

DURABILIDADE DE ESTRUTURAS PORTUÁRIAS – ESTUDO DE CASO DE UM CAIS PROTENDIDO

**Luiz Octavio de Souza Bueno
Oliveira¹**

luiozotavio.uerj@gmail.com

Regina Helena Ferreira de Souza²

reginahsouza@gmail.com

ÁREA: ESTUDO DE CASOS

Resumo

Estruturas portuárias de concreto em ambiente marítimo estão sujeitas à ação deletéria do local em que estão inseridas. As ações agressivas do mar podem promover a deterioração dos materiais ao longo do tempo, diminuindo a vida útil das estruturas e gerando custos dispendiosos no futuro. Buscando melhorar características e aumentar o desempenho dessas estruturas, este trabalho apresenta o estudo de algumas medidas que colaborem neste sentido. São comparados requisitos exigidos pelas normas brasileiras e regulamentações internacionais tais como o Código Modelo e o Eurocódigo. São apresentadas, também, as principais ações agressivas do ambiente e a maneira com que elas afetam os componentes estruturais. São propostas medidas para tentar mitigar seus efeitos, melhorando, assim, o desempenho quanto à durabilidade destas estruturas. Dentre as medidas abordadas, destaca-se a utilização da protensão, com pós-tração, cujos interesses vão desde a redução da fissuração quanto à maior facilidade de execução de uma obra marítima, diminuindo o número de estacas e as fases de concretagem “in loco”. São discutidas as questões relevantes a este tema, tais como o fenômeno da corrosão sob tensão, a limitação de tensões de tração e de compressão, e também os limites de fissuração para elementos protendidos. Finalmente, é discutida a questão da durabilidade para um cais protendido, quanto às características dos materiais a serem utilizados bem como um plano de inspeção para a estrutura.

Palavras-chave: Cais

Protensão

Durabilidade

¹ Doutorando, UERJ, Departamento de Estruturas e Fundações

² Professor Associado, UERJ, Departamento de Estruturas e Fundações

DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS PORTUARIAS - ESTUDIO DE CASO DE UN MUELLE PRETENSADO

**Luiz Octavio de Souza Bueno
Oliveira**

luiozotavio.uerj@gmail.com

Regina Helena Ferreira de Souza

reginahsouza@gmail.com

AREA: ESTUDIO DE CASO

Resumen

Las estructuras portuarias marítimas de hormigón están sujetas a la acción deletérea del ambiente en que están insertadas. Las acciones agresivas del mar pueden promover el deterioro de los materiales a lo largo del tiempo, disminuyendo la vida útil de las estructuras y generando costos costosos en el futuro. Buscando mejorar características y aumentar el desempeño de estas estructuras, este trabajo presenta el estudio de algunas medidas que colaboren en este sentido. Se comparan requisitos exigidos por las normas brasileñas y regulaciones internacionales como el Código Modelo y el Eurocódigo. Se presentan también las principales acciones agresivas del ambiente y la manera en que afectan a los componentes estructurales. Se proponen medidas para intentar minorar sus efectos, mejorando así su calidad en cuanto a la durabilidad de estas estructuras. Entre las medidas abordadas, se destaca la utilización del pretensado, con armaduras postesas, cuyos intereses van desde la reducción del agrietamiento a la mayor facilidad de ejecución de una obra marítima, disminuyendo el número de pilotes y de las fases constructivas. Se discuten las cuestiones relevantes a este tema, tales como el fenómeno de la corrosión bajo tensión, la limitación de tensiones de tracción y de compresión, y también los límites de agrietamiento para elementos pretensados. La cuestión de la durabilidad para una estructura portuaria pretensada es abordada, en relación a las características de los materiales a ser utilizados y también a respecto de un plan de inspección para la estructura.

Palabras clave: Muelle

Pretensado

Durabilidad

Introdução

Estruturas portuárias em concreto são de grande utilização, tanto no Brasil quanto no mundo. O processo construtivo é bem conhecido, utilizando elementos pré-moldados em grande escala – afinal, a concretagem no mar é mais custosa e trabalhosa; e, embora haja poucos livros que tratem das questões estruturais deste tema, especialmente no Brasil, os escritórios de cálculo conhecem bem a maneira de projetar estas estruturas, que possuem, de fato suas particularidades. Contudo há, no caso de estruturas de acostagem, uma grande questão: o ambiente em que são inseridas. O ambiente marinho é agressivo às obras em concreto armado e protendido porque os componentes da água são capazes de degradar o concreto e a as armaduras por mecanismos diferentes e complementares, agravando ainda mais a situação de tais estruturas que estão, também, sujeitas a ciclos de molhagem e secagem e às vezes a gelo e degelo.

O presente trabalho enfoca a utilização de estruturas protendidas de concreto para acostagem de embarcações em ambiente marinho, através da revisão bibliográfica relacionada ao tema, indicações de parâmetros de durabilidade preconizados por regulamentações nacionais e internacionais a serem utilizados em projetos que visam à durabilidade das estruturas.

Ações agressivas em ambiente marinho

Não apenas estruturas em contacto direto com o ambiente marinho estão sujeitas a agentes agressivos: um grande número de estruturas também está exposto indiretamente a estes efeitos uma vez que os ventos podem levar a névoa salina por alguns quilômetros afastados do litoral. No entanto, estruturas costeiras são, de fato, as mais afetadas ao ataque simultâneo de vários processos físicos e químicos de deterioração.

Os principais mecanismos de deterioração do concreto são a reação álcali-agregado, a expansão devida à ação dos sulfatos e a lixiviação. Embora a armadura esteja protegida pelo cobrimento, esta proteção pode se perder nomeadamente pela ação de íons de cloreto, que levam à corrosão das barras de aço e ao conseqüente deslocamento do concreto. A seguir faz-se um breve resumo sobre a carbonatação, e sobre o ataque de cloretos às estruturas de concreto. Durante a hidratação do cimento Portland os silicatos do clínquer reagem com a água, liberando grande quantidade de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , substância responsável pelo elevado pH do concreto e, conseqüentemente, pela proteção das armaduras de aço contra a corrosão. O gás carbônico pode penetrar no concreto por difusão, da superfície para o interior, e reagir com os componentes alcalinos da pasta de cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, provocando uma redução do pH para valores inferiores a 9. Isto despassiva o aço das armaduras, desprotegendo-o contra a corrosão. Nestas condições, o aço, quando posto na presença de oxigênio e umidade, é oxidado e corroído. Enquanto que no concreto simples a carbonatação pode ser considerada como um fenômeno favorável à qualidade do material, pois seu efeito de preenchimento de poros influi positivamente nas resistências mecânicas, no concreto armado, a carbonatação é um fenômeno totalmente indesejável.

Já os cloretos usualmente podem ser incorporados ao concreto de duas formas: ou durante a confecção, presentes no cimento Portland em teores da ordem de 0,01%, nos antigos aditivos químicos (principalmente nos aceleradores de pega), na água de mistura (do mar ou de lençol freático contaminado) ou ainda em agregados contaminados (como por exemplo as areias do mar); ou quando penetram na estrutura por difusão, ao longo do tempo, provenientes do exterior.

No caso do Brasil, assim como de outros países tropicais, a fonte externa mais comum de cloretos que podem penetrar nos concretos é a água do mar. Estes são os com maior

potencial de agressão, pois sob a forma dissolvida em água podem penetrar no concreto através dos mecanismos clássicos de transporte de água e íons. Quando depositado na superfície do concreto, pela chuva ou por absorção capilar, difusão, permeabilidade ou migração de íons por ação de um campo elétrico, penetram no concreto, criando a chamada “frente de cloreto” em analogia à “frente de carbonatação”, cuja concentração varia da superfície para o interior. No interior do concreto os cloretos podem permanecer na forma de cloreto livre, solúvel ou dissociável, como íon na água dos poros, ou pode se combinar, formando parte das fases hidratadas do cimento. O primeiro é o cloreto realmente agressivo à armadura e o segundo geralmente se encontra na forma de cloroaluminato, conhecido como sal de Friedel. A soma do cloreto livre com o combinado é denominada cloreto total. Embora o cloreto solúvel em água seja o que pode provocar a corrosão, é conveniente determinar os cloretos totais, pois parte dos combinados pode vir a ficar disponível para participar das reações deletérias, devido a fenômenos tais como a carbonatação do concreto ou a elevação de temperatura.

Durabilidade em estruturas marítimas

Em elementos estruturais sujeitos à variação de maré ou continuamente submersos, grandes quantidades de água podem ser transportadas, desde que exista uma superfície exposta ao ar, onde a água será evaporada. Estruturas parcialmente submersas sofrem um mecanismo de transporte em que a água penetra no maciço de concreto tanto por pressão hidráulica quanto por sucção capilar. Esta água pode ainda, conter agentes nocivos dissolvidos. Com a evaporação da água através das superfícies expostas ao ar, cristalizam-se os agentes agressivos com conseqüente aumento de sua concentração na estrutura.

O concreto exposto ao ambiente marinho pode deteriorar-se como um resultado de efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos da hidratação do cimento, da expansão álcali-agregado (quando agregados reativos estão presentes), da pressão de cristalização dos sais dentro do concreto quando em condições de molhagem e secagem nas zonas de variação de maré, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão da armadura em elementos armados ou protendidos e da erosão física devido à ação das ondas e objetos flutuantes.

Em estruturas marinhas, distinguem-se três zonas de influência. A superior é a zona atmosférica, compreendendo regiões que não estão em contato direto com a água do mar. Nesta zona os danos são causados pelos sais em forma de partículas sólidas carregados pelos ventos e o principal mecanismo de deterioração está associado à corrosão das armaduras pela ação dos íons cloretos.

Figura 1 – Representação esquemática de um cilindro de concreto armado exposto à água marinha

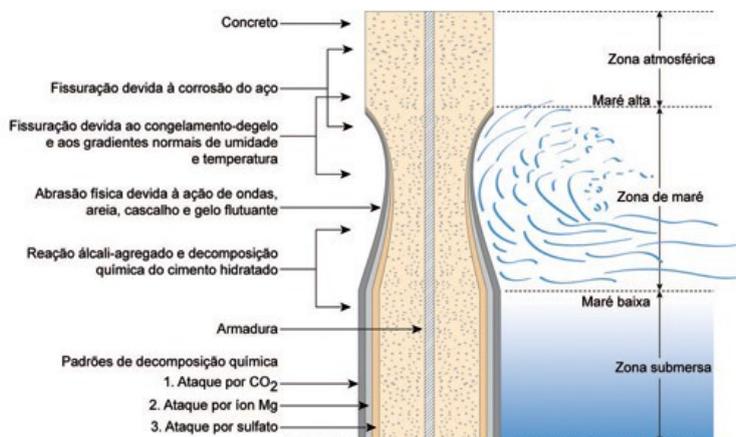


Figura 1: Representação esquemática do concreto armado exposto à água marinha. fonte: Metha e Monteiro (3)

Logo abaixo está a zona de flutuação de maré, onde ocorre a deterioração máxima, pois pode ocorrer uma elevação de concentração de sais no interior do concreto. Além disso, é fortemente vulnerável à fissuração e ao lascamento (pela ação da corrosão das armaduras e dos ciclos de molhagem e secagem), ao desenvolvimento de reações álcali-agregado e à interação água do mar-pasta de cimento. O concreto enfraquecido pela microfissuração e pelos ataques químicos se desintegra pela ação erosiva e pelo impacto das ondas, areia, etc

Finalmente encontra-se a zona submersa, que pela falta de ar, só estará sujeita ao ataque químico da água do mar.

Neville (2) relata a concentração média dos íons presentes no mar, sendo os mais deletérios para a pasta de cimento hidratada o íon de magnésio e de sulfato, este responsável principalmente pela degradação dos compostos de C_3A .

Contudo, de acordo com pesquisas de Metha e Monteiro (3), apesar do indesejável alto teor de sulfatos na água do mar, a experiência mostra que, mesmo que um cimento Portland de alto C_3A tenha sido usado e quantidades significativas de etringita estejam presentes como resultado do ataque por sulfato à pasta de cimento, a deterioração do concreto não acontece por expansão, mas sim sob a forma de erosão ou perda de constituintes sólidos da massa. Ao que parece, a expansão da etringita é suprimida em ambientes onde íons OH^- tenham sido substituídos essencialmente por íons Cl^- .

Com o intuito de combater o ataque de sulfatos, é comum na indústria o emprego de cimentos resistentes a sulfatos (com baixo teor de C_3A) que contribuem na redução da formação de etringita. O C_3A , porém, exerce uma função importante na fixação dos íons cloreto, que os neutraliza (os íons cloreto combinam-se com o C_3A), sem que eles fiquem disponíveis para promover a corrosão das armaduras. Assim, na presença de cloretos, o emprego dos cimentos resistentes a sulfatos dificulta o ataque dos sulfatos ao concreto, mas facilita o ataque dos cloretos às armaduras. Isto é uma importante conclusão para o caso de obras marítimas, em que deve-se preferir a utilização de cimentos com escória de alto forno, que também são resistentes ao ataque de sulfatos, mas sem reduzir a quantidade de C_3A .

Aqueles autores referem ainda que o resultado de uma análise de várias estruturas deterioradas, dentre elas as expostas à ação do mar, indicou que a permeabilidade é a chave da durabilidade. Esta característica relaciona-se com a resistência do concreto: quanto maior a resistência, maior a redução no volume dos grandes vazios capilares da matriz da pasta e assim menor a permeabilidade.

Para conseguir isto deve-se utilizar baixa relação água-cimento, um consumo adequado de cimento, tipo adequado de cimento, inclusão de aditivos químicos e minerais. Deve-se cuidar também da dimensão e granulometria dos agregados, das deformações causadas por retrações térmicas e por secagem e por um carregamento prematuro ou excessivo. Todos esses cuidados visam a reduzir a microfissuração da zona de transição da interface agregado-pasta.

A espessura de cobrimento desempenha importante papel na durabilidade das estruturas de concreto. Na década de 80 constatou-se que havia um grande número de obras deterioradas em todo o mundo e que as exigências das normas de projeto eram insuficientes. Na década de 90, foi lançado o CM-90 que se caracterizou pelas novas exigências de durabilidade e pela introdução do conceito de vida útil no projeto das estruturas de concreto.

Utilização da protensão

A utilização da protensão em estruturas portuárias é de grande interesse pois o emprego desta tecnologia de construção gera aspectos vantajosos tais como larga utilização de pré-moldados, diminuição das etapas construtivas, redução do número de estacas e menor fissuração dos elementos. Entretanto, um dos receios da utilização de protensão em

ambientes potencialmente agressivos, tal como é o marinho, é a ocorrência da Corrosão Sob-Tensão.

A corrosão sob tensão, cuja sigla mais usual é “CST”, é conhecida também pela denominação “corrosão sob tensão fraturante”, livre tradução de “*stress corrosion cracking*”, cujo nome refere-se ao fato da ruptura ocorrer ainda sob regime elástico, sem perda de material.

Para a ocorrência da CST é necessário que a armadura esteja despassivada, o que pode acontecer pela ação de carbonatação ou de ataque de cloretos. Embora o mecanismo da CST seja bastante complexo, há na literatura consenso de que este fenômeno é induzido pelas condições de exposição ambiental, pela existência de tensões e pela susceptibilidade do material ao fenômeno (4). Além disto, o tempo para sua ocorrência é tido como inversamente proporcional ao nível de tensões aplicadas (5).

A ocorrência da CST se faz em duas etapas. Na primeira, conhecida como nucleação da trinca, ocorre a formação de pites ou de frestas, dando origem à abertura de regiões susceptíveis ao ataque do meio-ambiente. Na segunda ocorre a fase de propagação da trinca. Esta propagação pode ocorrer tanto de maneira intergranular, ou seja, na interface dos grãos que compõem o material; quanto de maneira intragranular, à qual materiais puros são bastante resistentes, mas que podem ocorrer em ligas tais como é o caso do aço carbono.

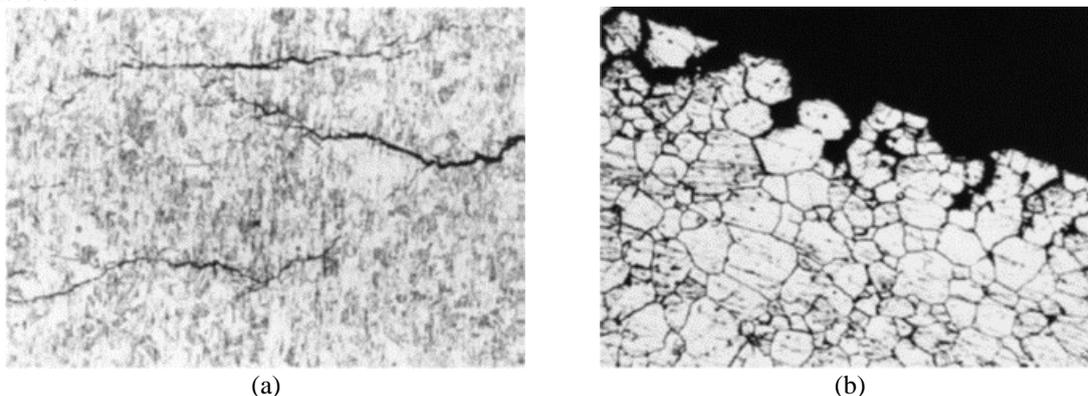


Figura 2: Propagação intergranular (a) e intragranular (b), fonte: Paulo Helene (24)

De acordo com Nogueira (6), o aço carbono é especialmente susceptível à ação da CST em presença de nitratos e de álcalis. Diversos materiais componentes do concreto estão associados à produção dos hidróxidos alcalinos (álcalis) que podem ser provenientes do cimento, dos agregados, das pozolanas e mesmo da água de amassamento. O aumento da dureza do material está relacionado com uma maior tendência à ocorrência da CST. Os aços para concreto protendido de relaxação baixa (RB), de maior emprego na indústria da construção civil, são produzidos por processo de trefilação, recebendo tratamento termomecânico (7) que gera um produto cuja dureza HB é maior do que aquele obtido pelo processo de laminação a quente.

Os aços de alta resistência mecânica são sujeitos à ocorrência de fraturas especialmente em ambientes em que há concentração de cloreto. Nestes casos, as fraturas no material podem surgir por simples exposição ao ar úmido e suspeita-se que a fragilização por hidrogênio seja o mecanismo preponderante para ocorrência da CST neste caso.

Nürnberg (8) identificou três tipos principais de fraturas devidas à corrosão no aço de protensão, a fratura frágil devida a excesso de carregamento, afetada por corrosão local através de pites ou por fragilização por hidrogênio; a fratura como resultado de fadiga combinada com corrosão; e a fratura como resultado de fissuração por corrosão sob tensão.



Figura 3: Ruptura típica de corrosão sob tensão: corte transversal na armadura. Fonte: Paulo Helene (25)

Segundo aquele autor, a corrosão sob tensão na armadura de protensão pode acontecer por fissuração por corrosão anódica sob tensão e corrosão sob tensão induzida pelo hidrogênio. O primeiro caso ocorre na presença de nitratos contendo eletrólitos não alcalinos com pH inferior a 9 e pode ocorrer, em estruturas industriais de produção de fertilizantes em que exista a presença de nitrato de cálcio.

O segundo caso, cuja corrosão sob tensão ocorre por indução devida à fragilização pelo hidrogênio, recebe a sigla em inglês H-SCC (“*hydrogen induced stress corrosion cracking*”) pode ocorrer tanto durante a construção da estrutura protendida quanto depois, durante a sua utilização. Para que ela ocorra é necessário que o material seja sensível ao fenômeno; que haja nível de tensão suficiente e que haja ataque corrosivo pré-existente, dependendo, portanto, da ação conjunta de características influentes do material e de parâmetros ambientais.

A contaminação por cloretos é também um fator de grande importância para ocorrência da CST pois ela dá início à formação de pites no material. Ainda segundo Nürnberger, caso o aço da armadura seja sensível, mesmo o ataque por pequenas quantidades de hidrogênio livre pode levar a danos irreversíveis. Outros experimentos realizados revelaram que em aços para protensão deformados a frio, as tensões provenientes de cargas que impõem um estado de fadiga no material, mesmo quando são de baixa amplitude comprometeram significativamente a susceptibilidade da armadura à CST.

Contudo uma ampla compilação de dados com cerca de 30 anos de informação realizada pela FIB (9) chegou à conclusão de que os maiores problemas relacionados à durabilidade dessas estruturas estão mais relacionados com dimensionamento incorreto, execução que deixou a desejar e escolha incorreta de materiais inclusive aço de protensão do que com a questão da corrosão sob tensão em si só, pois estes fatores fazem que o combate à ação da corrosão não seja garantida desde o início da vida útil da estrutura.

A preocupação quanto a durabilidade de estruturas protendidas de concreto em ambiente marinho levou a uma série de estudos de longa duração iniciados ainda na década de 60, tais como aqueles realizados pelo corpo de engenheiros do exército americano e conduzidos pelos pesquisadores Morris Shupack e Edward O’ Neil (10). Esta pesquisa foi realizada na estação de exposição a ambiente agressivo – WES, localizada em Treat Island, Maine, nos Estados Unidos. Vinte vigas de concreto protendido com pós tração foram sujeitas a condições ambientais extremas ocorridas entre 1961 e 1994. Além da variação de marés e seus respingos, as vigas foram sujeitas a 121 ciclos de gelo e degelo por ano.

A seção transversal dos corpos de prova consistia tinha forma de “I” com alma de 12,7 cm de espessura e altura total de 40,8 cm. A espessura de cobrimento foi de apenas 1,9 cm e utilizaram-se também barras de armadura passiva, além da protensão, que consistia em armaduras ativas aderentes com pós-tração, fornecidas pelos fabricantes disponíveis na época - Freyssinet, Stressteel, Prescon e Ryerson. Dezenove das vigas contaram com bainhas de aço polidas posteriormente injetadas e uma delas teve a armadura apenas envolvida por papel.

Foram realizados diversos ensaios – destrutivos e não destrutivos ao longo do ensaio – para atestar a qualidade dos corpos de prova. Onze destas vigas foram ensaiadas até a ruptura entre os anos 70 e 80 e as demais permaneceram em observação até o ano de 1994. Dentre os resultados observados neste ensaio de longa duração, destaca-se que não

observaram-se quaisquer sinais de corrosão ou destruição das armaduras de protensão, fato que restou comprovado nos ensaios destrutivos realizados ao longo das décadas de 1970 e 1980. Este resultado foi atribuído à excelente qualidade do graute de preenchimento das bainhas. Os ensaios destrutivos revelaram que ocorreu uma perda máxima de diâmetro de 0,8% nas armaduras mais afetadas à corrosão. Tal resultado foi considerado excelente pelos pesquisadores, mesmo levando em conta que houve falha de algumas proteções das ancoragens a partir de 1963 (dois anos após o início do ensaio), e que a concentração de cloretos na alma das vigas testadas era bastante alta, conforme relatório do exército de 1975.

Na viga cuja armadura ativa foi simplesmente envolvida por papel, o ensaio destrutivo revelou diminuição da capacidade resistente última, devido à falha prematura em uma das armaduras pretendidas.

Os pesquisadores afirmaram que o experimento de longo prazo foi um teste extremo de durabilidade dos sistemas de pós-tensão. Salientam ainda que se as peças de concreto armado pretendido com pós-tração forem dimensionadas e armadas de acordo com as boas práticas da engenharia da atualidade, resultarão em estruturas duráveis e aptas a lidar com ambientes tão agressivos quanto os observados na Treat Island. Observe-se também que a protensão foi realizada de maneira centrada em relação ao centroide da seção transversal da peça, e assim não sujeita a qualquer solicitação externa. Portanto, não havia, em tese, qualquer ação que fizesse com que suas tensões de tração fossem aliviadas – exceto os efeitos das perdas imediatas e lentas. Estava, então, a protensão sujeita aos maiores níveis tensão que poderia, teoricamente, experimentar. Não se verificou a ação da corrosão sob tensão no teste de longa duração.

Quanto à corrosão das armaduras passivas, observou-se que a deterioração ocorreu de maneira intensa e severa. Houve ocorrência de deslocamento devido à corrosão em quase todas as almas das vigas. Por isso, como modernamente se sabe, a espessura de revestimento adotada foi insuficiente. Além disso, os altos teores de cloreto verificados no concreto foram, também, responsáveis pelo fenômeno de corrosão do aço.

Limitação das tensões de tração e compressão

O concreto, como um material de comportamento frágil, tende a desenvolver fraturas de tração na direção perpendicular às maiores deformações de tração. Assim, quando o concreto está sujeito a uma carga uniaxial de compressão, surgem fissuras paralelas à direção de aplicação da carga. Mesmo sem a existência de qualquer carregamento, devido ao fenômeno da retração durante o processo de hidratação, surgem microfissuras na estrutura. Contudo, o aumento das tensões de compressão para a ordem de 30 a 40% de sua resistência irá mobilizar a resistência na interface entre a pasta e o agregado, desenvolvendo novas fissuras. Embora tais fissuras sejam estáveis, um novo aumento de carga provocará o surgimento de novas fissuras e assim por diante. Para cargas de aproximadamente 80% da resistência à compressão, esta propagação de fissuras torna-se instável, ocorrendo mesmo com carga constante. As deformações, então, crescem rapidamente levando à ruptura por compressão.

Por isto, as regulamentações de projeto limitam as tensões de compressão. A NBR 6118:2014 (11), define, em seu item 3.2.7, o estado-limite de compressão excessiva como sendo aquele em que as tensões de compressão no concreto atingem “o limite convencional estabelecido” e na sequência referencia o item 17.2.4.3.2.a, que trata da verificação simplificada ao estado limite último no ato da protensão. No entanto, nada se fala das verificações em serviço quanto à compressão máxima permitida. A frase “limite convencional estabelecido” leva à impressão de que se deve garantir sempre que as tensões

máximas de compressão sejam, na pior das hipóteses, iguais ou inferiores ao valor de f_{ck} mas, como se viu anteriormente, tal limitação não é segura.

No item 7.6.3.3. Código Modelo de 2010 (12), refere-se que tensões de compressão excessivas no concreto sob ações em serviço podem desencadear a fissuração longitudinal além de alta fluência. Segundo este código, quando as tensões de compressão para as combinações em serviço não excederem 60% de f_{ck} , é pouco provável que ocorra fissuração longitudinal. Este valor é também importante, sob as combinações quase-permanentes, para que as perdas de protensão e fluência sejam previstas com adequada acurácia.

O Eurocódigo 2 (13) aborda esta questão de maneira similar ao que faz o Código Modelo, limitando, também, em 60% as tensões de compressão no concreto por ocasião da protensão. Esta regulamentação adicionalmente recomenda que caso as tensões na fase de operação excedam 45% de f_{ck} , é necessário levar em consideração o efeito não linear da fluência.

Sabe-se que a baixa resistência à tração do material concreto, que enseja a utilização de armaduras para resistir adequadamente aos esforços solicitantes, é uma das causas da fissuração que não pode, de todo, ser evitada. A fissuração por tensões de tração ocorre a partir do instante em que a resistência à tração do concreto é atingida. Como estruturas em serviço podem estar sujeitas a esforços maiores que esta resistência, determinados níveis de fissuração devem ser esperados. Isto é crítico em estruturas portuárias, cujo ambiente marinho é bastante agressivo pois, como se viu, a existência de porções “desprotegidas” da armadura torna-se uma porta de entrada para a corrosão. Por isto, as regulamentações em geral, trazem limites rígidos quanto às aberturas de fissuras toleradas. A NBR:6118 preconiza que para a Classe de Agressividade Ambiental IV (respingos de maré) devem ser observadas fissuras características com abertura inferior a 0,2 mm. No caso da utilização da protensão com pós-tração, devem ser garantidos os atendimentos ao Estado Limite de Formação de Fissuras ($\sigma_{m\acute{a}x} < f_{ct}$) para a combinação frequente de ação e ao Estado Limite de Descompressão ($\sigma_{m\acute{a}x} < 0$) para a combinação quase-permanente de ações. Toleram-se contudo, o atendimento ao Estado Limite de Descompressão Parcial para esta mesma combinação de ações, desde que a região tracionada se encontre a pelo menos 50 mm de distância das bainhas de protensão. No caso de estruturas portuárias, é comum o aparecimento de tensões de tração no bordo superior das vigas transversais à frente do cais. Isto é devido ao posicionamento das sobrecargas em seu local mais desfavorável, mas também, e principalmente, às ações de atracação, que provocam ações de flexo-tração nos paramentos da estrutura.

O Eurocódigo 2 preconiza que para estruturas localizadas na zona de variação e de respingos de maré (classe de exposição XS3), deve-se verificar aberturas de fissuras inferiores a 0,3mm considerando a combinação quase-permanente de ações no caso de concreto armado ou o estado de descompressão para concreto protendido com aderência. É interessante notar que o estado de descompressão estabelecido pelo Eurocódigo não requer a ausência de tensões de tração em toda a seção, mas sim que as bainhas de protensão encontrem-se pelo menos a uma distância de 25 mm da zona tracionada, sendo semelhante ao requisito do ELS-DP estabelecido pela NBR 6118.

O Código Modelo de 2010 também agrupa as estruturas portuárias na classe de exposição XS3, cuja definição é análoga à do Eurocódigo. Para membros sujeitos à flexão, como é o caso de vigas, o Código Modelo preconiza que não deve haver tensões de tração a uma distância de 100 mm da face das bainhas de protensão, sendo mais uma vez uma condição análoga ao estado de descompressão parcial recomendado pela NBR:6118.

Características dos materiais visando à durabilidade da estrutura

Visando a obter uma vida útil de 50 anos, de acordo com os preceitos da NBR 6118, Eurocódigo 2 e correlatas, especificam-se algumas características esperadas para os materiais a serem empregados na construção do cais.

Em relação ao concreto a ser empregado, de acordo com a NBR 6.118, item 6.4.2, este tipo de estrutura encontra-se na Classe de agressividade Ambiental IV, com agressividade considerada Muito Forte e risco de deterioração da estrutura elevado. Por isto, de acordo com o item 7.4.2, exige-se concreto de classe C40 (40 MPa) ou superior e relação água/cimento, em massa, menor que 0,38 e dosagem mínima de cimento de 340 kg/m³ de acordo com (14).

Outra verificação importante quanto à durabilidade diz respeito ao teor de íons cloreto. A NBR 12655:2015 (15), em seu item 5.2.2.4, estabelece, para o caso do concreto, pretendido, que o valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos, não pode exceder a 0,05% sobre a massa de cimento. Além disso, essa norma refere que não é permitido o uso de aditivos contendo cloretos em sua composição em estruturas de concreto armado ou pretendido. A NP EN 206-1:2013 (16) no seu item 5.2.7, refere que o máximo teor de cloretos no concreto com armaduras pretendidas não deve exceder a 0,10% por massa de cimento ou, quando forem utilizadas adições (cinza volante e sílica de fumo), a 0,20% da massa de cimento mais a massa total das adições consideradas.

Em relação ao cimento a ser utilizado, recomenda-se o uso de um cimento CPIII, que, de acordo com a NBR 5735 é o que apresenta maior teor em massa de escória de alto forno. Podem ser consideradas adições de pozolanas e sílica ativa em teor maior ou igual a 20% em massa. Podem ser utilizados quaisquer agregados graúdos para concreto, desde que atendam às especificações da NBR 7.211:2009 especialmente nos itens tocantes às tolerâncias aceitáveis de substâncias agressivas, teores de cloretos e sulfatos. Em relação ao agregado miúdo, este deve ser de material quartzoso ou mesmo areia artificial resultante de britagem de rochas estáveis, isenta de substâncias agressivas. Deve ser utilizada água tanto para confecção do concreto quanto para cura úmida que seja isenta de teores prejudiciais de substâncias agressivas, de acordo com a NBR 15.900:2009.

Plano de manutenção preventiva

Prevêem-se a seguir alguns ensaios a serem realizados no âmbito do Controle de Qualidade do Concreto e num Plano de Manutenção Preventiva, a fim de assegurar a vida útil de projeto especificada e o monitoramento das mudanças das características originais da estrutura.

Quanto ao controle de qualidade do concreto, além dos ensaios tradicionais realizados aos 28 dias para avaliação da resistência à compressão e módulo de elasticidade, devem ser previstos também ensaios para avaliação da resistência à tração por compressão diametral. Isto porque, de acordo com GjØrv (17), no concreto sem fissuras, a penetração de cloretos pode ocorrer, principalmente, por difusão e por absorção de água contaminada por capilaridade. Assim sendo, para melhor garantir a durabilidade das peças, é importante que o concreto utilizado em obra passe por alguns ensaios comprobatórios de sua qualidade. Dentre eles o de absorção de água por capilaridade, que é regulado pela ABNT NBR 9779:2012 (18) e o de difusibilidade de íons de concreto, cujo ensaio pode ser feito de acordo com os preceitos da norma americana ASTM C1202 – 97 (19).

O Plano de Manutenção prevê duas análises: O acompanhamento da penetração dos íons cloreto e sulfato, a partir do traçado da curva correspondente ao perfil de penetração desses íons no concreto e da frente de carbonatação, com periodicidade anual, e o monitoramento da corrosão das armaduras.

A determinação do teor de cloretos geralmente é realizada em laboratório químico, a partir de amostras do concreto. Os métodos de determinação de cloretos em concretos envolvem basicamente técnicas analíticas clássicas como a gravimetria, a titulometria, a potenciometria e os métodos microanalíticos como a cromatografia de íons. Os cloretos livres ou solúveis em água são os que efetivamente causam a corrosão das armaduras, porém é conveniente determinar-se os cloretos totais, ou seja, aqueles fixados sob a forma de cloroaluminato de cálcio ou combinados no agregado graúdo, pois parte dos cloretos combinados pode vir a ficar disponível para reações deletérias. A determinação dos teores de cloretos livres pode ser feita através da ASTM C 1218 (20), enquanto a determinação dos cloretos totais pode ser feita segundo as normas ASTM C 1152 (21) e ASTM C 114 (22) que prescrevem a extração de cloretos totais mediante processo de solubilização por ataque ácido.

Em relação ao monitoramento da corrosão das armaduras, este procedimento pode ser realizado através de duas técnicas, a dos potenciais de corrosão e a da resistividade elétrica. O método de ensaio dos potenciais de corrosão refere-se a uma técnica de natureza eletroquímica, largamente utilizada para o monitoramento da corrosão. Com esta técnica é possível fazer-se o mapeamento de potenciais de corrosão nas estruturas, identificando-se as áreas anódicas de corrosão. A partir do traçado das curvas equipotenciais pode-se identificar as áreas do elemento estrutural cuja presença de corrosão seja bastante provável (áreas de corrosão ativa). Esta norma ainda apresenta os critérios de avaliação para as medidas de potencial. A outra técnica é a de resistividade elétrica. O processo eletroquímico que rege a corrosão das armaduras dependem do acesso de oxigênio às barras e da resistividade elétrica, ou seja, da condutividade iônica do eletrólito (fase líquida do concreto). A NBR 9204 (23) apresenta um método de ensaio para determinação da resistividade elétrica do concreto.

Bibliografia

- (1) OLIVEIRA, LOSB. **Avaliação de cais protendido com pós-tração considerando a durabilidade – análise numérica**. Tese de Mestrado da UERJ. Rio de Janeiro, 2016
- (2) NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.
- (3) METHA, P; MONTEIRO, P. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.
- (4) BALLESTEROS, A. **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de Sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado da PUC-RIO, 2009.
- (5) GENTIL, V. **Corrosão**. 3.^a Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Edistora S.A., 1994.
- (6) NOGUEIRA, K. **Reação Álcali-Agregado: Diretrizes e Requisitos da NBR 15577:2008**. Belo Horizonte: Monografia de curso de especialização em engenharia civil da UFMG, s/d.
- (7) DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 119/2009 – ES. Pontes e Viadutos Rodoviários – Armaduras para concreto Protendido – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2009
- (8) NÜRNBERGER, U. **Korrosionbedingte Versagensmechanismen bei Spannstahl**. Otto-Graf Journal, Stuttgart, 2002, pp 9-25.

- (9) **Influence of Material and Processing on Stress Corrosion Cracking of Prestressing Steel (Case Studies)**. Boletim FIB n.º 26, Berlim, 2003.
- (10) SHUPACK, M. O'NEIL, E. **Durability of Posttensioned Concrete After 33 years of Marine Exposure**. US Army Corps of Engineers. Vicksburg, MS, p. 86. 1997.
- (11) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2014.
- (12) CEB-FIB. **Código Modelo 2010**. s/1, 2010.
- (13) CEN. **EN 1992-1-1 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. s/1, 2010.
- (14) Federal Highway Administration. **Cable Stays of Cable-Stayed bridges – Technical Advisory**. Washington, 1994.
- (15) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12.655:2015 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- (16) CEN. **EN 206-1:2007 – Betão Parte I: Especificação, desempenho, produção e conformidade**. IPQ, s/1, 2007.
- (17) GJØRV O; PAZINI, T. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambiente de severa agressividade**. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- (18) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9779:2012 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- (19) ASTM. **C 1202-97 – Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. S/1, 1997.
- (20) ASTM. **C1218/C1218M-15 – Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete**. S/1 2015.
- (21) ASTM **C 1152-15 – Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete**. S/1, 2015.
- (22) ASTM. **C 114-15 – Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement**. S/1, 2015
- (23) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9204:2012 – Concreto endurecido – determinação da resistividade elétrica-volumétrica – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- (24) HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado: Tese de Livre Docência**. São Paulo: USP, 1993.
- (25) HELENE, P. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. In: Como Projetar para a Durabilidade - 2.ª Parte**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.