinar sua suscetibilidade aos agentes agressivos presentes no ambiente. As amostras em questão mostraram que o concreto avaliado possui um bom adensamento, uma boa compacidade e com a ausência de fraturamentos, o que sugere que o concreto possui uma baixa permeabilidade. Todavia, ainda foi observada a presença de aspectos relativos à reação álcali-agregado nas amostras do dolfim 3.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Os concretos estudados apresentaram características gerais semelhantes. De um modo geral, as características macroscópicas dos concretos, permitem inferir processos de dosagem e adensamento normais. A praticamente ausência de vazios de exsudação indica adensamento adequado, enquanto a distribuição regular dos agregados graúdos em meio à argamassa evidencia boa homogeneização da mistura, Figura 13.



Figura 13 - Visão geral da amostra de concreto [1]

Os concretos se caracterizaram por possuírem elevada quantidade de argamassa de coloração cinza a cinza esverdeada, o que sugere o uso de cimentos ricos em escória de alto forno. Os agregados graúdos observados são constituídos por fragmentos angulosos de uma rocha de coloração esverdeada e composição aproximadamente granítica. O agregado miúdo é composto por grãos arredondados esféricos de areia natural (areia de quartzo). A porosidade macroscópica observada é baixa sendo constituída por poros milimétricos a submilimétricos de formas arredondadas.

Com relação à presença de reações expansivas observa-se apenas na amostra do dolfim 3 evidências claras da instauração de processos expansivos ligados a reação álcali agregado. De fato, observam-se algumas bordas de reação ao redor do agregado graúdo associadas à deposição de material branco nas superfícies de quebra e do agregado graúdo, que possivelmente tratam-se de produtos cristalizados, conforme evidenciado na Figura 14.



Figura 14 - Aspecto de detalhe da amostra do dolfim 3 no qual se observa uma borda de reação ao redor do agregado graúdo (G) associada a deposição de material branco na superfície de quebra. Microscópio Estereoscópico - ampliação 12x [1]

Os concretos examinados são compostos principalmente por agregados do tipo pedra britada e areia natural. As observações ao microscópio permitiram identificar dois tipos principais de rocha compondo os concretos. A Tabela 2, a Tabela 3Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam as características gerais, macroscópicas dos agregados graúdo e miúdo.

Tabela 2 - Características gerais do agregado graúdo [1]

Tipo	Cor	Forma	Grau de arredondamento	Dimensão	
				Intervalo de variação	Dimensão média
Pedra britada	Cinza a cinza rosado	Eqüidimensional	Angulosos	1,5 a 2 cm	1,5 cm

Tabela 3 Características gerais do agregado graúdo [1]

Caracterização físico-mecânica		
Quebradiço	Compacidade	Tenacidade (resistência à quebra)
Não quebradiço	Compacto	Elevada

Tabela 4 - Síntese das características petrográficas dos agregados graúdos [1]

Características		Agregado 1	Agregado 2
Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspatos (microclinio e plagioclásio)	Quartzo e feldspatos (microclinio e plagioclásio)
	Subordinada	Anfibólio, opacos, sericita epidoto e clorita	Biotita hornblenda, opacos, sericita, clorita e epidoto
	Reativa/ Deletéria	Quartzo com extinção ondulante (25º-30º) e feldspatos alterados (20%)	Quartzo microcristalino (10-20%)
Estrutura		Maciça a pouco foliada	Foliada
Textura		Granonematoblástica	Milonítica
Granulação		Inequigranular - Média a grossa	Média
Alteração		Moderadamente alterada com feldspatos bastante sericitizados	Sã a fracamente alterada
Deformação do agregado		Agregado deformado com foliação e lineamentos marcados pela orientação dos anfibólios	Agregado muito deformado com massas de cristais microgranulares envolvendo cristais
Tipo de rocha		Metamórfica	Metamórfica
Classificação		Hornblenda Gnaisse	Milonito
Reatividade potencial		Potencialmente reativa	Potencialmente reativa

Tabela 5 - Síntese das características do agregado miúdo [1]

Grau de arredondamento	Impregnações	Mineralogia principal	Tipo/origem	Alteração	Reatividade potencial
Arredondado	Não observadas	Quartzo e fragmentos de rocha	Areia natural	Não alterado	Potencialmente inócuo

O levantamento das características dos agregados serve para ajudar na identificação da rocha analisada, de forma a determinar se a mesma possui elementos que venham a propiciar a reação álcali-agregado.

Do ponto de vista físico-mecânico pode-se considerar o agregado utilizado nos concretos como de boa qualidade. Do ponto de vista mineralógico, deve-se considerar que o Agregado 1 possui grande quantidade de quartzo com extinção ondulante (25º a 30º) e feldspatos alterados, enquanto o Agregado 2 apresenta elevada quantidade de quartzo

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

microgranular. Essas caraterísticas permitem classificar os agregados utilizados na elaboração do concreto como de potencialmente reativos.

O agregado miúdo é composto principalmente por grãos arredondados e esféricos de quartzo e alguns fragmentos de rocha quartzitica. Não se observam elementos deletérios na areia.

Com o objetivo de melhor detalhar a microtextura dos concretos e, em especial, caracterizar a ocorrência da reação álcali-agregado através de seus produtos, foram realizadas análises ao microscópio eletrônico de varredura. No caso da Amostra 03 – dolfim - 03, a análise dos locais preferenciais de disposição dos geles e cristais resultantes da reação álcali-agregado, isto é, as zonas de interface agregado-argamassa (superfície de descolamento do agregado graúdo) revelaram a presença de minerais característicos da reação álcali agregado. Os produtos cristalizados da reação apresentam hábitos principalmente foliares e lancetados, conforme Figura 15 e Figura 16, respectivamente. Estão normalmente agrupados em "tufos" ou em grandes massas, que se desenvolvem preferencialmente em meio aos grãos de quartzo ou feldspato que constituem os agregados graúdos ou recobrem a argamassa.

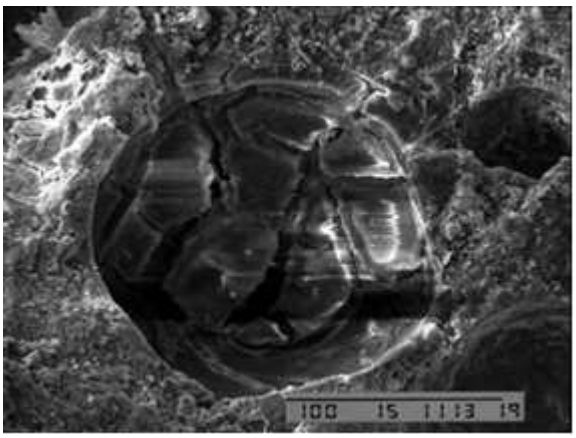

Figura 15 - Detalhe de um poro na argamassa contendo o gel expansivo resultantes da reação álcali agregado - Microscópio Eletrônico de Varredura – 1500x [1]

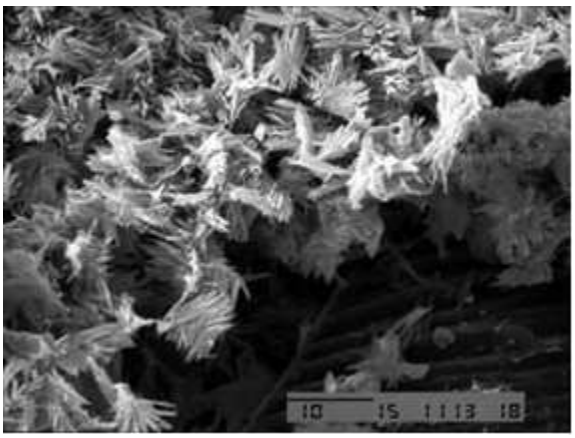

Figura 16 - Aspecto de detalhe da interface pasta com o agregado graúdo na qual se observam cristais lancetados resultantes da reação álcali agregado – Microscópio Eletrônico de Varredura – 1500x [1]

Os testes demonstraram que na amostra dolfim 3 observaram-se feições típicas da instauração da reação álcali agregado do tipo álcali silicato. Essas feições constituem-se principalmente de tênues bordas escuras ao redor de alguns agregados graúdos associadas à deposição de material branco de aspecto porcelânico sobre a superfícies de quebra do concreto. Eventualmente, nota-se a presença de gel preenchendo poros na argamassa. Ao microscópio eletrônico foi possível caracterizar os produtos hidratados típicos da reação que possuem formas "lancetadas" e se depositam nas áreas de interface do agregado graúdo.

Todavia, a reação álcali agregado tem como uma de suas características a distribuição heterogênea ao longo das estruturas afetadas. Motivo pelo qual é muito difícil estabelecer seu grau de desenvolvimento e estágio de evolução. Portanto, não é possível definir se o processo expansivo evidenciado no dolfim 3 ainda continuará ocorrendo no decorrer dos anos.

6. REFERÊNCIAS

[1] EMPRESA OPERADORA. *Inspeção estrutural do píer – Relatório de recuperação*. 2015.

[2] DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. "Previsões de marés (máximas e mínimas diárias)". Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/index.htm/>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2015.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577-3 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.* Rio de Janeiro, 2008.

[4] FIGUERÔA, J. D.; TIBÉRIO, A. "O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de Concreto: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife". Recife: *Ed. Universitária da UFPE*, 2007.

[5] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook*. Washington, DC: National Technical Information Service. 2011.

[6] RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. T. *Deterioração das estruturas de concreto armado. In Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. 272 p. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

[7] POOLE, A. B. Introduction to Alkali-Aggregate reaction in concrete. In: Swamy, R. N. *The alkali-sílica reaction in concrete***.** p. 16-44. Glasgow: Blackie and son, 1992.

[8] PAULON, V. A. *Reação Álcali-Agregado em Concreto*. São Paulo: Escola politécnica da Universidade de São Paulo. 1981.

[9] PIRES, K. O. *Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual – um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 167 p. 2009.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577-3 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.* Rio de Janeiro, 2008.