Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho: estudo de caso

Adriana Araujo[1], Zehbour Panossian[2]

Abstract

The durability of concrete structures depends on a series of design, construction and maintenance requirements. However, these requirements are not an easy task. For example, the maintenance efficiency, that must be undertaken regularly, depends on the correct selection and implementation of conservation and rehabilitation techniques. This paper presents the consequences of an ineffective maintenance practice of two reinforced concrete piers exposed to a marine environment. One of the piers was built recently (New Pier) and the other one has existed for over 40 years (Old Pier). In both piers, pathological manifestations were observed. Some of them were studied in detail through laboratory and field tests. In the Old Pier, the original concrete as well as the repaired concrete presented pathological manifestations related to a corrosion process of the reinforced steel. This process was confirmed through the results obtained from open-circuit-potential and corrosion-rate field measurements and through the high chloride levels detected in the concrete near the reinforcement steel bars. The New Pier presented construction problems. The chloride profile obtained for this pier through laboratory tests showed the begining of chloride penetration in the concrete.

Keywords: marine corrosion, pier, durability, reinforced concrete and electrochemical test.

Resumo

A durabilidade das estruturas de concreto depende do atendimento a uma série de requisitos de projeto, execução e manutenção. No entanto, este atendimento não é uma tarefa fácil. Por exemplo, a eficência da manutenção, que deve ser realizada periodicamente, depende da correta seleção e execução das técnicas de conservação e recuperação. Neste trabalho, são apresentadas as conseqüências da manutenção ineficiente das estruturas de concreto de dois píeres expostos a um ambiente marinho. Um dos píeres era recém-construído (Píer Novo), enquanto o outro tinha sido constuído há mais de 40 anos (Píer Velho). Em ambos os píeres, manifestações patológicas foram observadas, sendo parte delas investigadas em ensaios complementares tanto de campo como de laboratório. No Píer Velho, tanto no concreto original como no recuperado, foram observadas anomalias relacionadas à corrosão, processo este confirmado pelos resultados das medidas de potencial de circuito aberto, dos valores de taxas de corrosão determinados em campo e dos altos teroes de cloreto encontrados no concreto junto à armadura. No Píer Novo, falhas construtivas foram

[1] Mestre em Habitação: Tecnologia das Construções, Pesquisadora do Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: aaraujo@ipt.br).

[2] Doutora em Ciências, Responsável pelo Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: zep@ipt.br).

INTERCORR 2010 ABRACO
Centro de Convenções do Hotel Praia Centro
Fortaleza/CE · 24 a 28 de Maio

observadas, tendo sido verificado um início de penetração de cloretos no concreto de cobrimento.

Palavras-chave: corrosão ambiente marinho, píer, durabilidade e medidas eletroquímicas.

1. Introdução

Neste trabalho, são apresentados os resultados da avaliação do estado de conservação de dois píeres, um existente há mais de 40 anos (denominado neste trabalho como Píer Velho) e outro recém-construído (denominado neste trabalho como Píer Novo).
Os trabalhos foram iniciados com o reconhecimento do local, sendo realizada uma inspeção visual preliminar das estruturas de ambos os píeres e uma análise tanto da documentação técnica disponível como das condições de exposição local. Com base nos resultados obtidos, as seguintes atividades foram realizadas:

- inspeção visual detalhada da estrutura principal dos píeres;
- ensaios em campo e em laboratório para a determinação da profundidade de carbonatação e do teor de cloreto e de parâmetros eletroquímicas e para a caracterização do concreto;
- análise dos resultados e conclusão e recomenção de conservação das estruturas.

2. Revisão bibliográfica

Em ambiente marinho, as estruturas de concreto estão sujeitas à corrosão pela penetração externa de íons cloreto no concreto de cobrimento. Esta penetração ocorre devido à constante presença de névoa salina na atmosfera, a qual é a condição mais caracteristica do ataque de cloretos neste ambiente. Além desta condição de exposição, destaca-se o contato direto do concreto com a água do mar e suas ondas e respingos, que ocorre em estruturas localizadas à beira mar, como píeres.
Perante essas condições de exposição, o ambiente marinho é apresentado na NBR 12655 (1) como uma condição especial, sendo que, na NBR 6118 (2), este ambiente é classificado como de agressividade forte a muito forte às estruturas de concreto. Em tal agressividade, as normalizações estabelecem alguns parâmetros para a obtenção de um concreto de qualidade, como os descritos na Tabela 1.
Em função da alta agressividade, há uma constante preocupação quanto à durabilidade das estruturas de concreto no ambiente marinho. Considerando que a deterioração da estrutura pode ocorrer em curto intervalo de tempo, a estratégia mais apropriada para este ambiente seria adotar um concreto de qualidade e também uma proteção (3). Isto porque, em ambiente contaminado com cloretos, dificilmente uma adequada durabilidade é garantida somente com a especificação das características do concreto, como resistência, porcentagem de cimento e relação água/cimento (4).
A mencionada proteção é reconhecida com uma técnica que pode garantir e estender a vida útil das estruturas. No Brasil, a única técnica disseminada é a proteção superficial do concreto com revestimentos por pintura ou por argamassa cimentícia, os quais, no exterior, têm normalização específica para seleção e controle da qualidade de aplicação, como as Partes 2, 3 e 10 da BS EN 1504 (5-7). Outra técnica bastante disseminada, embora de uso restrito e pouco estudada no Brasil, é a proteção catódica. Como referência de

normalização, cita-se a NACE SP0290 (8) para aplicação de sistema de corrente impressa e a NACE 01105 (9) para sistema de proteção galvânica.
Dentre outros parâmetros relacionados à durabilidade das estruturas de concreto, destaca-se a importância da manutenção periódica da edificação como um todo. No entanto, segundo a NBR 5674 (10), é frequente a sua omissão nas edificações brasileiras, como pontes e viadutos, as quais são retiradas de serviço prematuramente, antes do cumprimento de sua vida útil projetada. Tal normalização estabelece os procedimentos de manutenção, a qual é definida como sendo um serviço realizado na edificação e em suas partes constituintes para conversar ou recuperar a sua capacidade funcional.
Dada à importância da manutenção, a NBR 14037 (11) descreve que as edificações devem disponibilizar um manual para orientar as atividades de manutenção da edificação, além de contribuir para o aumento de sua durabilidade, prevenir a ocorrência de falhas e acidentes e apresentar as documentações técnicas. Além da disponibilização do manual, deve-se considerar a importância do envolvimento de profissionais capacitados e experientes na necessária avaliação das estruturas de concreto e na determinação das técnicas de proteção e de recuperação.

3. Reconhecimento das estruturas e das condições locais de exposição

3.1 Descrição das caracteristicas da estrutura dos píeres e intervenções de manutenção

Embora para em ambos os píeres não existisse um manual de manutenção, a recente construção do Píer Novo possibilitou levantar facilmente importantes documentações técnicas, fato que ocorreu de forma restrita para o Píer Velho.
A análise da documentação indicou que o Píer Velho foi edificado no início dos anos 60 da década passada, tendo-se uma Ponte de Acesso e um píer de atracação de navios denominado Píer de Atracação 1. No início dos anos 70, da década passada, houve uma ampliação, com a construção do Píer de Atracação 2. O Píer Novo foi construído em 2005, no mesmo canal de localização do Píer Velho. A extensão total aproximada dos píeres é de 3 km..
A estrutura principal do Píer Velho apresenta características de um tabuleiro de ponte de rolagem que, além de permitir a circulação de veículos e de pedestres, é apoio de uma rede de tubulações, denominada tubovia. O Píer Novo tem caracteristicas similares, entretanto, somente é apoio de uma tubovia. A Figura 1 apresenta um corte da estrutura principal do Píer Novo e da Ponte de Acesso do Píer Velho.
A estrutura principal dos píeres é composta basicamente por vigas longitudinais apoiadas em cavaletes (conjunto de viga transversal com um número variável de estacas engastadas) que se repetem ao longo de sua extensão. As vigas longitudinais são longarinas de concreto armado pré-moldado, com exceção no Píer de Atracação 2 as quais são vigas protendidas. No Píer Novo, a maioria das estacas é de concreto protendido e na Ponte de Acesso de concreto armado, as demais, e nos Píeres Norte e Sul, são de concreto armado com camisa de aço. Embora estas estacas não fossem contempladas no estudo, é importante citar que elas estavam protegidas catodicamente por corrente impressa. As vigas transversais são transversinas de concreto armado, sendo que, na Ponte de Acesso e no Píer Novo são compostas de uma peça pré-moldada na parte inferior, entretanto, as suas aberturas para o

engaste das estacas são preenchidas com concreto moldado no local, assim como é a sua parte superior e as lajes. No Píer de Atracação 2, a maioria dessas vigas é pré-moldada.
Em geral, na Ponte de Acesso e no Píer Novo, a cada seis vãos da estrutura principal, as vigas aos extremos são isostáticas, tendo-se placas e roletes metálicos como aparelho de apoio. No Píer de Atracação 2, na maioria dos vãos as vigas são isostáticas, tendo-se placas de chumbo como apoio fixo, o que ocorre a cada quatro vãos. Alternadamente, a cada oito vãos, os apoios passam a ser livres, tendo-se placas de neoprene como aparelho de apoio. Este último tipo de aparelho também é adotado no Píer Novo, a cada seis vãos.
O Píer Novo não sofreu nenhuma intervenção deste a sua construção, enquanto, em 1993, o Píer Velho teve a sua primeira grande manutenção de recuperação, sendo a maioria das estacas da Ponte de Acesso encamisada por apresentavam anomalias relacionadas à corrosão. A mesmo intervenção foi feita nos demais elementos desta estrutura e na do Píer de Atracação 1 em 1998. Com base nestes dados e considerando que a fissuração de corrosão no concreto de cobrimento ocorre, geralmente, após 10 anos do seu início (12), a despassivação da armadura no Píer Velho ocorreu, provavelmente, antes de 1985. Nesta hipótese, a vida útil de projeto da estrutura foi esgostada em torno 20 anos da sua construção.
A documentação disponível também aponta a ocorrência de muitas intervenções de recuperação e reforço devido à ocorrência de acidentes, tendo-se o maior deles ocorrido no Píer de Atracação 2. Além da recuperação geral de grande trecho desta estrutura, o projeto apontou a substituição de parte das vigas protendidas.

3.2 Condições de exposição ao ambiente marinho tropical

O trecho emerso das estruturas dos píeres está sujeito ao ataque dos íons cloreto pela exposição à névoa salina, às ondas de marola e seus respingos e à variação de maré. A exceção, devido às características do local, é a exposição às arrebentações.
Dentre os elementos principais das estruturas, as vigas longitudinais estão sujeita à ação da névoa salina e, esporadicamente, aos respingos. O mesmo ocorre nas vigas transversais, entretanto, a proximidade de algumas delas ao mar também promove, eventualmente, a exposição às ondas de marola.
Nas estacas, soma-se a ação da variação de maré, a qual deve propiciar uma maior penetração de íons cloreto no concreto, o que inclui o seu trecho logo superior ao exposto à maré. O contato direto com a água do mar também deve propiciar a saturação do concreto, nesta condição é esperada a restrição do acesso do oxigênio na região da armadura. Sendo esse o agente oxidante principal para o estabelecimento da corrosão e de controle de sua velocidade.
Grande parte da estrutura emersa está, também, sujeita à água pluvial, ao vento, à insolação, à água de condensação do mar e à carbonatação, a saber:

- água pluvial: propicia a lavagem das faces superiores e de muitas das faces laterais dos elementos das estruturas, carreando para as faces inferiores partículas sólidas de cloreto de sódio (sais de cloreto) e de material particulado (fuligem). Isto facilita o enriquecimento do concreto com cloreto, o que torno esta região crítica para a corrosão. O enriquecimento do concreto com cloreto também é esperado em locais com acúmulo e infiltração de água pluvial contaminada, assim como em locais com falhas de execução,

como porosidade superficial, fissuração, variação da espessura de cobrimento e menor homogeneidade da massa do concreto. A média pluviométrica anual da região está em torno de 2.000 mm, sendo sua ocorrência mais predominante na primavera e verão, ao entardecer e à noite;

- vento: exerce uma pressão significativa na superfície do concreto, o que aumenta o impacto da água pluvial e o acúmulo de fuligem e sais de cloreto. Além disto, o vento também colabora para a secagem do concreto e, ao longo dos anos, com o seu desgaste superficial;
- insolação: em clima tropical, os raios solares podem elevar bastante a temperatura ambiente e, também, a temperatura superficial do concreto, reduzindo o grau de sua umidade. Cita-se que a umidade relativa na região oscila bastante, sendo estimado que durante o dia, esteja entre 60 % e 75 % o que é superado no período noturno. A temperatura ambiente oscila em torno de 15 ^{o}C (julho) e de 39 ^{o}C (janeiro);
- condensação da água: gotículas de água podem se depositar na superfície da face inferior dos elementos das estruturas, o que ocorre de forma mais intensa nos elementos de maior próximidade ao mar. Neste caso, e considerando que na face inferior não há incidência direta de raios solares e há pouca ação do vento, pode ser estabelecido facilmente um microclima adequado para a manutenção da umidade superficial, o que acelera a penetração de cloretos e o desenvolvimento de fungos e de limo;
- carbonatação: é sabido que as reações químicas entre o dióxido de carbono e compostos do cimento reduz o pH do concreto de cobrimento, sendo que, quando esta redução atinge a armadura, há condições para a sua despassivação e o início de um processo corrosivo. Este fenômeno, denominado carbonatação, ocorre em velocidade significativa quando o concreto se mantém úmido, entre teores de 50 % a 75 % (13). Em ambiente marinho, estes teores são comuns no concreto dos elementos mais sujeitos à insolação e ao vento. No entanto, na proximidade ao mar, são esperados períodos longos de manutenção da umidade superficial do concreto, em teores superiores aos descritos.

4. Metodologia

4.1 Inspeção visual

A inspeção visual consistiu do exame, a olho desarmado, da parte inferior exposta da estrutura principal de cada um dos píeres, excluíndo as estacas metálicas. Para tanto, foi utilizada uma embarcação, sendo que no período de maré-baixa era priorizado o exame da infra-estrutura e, o de maré-alta, o da superestrutura.

Embora a inspeção visual tenha sido feita ao longo de toda a extensão dos píeres, a concepção de sua estrutura principal, com muitos vãos idênticos, permitiu adotar uma metodologia em que somente alguns deles, com anomalias representativas, fossem examinados detalhadamente. Para tanto, era feito, além do usual registro e a quantificação das anomalias, um registro fotográfico e elaborados croquis.

Para o exame visual, foi considerada a verificação na inspeção preliminar, da necessidade de tratamento superficial geral da superfície do concreto das estruturas, incluindo a remoção das pinturas (tinta preta betuminosa e amarela alquídica), consideradas

inadequadas como proteção superficial do concreto. Esta pintura estava presente na estrutura da Ponte de Acesso, Píer de Atracação 2 e parte do Píer de Atracação 1. O exame também considerou a identificação dos tipos de anomalias existentes nas estruturas durante a inspeção preliminar. A Tabela 2 foi elaborada com base nessa identificação e a consulta ao Glossário Técnico da empresa Maubertec (14).

4.2 Ensaios em campo e em laboratório

Embora o exame visual seja bastante versátil e eficaz para o reconhecimento do estado de conservação de uma estrutura, ele se limita à análise superficial. Desta forma, é recomendada a realização de outros ensaios que avaliam a parte interna da estrutura, dentre os quais os seguintes foram selecionados:

- profundidade de carbonatação no concreto (por fratura e perfuração), espessura de cobrimento e diâmetro da armação principal;
- teor de cloreto no concreto de cobrimento;
- potencial de corrosão e taxa de corrosão e resistividade elétrica.

Além desses ensaios, foram extraídos corpos-de-prova para a caracterização física e mecânica do concreto das estruturas. Conforme limitações de condições de trabalho, os ensaios (com exceção do ensaio de carbonatação por fratura) foram restringidos a um vão pré-selecionado de cada estrutura, sendo realizados em regiões de concreto íntegro e representativo das diferentes condições de exposição. As medidas eletroquímicas também foram limitadas à realização em uma única estação do ano em que as temperaturas médias eram em torno de 25 ºC e umidade relativa em torno de 70 %. Cita-se que estas medidas e demais ensaios devem ser vistos com critério, pois as restrições das condições de sua realização podem refletir nos resultados, podendo não ser sempre representativos.
Nas Tabelas 3 a 5, a identificação adotada para os ensaios de teor de cloretos é apresentada e, também, a descrição sucinta das características dos elementos principais selecionados e das condições de exposição mais importantes às quais estão sujeitos.

4.2.1 Profundidade de carbonatação, espessura de cobrimento e diâmetro da armadura

O ensaio de determinação da carbonatação foi feito de duas maneiras. A primeira consistiu da perfuração, em etapas, do concreto em três locais pré-selecionados. Cada etapa da perfuração consistia em um pequeno avanço do furo e verificação da ocorrência ou não da carbonatação. Para tal, era aspergida, na área interna e externa do furo, uma solução de fenolftaleína e, em seguida, observada a ocorrência ou não da alteração de coloração (parte incolor do concreto de cobrimento corresponde à camada carbonatada e, a parte de coloração rósea a vermelho-carmim, corresponde à camada de concreto não-carbonatada). A segunda maneira foi feita por fratura do concreto de cobrimento conforme a DIN EN 14630 (15). Na oportunidade, foi verificada a espessura do concreto de cobrimento, o diâmetro efetivo da armadura e, ainda, investigada a presença de anomalias na região fraturada.

4.2.2 Teor de cloreto no concreto de cobrimento

Para determinar o teor de cloreto livre ao longo do concreto de cobrimento, foi necessária a extração de material pulverizado em diferentes profundidades do concreto de cobrimento dos elementos pré-selecionados. Em cada profundidade era feita uma mistura de nove diferentes extrações. Nestas, foi determinado o teor de íons cloreto solúveis em água conforme ASTM C 1218 (16) e expresso em relação à massa de cimento.
Os resultados obtidos foram avaliados para verificar a probabilidade de ocorrência da despassivação da armadura e para determinar o perfil da profundidade de penetração no concreto de cobrimento. Para tal avaliação, foram adotados os valores limites de teores de cloreto apresentados na Tabela 1, os quais são similares aos apresentados pelo *Building Code* 318 (17), que define a concentração limite de teor de cloreto de 0,15 % sobre a massa do cimento em concreto armado e 0,06 % em concreto protendido.

4.2.3 Potencial de corrosão, taxa de corrosão e resistividade elétrica

A medida do potencial de corrosão consistiu da determinação da diferença de potencial elétrico entre a barra de aço e um eletrodo de referência que se coloca em contato com a superfície do concreto (18) dos elementos pré-selecionados. Os valores obtidos nestes elementos foram comparados com padrões preestabelecidos da ASTM C 876 (19) que apresenta as faixas de potenciais para o eletrodo de cobre/sulfato de cobre (ECSC). Este eletrodo é adotado nos três sensores do Gecor 8, equipamento utilizado para a obtenção automática tanto do potencial de corrosão como da taxa de corrosão e da resitividade elétrica do concreto. Destas medidas destaca-se a taxa de corrosão que é obtida pelo equipamento com a adoção da seguinte equação (20):

$$i_{corr} = \frac{1}{Rp} \frac{b_a \,.b_c}{2{,}303\,(b_a + b_c)} = \frac{B}{Rp}$$

Para tanto, o *software* do equipamento adota o valor da constante B e obtêm a resistência de polarização em torno da leitura do potencial de corrosão. Os possíveis valores da constante B, estado ativo de corrosão (B = 26 mV) ou passivo (B = 52 mV), são adotados pelo equipamente, bem como por muitos pesquisadores, como Andrade (21-22). Estes valores são válidos para sistema simples de corrosão metal/eletrólito e são obtidos pelo levantamento de curvas de polarização anódicas e catódicas com sobretensões da ordem de 250 mV em relação ao potencial de corrosão. O valor de 26 mV é assumido para o valor de b_a = 60 mV (aço ativo) e o valor de b_c tendendo ao infinito (polarização por concentração da reação de redução do oxigênio). O valor de 52 mV é assumido quando b_a tende ao infinito (aço passivo) e o valor de b_c = 120 mV.
Para a avaliação dos resultados de taxa de corrosão foram adotados os critérios propostos em pesquisa de Alonso e Andrade (23) e Gonzalez e colaboradores (24), sendo que valores entre 0,1 $\mu A/cm^2$ e 0,2 $\mu A/cm^2$ representam um baixo risco de corrosão e, maiores que 0,2 $\mu A/cm^2$, a corrosão está ativa. No entanto, explica-se que estes valores não são absolutos, podendo a corrosão ter início em valores próximos a 0,1 $\mu A/cm^2$. Isto justifica poder ser adimitido que entre este valor e 0,2 $\mu A/cm^2$ os resultados indiquem uma transição do estado passivo do aço para o estado ativo (25).
Para avaliação da resistividade elétrica também foram adotados os valores propostos por Gonzalez e colaboradores (24), sendo que o risco de corrosão é elevado para resistividade

≤ 20 Ω.cm e médio para valores entre 20 kΩ.cm e 50 kΩ.cm. Tais valores são descritos no manual do equipamento adotado (26), que foi a base da elaboração do procedimento das medidas eletroquímicas.

Com base no estudo dos projetos das estruturas, foram marcados nos elementos selecionados alguns estribos e uma a duas das barras principais de sua armadura, sendo sempre priorizada a região de quinas entre faces, a qual está mais exposta à ação agressiva do ambiente. Como a grade formada pela a armadura não era uniforme e, ainda, havia limitações de trabalho no local, as medidas eletroquímicas foram feitas sem uma seqüência lógica. Para tanto, foram estabelecidos e numerados pontos nas barras e dos estribos, evitando locais de seu cruzamento. Nas Figuras 2 a 4 e nas Figuras 5 a 7 são apresentados desenhos esquemáticos da grade da armadura com os pontos de medição na Ponte de Acesso e no Píer Novo respectivamente. Na Figura 8, pode-se visualizar a grade em alguns elementos.
Antes da marcação, a superfície do concreto foi tratada para limpeza e remoção de revestimentos e de resíduos de concreto. Na Ponte de Acesso e no Píer de Atracação 2, o tratamento consistiu da remoção manual de uma grossa camada de tinta betuminosa e, posteriormente, lixamento mecânico. No Píer de Atracação 1 e no Píer Novo, o tratamento consistiu somente de um lixamento mecânico para limpeza superficial.
Em um trecho exposto e limpo da armadura foi fixado o terminal do equipamento (jacaré) do Gecor 8 para estabelecer contato elétrico, o qual tinha sua eficiência verificada com uso de um multímetro. Também antes da medição, a superfície do concreto era umidecida com pulverização manual de água potável por período de trinta minutos. Caso durante a medição fosse observada a secagem superficial do concreto, novas pulverizações eram realizadas. Na Figura 9, pode-se visualizar a realização de medição no Píer Velho.

4.2.4 Caracterização física e mecânica do concreto

Devido às restrições locais de trabalho foi necessário limitar ao máximo o número de ensaios para caracterizar o concreto dos elementos pré-selecionados das estruturas em estudo. Os seguintes ensaios foram definidos:

- resistência à compressão axial, conforme a NBR-5739 (27);
- absorção de água e massa específica, conforme a NBR 9778 (28).

Para a realização desses ensaios, foi feita a extração de dois testemunhos por elemento. Entretanto, na estaca, o mesmo testemunho foi utilizado para a determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios e, posteriormente, para a determinação da resistência à compressão. No caso dos demais elementos, foi possível realizar os ensaios em testemunhos distintos. As extrações foram feitas nas laterais das peças de concreto pré-moldado conforme procedimentos da NBR 7680 (29).

5. Resultados e discussão

5.1 Inspeção visual

A inspeção visual da Ponte de Acesso e do Píer de Atracação 1 do Píer Velho apontou um estado avançado de degradação da sua estrutura principal. Nesta, foi observada a presença

constante de áreas localizadas de concreto disgregado com armadura exposta (em estado avançado de corrosão) nas vigas, em destaque na sua face inferior e quinas com as faces laterais. Nestas vigas e nas estacas, também era frequente a presença de intervenções de recuperação consideradas inadequadas, estando a grande maioria das estacas encamisadas. Na face inferior das vigas transversais, ainda era expressiva a presença de concreto segregado (na região de engaste) e, nas laterais das vigas longitudinais, de fissuração vertical eqüidistante, cuja causa provável seria a retração do concreto. Como somente parte destas fissuras estava recuperada, foi suposto que parte ocorreu, posteriormente, tendo como causa o travamento dos aparelhos de apoio que se apresentavam com intensa corrosão. Devido à presença de corrosão e de outras anomalias na região destes aparelhos e, ainda, anomalias nos revestimentos de acabamento, no sistema de drenagem de água fluvial e nas juntas de dilatação, todos estes foram considerados inadequados. Sobre os revestimentos, frequentemente, eram observadas manchas e algumas áreas superficiais localizadas de concreto segregado e de porosidade superficial (vazios de bolhas de ar aprisionado). Nas Figuras 10 e 11, podem-se visualizar algumas destas anomalias.

A inspeção do Píer de Atracação 2 apontou também a presença de anomalias similares às descritas para as outras estruturas do Píer Velho. No entanto, era preocupante a presença de fissuração sistemática nas vigas longitudinais protendidas, sendo parte delas sobre os revestimentos de reparo, considerados também ineficientes. Nestas vigas, ainda havia áreas localizadas de concreto disgregado com armadura corroída, algumas com exposição de bainhas de protensão. Na Figura 12, podem-se visualizar algumas destas anomalias.

Embora a inspeção do Píer Novo não apontasse o estabelecimento de um processo corrosivo, frequentemente observou-se, ao longo da estrutura, anomalias relacionadas a falhas construtivas. A presença de fissuração sistemática ao longo das vigas longitudinais era a anomalia mais significativa, sendo parte destas (fissuras verticais equidistantes) julgada como resultante da retração do concreto e, outra parte (fissuras verticais concentradas na região de máximo momento fletor), resultante da flexão prematura das vigas, possivelmente durante transporte. Além disto, também era freqüente nestas vigas e nas transversais, a presença de áreas localizadas de manchas de eflorescências e umidade (com acúmulo de limo e fuligem), de porosidade superficial e de concreto segregado e, ainda, a presença de material residual de formas de concretagem e furos remanescentes de sua fixação. Nas estacas, era comum a presença de manchas localizadas de umidade, e de oxidação e de incrustações. Na Figura 13, podem-se visualizar algumas destas anomalias.

De forma geral, em ambos os Píeres havia uma tendência de concentração de manchas em região de acúmulo de água de escorrimento e de condensação e de água de infiltração (rede de drenagem e juntas de dilatação). Na região de falhas de execução, também era comum a concentração de manchas em destaque fissuração e concreto segregado. Estes dois tipos de anomalias também estavam presentes em ambos os píeres, sendo similar a configuração da fissuração nas vigas longitudinais de concreto armado e, a localização das áreas de concreto segregado, comum nos engastes das estacas, nas quinas das faces das vigas e na união de tábuas de formas de concretagem.

5.2 Profundidade de carbonatação, espessura de cobrimento e diâmetro da armadura

Em todas as estruturas do Píer Velho, os resultados obtidos indicaram que a frente de carbonatação era pouco significativa, haja vista a sua baixa espessura média em relação à espessura total do concreto de cobrimento. No Píer Novo, os valores obtidos eram inexpressivos. Com base nestes resultados, a corrosão observada durante a inspeção do Píer Velho não teria como causa provável a carbonatação do concreto de cobrimento.
Em geral, no Píer Velho, foi verificada uma variação na espessura do concreto de cobrimento, embora não era significativa em relação ao especificado em projeto, o qual, aliás, era inferior ao atual parâmetro normativo da. NBR 6118 e da NBR 12655 (ver Tabela 1). Na inspeção visual, esta variação pôde ser observada em áreas de concreto disgregado com armadura exposta. No Píer Novo, foi verificado o atendimento tanto a espessura definida em projeto como a normalizada na NBR 6118.
A determinação do diâmetro da armadura indicou que em nenhuma das estruturas do Píer Velho havia perda expressiva de seção do aço armaduras, embora a corrosão estivesse estabelecida na maioria das áreas fraturadas. No entanto, na inspeção visual, foi observada em áreas com concreto disgregado com armadura exposta uma corrosão intensa, indicando perda de seção. No Píer Novo, foi verificado o atendimento ao projeto.

5.2.1 Análise de anomalias em regiões fraturadas no ensaio de carbonatação

A fratura do concreto confirmou que as fissuras longitudinais, existentes em quinas das vigas longitudinais do Píer Velho, eram resultantes de corrosão da armadura, embora a massa do concreto não estivesse carbonatada. Na inspeção visual, tais áreas nos elementos das estruturas foram identificadas como de concreto disgregado.
Na fratura de fissuração transversal, de causa provável a retração do concreto, a corrosão da armadura também foi observada. Neste caso, pôde-se supor que a presença de fissura teria acelerado a penetração de agentes agressivos. Esta corrosão já era esperada em parte das vigas devido à visualização de manchas de oxidação na sua face inferior. Entretanto, a fratura também permitiu observar que algumas destas manchas eram resultantes da contaminação do concreto (com fios de arame de amarração e pregos). Na Figura 14, pode-se visualizar um trecho de uma destas fissuras fraturadas e a armadura exposta, tendo-se parte de estribo passivado (no trecho acinzentado na face lateral da viga), parte de estribo despassivado (trecho escuro na face inferior) e outra parte (na quina das faces) com acúmulo de produtos corrosão (coloração esverdeada).
Em área de intervenção de reparo (com argamassa cimentícia) em parte recuperada do Píer de Atracação 2 do Píer Velho, podê-se observar, quando da fratura de uma viga longitudinal protendida e outra transversal, que a espessura deste reparo era irregular, além de estar totalmente carbonatado. Entretanto, o concreto de cobrimento estava preservado e a armadura exposta não apresentava corrosão. Já na fratura de outra viga protendida, próximo a uma área de concreto disgregado, a corrosão foi observada tanto na armadura como em bainha e cabo de proteção. Tal corrosão já tinha sido visualizada em algumas vigas durante a inspeção visual.
A mencionada contaminação do concreto, em local com manchas de corrosão, também foi observada em estacas do Píer Novo. Neste caso, a fratura local mostrou a presença de fibras de aço na massa do concreto. Quanto à fissuração sistemática nas vigas longitudinais, a fratura local (ver Figura 13) permitiu observar que havia fissuras posicionadas no

alinhamento do estribo e que sua profundidade era equivalente à camada do concreto de cobrimento. Praticamente, o concreto não estava carbonatado, sendo que, a armadura se apresentava acinzentada, indicando claramente estado passivo de corrosão.

5.3 Teor de cloreto no concreto de cobrimento

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos teores de cloreto no Píer Velho. Pode-se observar que em todos os elementos estruturais avaliados, quase a totalidade dos teores obtidos na região da armadura ultrapassaram os limites normalizados (ver Tabela 1). Os teores obtidos na viga longitudinal do Píer de Atracação 2 são preocupantes, por esta viga ser protendida. Com base nestes resultados e os obtidos nos ensaios de carbonatação (Item 4.1) a corrosão das estruturas do Píer Velho foi considerada como resultante da penetração de íons cloreto no concreto de cobrimento.

Os perfis obtidos nas estruturas do Píer Velho indicaram a maior penetração de cloreto nas vigas transversais e na estaca, o que era esperado pela condição ambiental agressiva que os mesmos estavam expostos e, também, devido à presença de anomalias e intervenção nestes locais, verificadas durante a inspeção visual. Na face inferior destas vigas e da longitudinal, foram obtidos teores de cloreto bem elevados, também confirmando a consideração desta face ser crítica para a corrosão (ver Item 3.2).

A Tabela 8 apresenta os resultados dos teores de cloreto no Píer Novo. Pode-se observar que em todos os elementos estruturais avaliados, a totalidade dos teores de íons cloreto obtidos na região da armadura manteve-se abaixo dos valores limites normalizados. Em alguns, foi observado um início de penetração externa de íons cloreto, em destaque na face inferior da viga transversal e na estaca. Para melhor análise destes resultados, foram realizados ensaios complementares, nos quais foi descartada a possibilidade de contaminação com cloretos dos materiais utilizados na composição do concreto. A presença de cloreto na estrutura do Píer Novo foi considerada como resultante da agressividade ambiental, embora a presença de anomalias seja um fator acelerador da penetração. Nas vigas transversais, a análise das condições locais (Item 3.2) apontou a ação de água de escorrimento e de condensação e de respingos e, nas estacas, de marolas e respingos.

5.4 Potencial de corrosão, taxa de corrosão e resistividade elétrica

No Píer Velho, em que foi verificado processo corrosivo nas estruturas, definiu-se a taxa de corrosão como parâmetro eletroquímico mais importante para complementar os demais ensaios. Isto porque, a sua obtenção possibilita um posterior estudo de vida útil das estruturas. Para tal medida, foi utilizado o Sensor A do Gecor 8, que permitiu também a obtenção simultânea do potencial de corrosão. No Píer Novo, em que não havia indícios de corrosão, o potencial de corrosão e a resistividade elétrica do concreto foram considerados as medidas mais importantes, sendo obtidas simultâneamente com o Sensor B. Em carácter investigativo, também foi obtida a taxa de corrosão em alguns pontos.

As Tabelas 9 a 13 apresentam os resultados das medidas eletroquímicas (ver localização dos pontos nas Figuras 2, 3 e 4) no Píer Velho. Pode-se observar que, na Ponte de Acesso, tanto as barras como os estribos dos elementos avaliados apresentaram taxas de corrosão

expressivas, sendo que, os maiores valores foram observados nos estribos. Estes resultados foram coerentes com os teores críticos de cloreto determinados na região da armadura e com a visualização na inspeção de anomalias relacionadas a um estado ativo de corrosão. Quanto aos resultados de potenciais de corrosão, quase a totalidade dos valores obtidos nas vigas eram mais positivos do que o valor representativo de um estado ativo de corrosão, o que pode ser justificado pela influência dos seguintes fatores (30):

- polarização por resistência causada pela formação de produtos de corrosão na superfície da armadura (a Figura 15 mostra a fratura da viga longitudinal, sendo confirmado o estado ativo de corrosão da armadura e o acúmulo de produtos de corrosão);
- baixo teor de umidade no concreto de cobrimento (exposição periódica à água pluvial). Cita-se que o umidecimento realizado por ocasião das medidas satura somente alguns milímetros da camada superficial do concreto;
- alto teor de oxigênio no concreto de cobrimento, que ocorre quando a sua umidade é baixa.

No concreto das estacas expostas constantemente à água do mar e suas marolas e, ainda, com fixação de incrustações, é esperado um teor de umidade mais elevado, o que reflete na obtenção de potenciais mais negativos na armadura local, fato ocorrido. A elevada umidade também resulta na diminuição da resistência elétrica e do teor de oxigênio no concreto que influencia na taxa de corrosão, que é reduzida. Este parecer justifica a visualização na inspeção de poucas anomalias relacionadas à corrosão na região exposta a variação de maré e, ainda, a concentração das intervenções de reparo no trecho mais superior a esta região.

No Píer de Atracação 1 e no Píer de Atracação 2 do Píer Velho, as medidas eletroquímicas indicaram a presença de corrente de interferência oriunda da proteção catódica das estacas metálicas. Com tal sistema desligado, os resultados indicaram regiões localizadas com corrosão ativa, em de acordo com resultados da inspeção visual. Embora seja esperdado o estabelecimento de corrosão localizada na presença de corrente de fuga, a presença de cloretos em altos teores foi considerada o fator determinante para a corrosão verificada nestes píeres.

As tabelas 14 a 18 apresentados os resultados das medidas eletroquímicas nos pontos das grades dos elementos pré-selecionados (ver Figuras 5 a 7) do Píer Novo. Pode-se observar que, as medições eletroquímicas indicaram que a armadura das vigas (longitudinal e transversal) e da estaca avaliada estava passivada, o que condizia com a não visualização de anomalias relacionadas a um processo corrosivo e com os baixos teores de cloretos obtidos. Embora os valores obtidos de potencial de corrosão fossem bem inferiores aos representativos de ocorrência de corrosão, observou-se uma tendência de valores mais negativos na estaca avaliada, especificamente na região de variação de maré. Tais potenciais eram esperados em função do alto teor de umidade no concreto neste local.

Quanto à resistividade elétrica, os resltados indicaram uma alta probabilidade de ocorrência de corrosão em trechos do concreto da face inferior das vigas, enquanto, na sua face lateral e na estaca, manteve-se a tendência de um médio risco de corrosão. Tais resultados devem ser vistos com critério, pois, conforme já comentado, os potenciais de corrosão obtidos indicaram a passivação do aço. Neste caso, estes resultados devem ser interpretados apenas

como indicativos de uma condição propícia para futuro estabelecimento de processo corrosivo.
A tendência de menor resistividade na face inferior das vigas, condiz com a análise das condições de exposição, sendo esta face considerada um local crítico para o acúmulo de íons cloreto e fuligem e a deposição de gotículas de água de condensação. Nesta condição, é esperada uma maior atividade iônica na camada mais superficial do concreto da região, o que, consequentemente, afeta os valores de resistividade. Além disto, devem-se considerar as características do concreto desta face que apresentava constantes áreas de concreto segregado, conforme apontaram os resultados da inspeção visual.

5.5 Caracterização física e mecânica do concreto

Para todos os elementos avaliados nos Píeres, a resistência à compressão foi bem superior à especificada em projeto (ver Tabela 2). Os valores obtidos variavam em torno de 30 MPa a 60 MPa, sendo o concreto considerado como de moderada resistência mecânica. Com exceção da viga longitudinal da Ponte de Acesso, os resultados atenderam o parâmetro normativo atual da NBR 6118 e da NBR 12655 (ver Tabela 1). Entretanto, considera-se que este atendimento não foi fator determinante para uma adequada durabilidade do Píer Velho, visto que se apresentaram bastante deterioradas.
Os valores de absorção de água por imersão foram pouco expressivos, com exceção dos obtidos na viga longitudinal da Ponte de Acesso e na do Píer de Atracação 1 do Píer Velho que foram superiores à 4,2 % (kg/kg), valor considerado por Helene (31) como máximo para um concreto durável. Em ambos os Píeres, as estacas apresentaram os menores valores (abaixo de 2,6 % kg/kg). O concreto dos elementos da Ponte de Acesso e Píer de Atracação 1 apresentou massa específica seca máxima de 2,76 kg/dm^3, do Píer de Atracação 2 de 2,69 kg/dm^3 e do Píer Novo de 2,48 kg/dm^3.

6. Conclusões

As conclusões principais quanto às condições ambientais que as estruturas dos píeres estão expostas são as seguintes:

- a análise do ambiente local (Item 3.2) indicou que as estruturas estão sujeitas à uma condição especial de exposição, sendo o ambiente classificado de agressividade muito forte, conforme as normalizações nacionais (NBR 6118 e NBR 12655);
- a inspeção visual (Item 5.1) indicou como crítica a exposição à névoa salina, associada tanto aos respingos como à água de condensação e/ou ao acúmulo ou infiltração da água pluvial contaminada. Os locais mais caracteristicos desta exposição são: topo das estacas, quinas entre faces e face inferior das vigas, juntas de dilatação e rede de drenagem. Destes locais, cita-se a estaca como sendo o elemento mais crítico para a corrosão, conforme indicou o histórico de intervenções (Item 3.1) no Píer Velho.

No Píer Velho, a inspeção visual e os ensaios complementares indicaram, claramente, a avançada deterioração das estruturas, estando a sua durabilidade comprometida. As conclusões principais do estudo deste Píer são as seguintes:

- a inspeção visual (Item 5.1) indicou a presença de diversas anomalias ao longo das estruturas, muitas delas devido à corrosão da armadura por ataque de íons cloreto. A corrosão era crítica na armadura aparente em áreas localizadas do concreto e também em áreas com bainhas e cabos de protensão aparentes em algumas vigas longitudinais do Píer de Atracação 2. A corrosão também era crítica nos aparelhos de apoio;
- a inspeção visual indicou que as anomalias estavam relacionadas não somente à agressividade local do ambiente (Item 3.2), com também a falhas de execução, associadas à ausência de uma manutenção periódica eficiente. Tal ausência também era apontada pela documetação técnica (Item 3.1), que apresentava um número restrito de intervenções de recuperação e de conservação;
- os teores críticos de cloretos na armadura (Item 5.3) e a indicação de corrosão ativa por parâmetros eletroquímicos (Item 5.4) confirmaram o estado ativo de corrosão, constatado na inspeção visual. Os resultados eletroquímicos também indicaram a presença de corrente de interferência no Píer de Atracação 1 e no Píer de Atracação 2, oriunda da proteção catódica das suas estacas metálicas.

No Píer Novo, a inspeção visual e os ensaios complementares indicaram um início de processo de degradação de sua estrututa, o que pode refletir em sua durabilidade. As conclusões principais do estudo deste Píer são as seguintes:

- a inspeção visual (Item 5.1) indicou a presença de diversas anomalias ao longo da estrutura. Isto era devido, não somente à agressividade local do ambiente (Item 3.2), com também a falhas de execução associadas à ausência de uma manutenção de conservação desde a sua construção. Tal ausência também foi confirmada pelo histórico do píer (Item 3.1);
- os resultados de teores elevados de cloretos (Item 5.3) e das medidas eletroquímicas (Item 5.4) confirmaram a passivação da armadura, verificada durante a inspeção visual e a fratura local do concreto, em alguns locais de ensaio de carbonatação. Entretanto, a indicação de um início de penetração externa de cloretos no concreto de cobrimento, de alguns dos elementos avaliados, é preocupante para a durabilidade da estrutura.

7. Recomendações para estruturas de concreto em ambiente marinho

Para estruturas antigas, recomenda-se:

- uma vez constatada na inspeção visual a avançada degradação das estruturas do Píer Velho, é importante a realização imediata de uma manutenção de reparo e reforço. Nesta, deve ser considerada a substituição de alguns elementos, devido à sua aparente condição crítica, bem como de alguns aparelhos de apoio;
- em caracter emegencial, é fundamental uma avaliação estrutural do Píer de Atracação 2 devido à constatação de fissuração sistemática e corrosão intensa em algumas vigas longitudinais protendidas. Em tal evento, é importante a ampliação dos ensaios, sendo fundamental a verificação dos teores de cloretos em um maior número de vigas;

- uma vez determinado teores críticos de cloreto na região da armadura das estruturas do Píer Velho, é importante, além de sua recuperação, a aplicação de técnicas de proteção catódica ou de extração de cloretos, as quais podem aumentar consideravelmente a vida útil residual de estruturas. Como atualmente as estacas metálicas estão protegidas catódicamnete por sistema de corrente impressa, a sua ampliação para os demais elementos seria a solução mais viável. Na oportunidade, seria solucionada a constatação presença de corrente de interferência deste sistema nos elementos de concreto do Píer de Atracação 1 e 2;
- para garantir o máximo desempenho das técnicas de manutenção a serem adotadas, é importante a correta seleção e o controle de qualidade dos produtos de reparo e de proteção superficial que deve ser também aplicada nas estruturas. Tais serviços podem ser feitos com base na consulta a normalizações específicas disponíveis no exterior (ver Item 2). Além disto, devido à importância do estabelecimento de uma manutenção periódica, deve ser elaborado um manual de apoio a tal atividade, conforme normalização (ver Item 2).

Para estruturas novas, recomenda-se:

- uma vez constatada a degradação da estrutura do Píer Novo, é importante a realização imediata de uma manutenção de reparo das falhas construtivas. Devido à forte agressividade ambiental e a verificação de um início de perfil de penetração externa de cloretos no concreto de cobrimento de alguns elementos, é importante também a proteção superficial da estrutura. Tal proteção e para os serviços de recuperação deve ser feita uma consulta a normalizações específicas disponíveis no exterior (ver Item 2);
- devido à importância do estabelecimento de uma manutenção periódica nas estruturas, recomenda-se a elaboração de um manual de apoio a tal atividade, conforme normalização (ver Item 2);
- considerando-se a importante de estender a vida útil das obras de grande responsabildiade e impacto ambiental, como são os píeres estudados, é importante a aplicação de técnicas de proteção catódica nas estruturas de concreto. Tal técnica deve, no mínimo, ser aplicada nas estacas de concreto, as quais estão mais suscetíveis à corrosão, conforme indicou o estudo do Píer Velho. No entanto, devido à carência de conhecimento nacional das novas técnicas de proteção catódica, dentro outras técnicas, recomenda-se um estudo especifico de sistemas atuais de proteção de estruturas de concreto expostas ao ambiente tropical marinho, incluindo sistemas de monitoramento do concreto, original e recuperado, e da armadura.

8. Referências bibliográficas

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.655**: concreto de cimento portland: preparo, controle e recebimento: procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 2006. 18p.

2. _____. **NBR 6118**: projetos de estruturas de concreto: procedimentos. ABNT. Rio de

Janeiro, 2003. 170p.

3. VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H. How to make today's repairs durable for tomorrow: corrosion protection in concrete repair. **Construction and Building Materials**. v. 14, n. 4, 2000, p.189-197.

4. DHIR, R. K.; JONES, M. R.; AHMED, H. E. H. Concrete durability: estimation of chloride concentration during design life. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 154, 1991, p. 37-44.

5. BS - BRITISH STANDARD INSTITUTION: EUROPEAN STANDARD **BS EN 1504-2**: products and systems for the protection and repair of concrete structures: definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity; part 2: surface protection systems for concrete. British Standards Institution. London, 2004. 23 p.

6. _____. **BS EN 1504-3**: products and systems for the protection and repair of concrete structures: definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity: structural and non-structural repair. British Standards Institution. London, 2005.

7. _____. **BS EN 1504-10**: products and systems for the protection and repair of concrete structures: definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity: site application of products and systems and quality control of the works. British Standards Institution. London, 2005.

8. NACE - NACE INTERNATIONAL. **NACE STANDART SP0290**: impressed current cathodic protection of reinforcing. Nace International. Houston, 2005. 12p.

9. NACE - NACE INTERNATIONAL. **NACE STANDART SP1105**: sacrificial cathodic proctection of reinforced concrete elements: a state-of-the-art report. Nace International. Houston, 2005. 15p

10. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674**: manutenção de edificações: procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 1999. 6p.

11. _____. **NBR 14037**: manual de operação, uso e manutenção das edificações: conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação. ABNT. Rio de Janeiro. 1998. 5p.

12. NACE - NACE INTERNATIONAL. **NACE STANDART SP0187**: design consideration for corrosion control steel in concrete. Nace International. Houston, 2008. 19p.

13. VERBECK, G.J.; LANDGREN, R. Influence of physical characteristics of aggregates on the frost resistance of concrete. **Proceedings,** ASTM, West Conshohocken, Pa., v.

30, p.1063-1079 1960 (apud ACI 201.2r, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to durable concrete. In: ACI manual of concrete practice, 2001. Michigan: ACI, 2001. 41 p.)

14. MAUBERTEC. **Glossário Técnico, conceituação, visão sistemática e relação causas e efeitos básicos das anomalias**. São Paulo, 1998 . 124p.

15. DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN EN 14630**: products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, English version, DIN. Berlin, 2007. 10 p.

16. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM C 1218/C 1218M**: standard method for water-soluble in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992. 3 p.

17. ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building code requirements for Structural Concrete. Estados Unidos, 2005. 430 p.

18. ANDRADE, C**. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Pini, 1992. 103p. (Traduzido por HELENE, P. R. do L.; CARMONA, A.).

19. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM C 876**: standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 1999. 6p.

20. WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: USP, 2003, 166 p.

21. ANDRADE, C. **Nueva técnica eletroquímica de medida de la corrosión de armaduras en hormigones armados y pretensados** – Exemplo de aditivos inhibidores como método de protección. Madrid: FAC C. Química, 1973. 129 f. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidad Complutense de Madrid, 1973.

22. GONZÁLEZ, J.A.; MOLINA, A.; ESCUDERO, M.L.; ANDRADE, C. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates - polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**. v. 25, n. 10, 1985, p. 917-930.

23. ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of nitride as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars. **ACI Materials Journal.** v. 78, n. 2, p. 130-137. Mar. / Apr., 1990.

24. GONZÁLEZ, J.A.; MIRANDA, J.M.; FELIU, S. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. Corrosion Science,

v.46, p.2467-2485, 2004.

25. ANDRADE, C. et al. **Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete in concrete by means of the polarization resistance method**. Materiaux and Structures Materiaux et Constructions, v.37, p.623-643, Nov. 2004.

26. JAMES INSTRUMENTS. **The Gecor 8 corrosion rate meter: instruction manual.** James Instruments S.A. Chicago, USA, 2002. 2ed. 83 p.

27. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 1994. 4p.

28. _____. **NBR 9778**: Argamassas e concretos endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2005. 4p.

29. _____. **NBR 7680**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro. 2007. 12p.

30. ARAUJO, A. **Estudo para o estabelecimento de metodologia de seleção de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos**. São Paulo, SP: IPT, 2004. 403 f. Originalmente parte do estudo foi apresentada como dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 2004 (Projeto FAPESP 2001/12.256-2)

31. HELENE, P. R.L. La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. **Hormigón**, AATH, n. 10 p. 25-35, ago. 1983

32. TESTANI, L. **Memorial Descritivo – Um guia prático para elaboração de documentos técnicos**. São Paulo. 2009. 96p. (referência para os planos de ação e desenvolvimento dos trabalhos).

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem Pedro C. Bilesky, Sérgio C. Ângulo, Alessandra L. de Castro e Valdecir A. Quarcioni, do Laboratório de Matreiais de Cosntrução Civil do IPT, pela realização e análise dos resultados dos ensaios de caracterização do concreto.

TABELA 1 – Parâmetros normativos para estrutura de concreto expostos ao ambiente marinho

Norma ABNT	Parâmetro			
	Relação água cimento (a/c)	**Resistência à compressão (MPa)**	**Teor de cloreto em relação à massa de cimento (%)**	**Espessura do concreto de cobrimento (cm)**

	concreto armado	concreto protendido	concreto armado	concreto protendido	concreto armado	concreto protendido	concreto armado	concreto protendido
NBR 6118	≤ 0,45	≤ 0,45	≥ 40	≥ 40	-	-	5,0	5,5
NBR 12655	≤ 0,40	-	≥ 45	-	≤ 0,15	≤ 0,05	-	-

TABELA 2 – Descrição das anomalias e falhas na estrutura dos píeres na inspeção visual dos Píeres

Anomalia	Descrição genérica	Desenvolvimento Típico	Alteração Típica na Superfície do Concreto	Localização Típica
Concreto segregado	Concentração heterogênea dos componentes da mistura do concreto.	Falha de especificação, projeto e/ou execução.	Vazios na massa do concreto e exposição e/ou concentração de agregados.	Engastes, quinas entre faces e/ou linhas entre tábuas de formas e/ou juntas de construção etc.
Concreto desagregado	Perda da integridade do concreto por ataque químico, lixiviação, altas temperaturas, erosão, cavitação e/ou abrasão.	Exposição a agentes externos como sulfatos e à água (pluvial, mar, lençol freático, industrial e armazenada, contaminadas ou não) e/ou ao vento (partículas em suspensão).	Desgaste superficial progressivo em que são expostos agregados (miúdos e/ou graúdos) e/ou fissuração aleatória com perda da coesão do concreto.	Drenos, canaletas, bordas, variação de maré, juntas e/ou uniões entre pré-moldados etc.
Concreto disgregado	Perda da geometria do elemento devido a forças internas e externas.	Ocorrência de choque, impacto, esmagamento e/ou reações expansivas de corrosão ou de álcali-agregado.	Fissuração de tração por forças internas, concreto lascado com ou sem exposição da armadura.	Quinas entre faces, abas, engastes, apoios, uniões, juntas e/ou em regiões de falhas construtivas e de manutenção etc.
Armadura exposta	Visualização das armaduras, bainhas e cabos de protensão insertes metálicos e/ou ancoragens.	Segregado e/ou reações expansivas (corrosão, álcali-agregado e ataque de sulfato).	Lascamento e/ou perda de coesão do concreto de cobrimento.	Áreas de concreto segregado, disgregado e desagregado, com falhas construtivas ou armadura com insignificante de cobrimento.
Mancha de oxidação	Alteração da coloração do concreto pelo afloramento da armadura.	Processo de corrosão estabelecido na armadura e/ou em outros elementos metálicos presentes na massa do concreto.	Coloração alterada, tendo-se manchas vermelho-marrom-acastanhadas.	
Mancha de umidade	Alteração da coloração superficial do concreto	Aumento do teor de umidade do concreto, por reações de carbonatação, contato com a água (infiltração, escorrimento, condensação etc).	Coloração alterada, tendo-se um escurecimento do concreto, podendo estar esverdeado pela presença de fungos e/ou limo.	Faces em geral, abas, quinas entre faces, juntas de dilatação, uniões e/ou na rede de drenagem.
Mancha de escorrimento	Alteração da coloração pela deposição de partículas (fuligem), associoada ou não a mancha de umidade.	Percolação, infiltração e escorrimento de água contaminada.	Coloração alterada, tendo-se acúmulo de fuligem.	
Mancha de eflorescência	Precipitação e acúmulo de sais na superfície do concreto.	Reações do dióxido de carbono com compostos do cimento.	Coloração alterada, tendo-se manchas esbranquiçadas e, conforme o acúmulo de sais, protuberâncias.	
Mancha de lixiviação	Presença de componentes do concreto na superfície, podendo o concreto estar em processo de desagregação.	Arraste e acúmulo de componentes do concreto na superfície por infiltração de água.	Presença de agregados miúdos e compostos da pasta de cimento na superfície.	

TABELA 2 – Descrição das anomalias e falhas em estruturas de concreto e siglas adotadas na inspeção visual dos Píeres (continuação)

Anomalia	Descrição genérica	Desenvolvimento Típico	Alteração Típica na Superfície do Concreto	Localização Típica
Vazios (porosidade superficial)	Bolhas de ar aprisionado, durante a concretagem, na superfície do concreto.	Falhas de especificação, projeto e execução.	Grandes poros e vazios de dimenções e de profundidade variáveis na superfície.	Faces laterais.
Fissura	Fratura do concreto com abertura e profundidade variável, bem como, configuração: longitudinal, horizontal, vertical, transversal, inclinada, aleatória e mapeada.	Mudança de volume do concreto e atuação de cargas estruturais (retração, torções, flexão, movimentação higrotérmica, cisalhamento etc).	Descontinuidade local ou global do elemento e manchas de eflorescência e/ou umidade e oxidação.	Ao longo das faces ou somente na região de maior solicitação (fissuras passantes ou não).
Fissura - colmatada por fuligem	Fratura tamponada por partículas depositadas na sua abertura.	Deposição de partículas carreadas (água de escorrimento e vento).	Coloração alterada na abertura da fissura.	–
Fissura - colmatada por eflorescência	Fratura tamponada por sais resultantes de reações de carbonatação.	Formção e lixiviação de sais.	Coloração alterada, tendo-se manchas esbranquiçadas.	–
Fissura - colmatada por injeção	Consolidação da fissura com produtos específicos.	–	Coloração alterada na abertura da fissura e presença de resinas.	–
Fissura - colmatada por argamassa	Fratura tamponada com argamassas.	–	Argamassa na superfície do concreto.	–
Falhas - intervenções	Presença de anomalias em áreas recuperadas e adjacência.	Falha na especificação, projeto, execução, manutenção e/ou utilização (cargas e movimentações não-previstas).	Fissuras, manchas e concreto disgregado e segregado nas argamassas, grautes e concretos de reparo e de reforço.	Na sua área e região adjacente.
Falhas - aparelho de apoio	Presença de anomalias na região do apoio.		Fissuras, corrosão, deslocamentos e deformações. Anomalias no entorno.	
Falhas - juntas e uniões	Presença de alterações e anomalias no concreto da região e no material isolante.		Manchas de infiltração, carbonatação, lixiviação e fissuração.	
Falhas - drenagem	Presença de alterações e anomalias na rede de drenagem e região.		Manchas de umidade, fuligem, eflorescências e lixiviação.	

TABELA 3 - Identificação dos locais de ensaio de teor de cloreto e as características e condições de exposição da estrutura da Ponte de Acesso e do Píer de Atracação 1 do Píer Velho

Elementos e especificação de projeto: tipo, resistência do concreto (MPa), consumo de cimento (kg/m^3) e espessura de cobrimento (cm)	**Local selecionado**	**Condições de exposição característica**	**Identificação Ponte de Acesso**	**Identificação Píer de Atracação 1**
Estaca (pré-moldada, 30 MPa, 400 kg/m^3 e 4 cm)	Engaste da estaca	Respingos e névoa salina	E 41 RN	–
	Região acima da variação de maré	Respingos e marolas	E 41 RM	–
Viga Longitudinal (pré-moldada, 20 MPa, 350 kg/m^3 e 4 cm)	Lateral externa	Intempéries	L 41 FE	L 112 FE
	Lateral interna	Água de condensação	L 41 FI	L 112 FI
	Inferior	Água de escorrimento	L 41 FCI	L 112 FCI
Viga Transversal (parte inferior: pré-moldada, 20 MPa, 350 kg/m^3 e 4 cm. parte superior: moldada no local, 30 MPa, 400 kg/m^3 e 4 cm)	Inferior balanço	Água de escorrimento e de condensação	T 41 IB	T 112 IB
	Inferior engaste		T 41 IE	T 112 IE
	Inferior central		T 41 IC	T 112 IC
	Lateral inferior balanço	Intempéries e água de escorrimento	T 41 LB	T 112 LB
	Lateral inferior central		T 41 LI	T 112 LI
	Lateral superior central		T 41 LS	T 112 LS
	Lateral superior engaste	Intempéries	T 41 LE	T 112 LE

TABELA 4 - Identificação dos locais de ensaio de teor de cloreto e as características e condições de exposição da estrutura do Píer de Atracação 2 do Píer Velho

Elementos e especificação de projeto: tipo, resistência do concreto (MPa), consumo de cimento (kg/m^3), espessura de cobrimento (cm) e relação água cimento (a/c)	**Local selecionado**	**Condições de exposição característica**	**Identificação Píer de Atracação 2**
Viga Longitudinal (pré-moldada e protendida, 20 MPa, 350 kg/m^3, 4 cm e a/c 0,45)	Lateral externa	Intempéries	L 209 FE
	Lateral interna	Água de condensação	L 209 FI
	Inferior	Água de escorrimento	L 209 FCI
Viga Transversal (pré-moldada, 15 MPa, 350 kg/m^3, 4 cm e a/c 0,45)	Inferior balanço	Água de escorrimento e de condensação	T 209 IB
	Inferior engaste		T 209 IE
	Inferior central		T 209 IC
	Lateral inferior balanço	Intempéries e água de escorrimento	T 209 LB
	Lateral inferior central		T 209 LI

TABELA 5 - Identificação dos locais de ensaio de teor de cloreto e as características e condições de exposição da estrutura no Píer Novo

Elementos e especificação de projeto: tipo, resistência do concreto (MPa), consumo de cimento (kg/m^3), espessura de cobrimento (cm), relação água cimento (a/c) e metacaulim (kg/m^3)	**Local selecionado**	**Condições de exposição característica**	**Identificação Píer Novo**
Estaca (pré-moldada e protendida, 50 MPa, 469 kg/m^3, 5,5 cm, a/c 0,45 e 41 kg/m^3)	Engaste da estaca	Respingos e névoa salina	EP 97 RN
	Região acima da variação de maré	Respingos e marolas	EP 97 RM
Viga Longitudinal (pré-moldada 50 MPa, 469 kg/m^3, 5,0 cm, a/c 0,45 e 41 kg/m^3)	Lateral externa	Intempéries	L 43 FE
	Lateral interna	Água de condensação	L 43 FI
	Inferior	Água de escorrimento	L 43 FCI
Viga Transversal (parte inferior: pré-moldada, 50 MPa, 469 kg/m^3, 5,5 cm, a/c 0,45 e 41 kg/m^3; parte superior: moldada no local, 25 MPa, 360 kg/m^3, 5,0 cm e a/c 0,50)	Inferior balanço	Água de escorrimento e de condensação	T 43 IB
	Inferior engaste		T 43 IE
	Inferior central		T 43 IC
	Lateral inferior balanço	Intempéries e água de escorrimento	T 43 LB
	Lateral inferior central		T 43 LI
	Lateral superior central		T 43 LS
	Lateral superior engaste	Intempéries	T 43 LE

Tabela 6 – Resultados do teor de cloreto na estrutura da Ponte de Acesso e do Píer de Atracação 1 do Píer Velho

Profundidade (mm)	Local	Cloretos Solúveis (%) Ponte de Acesso	Cloretos Solúveis (%) Píer de Atracação 1	Local	Cloretos Solúveis (%) Ponte de Acesso	Cloretos Solúveis (%) Píer de Atracação 1
0 a 5	E 41/112 RN	1,27	–	T 41/112 IB	1,06	2,06
5 a 10		1,23			1,20	2,20
10 a 15		1,05			0,95	1,96
15 a 25		0,79			0,74	1,83
25 a 35		0,40			0,15	1,68
35 a 45		0,32			0,08	1,03
0 a 5	E 41/112 RM	2,86	–	T 41/112 IE	2,77	2,41
5 a 10		2,75			4,85	5,21
10 a 15		2,03			4,84	5,79
15 a 25		1,29			3,77	5,17
25 a 35		0,90			2,98	2,90
35 a 45		0,53			1,79	1,60
0 a 5	L 41/112 FE	0,17	0,73	T 41/112 IC	0,32	0,36
5 a 10		0,12	1,18		0,50	0,35
10 a 15		0,13	1,20		0,41	0,53
15 a 25		0,13	1,24		0,39	0,61
25 a 35		0,09	1,15		0,30	0,59
35 a 45		0,07	1,09		0,19	0,45
0 a 5	L 41/112 FI	0,05	1,06	T 41/112 LB	2,60	0,87
5 a 10		0,07	1,08		2,00	0,93
10 a 15		0,19	1,02		1,34	1,23
15 a 25		0,17	1,08		1,22	1,13
25 a 35		0,14	0,95		0,89	0,39
35 a 45		0,13	0,99		0,61	0,34
0 a 5	L 41/112 FCI	0,72	1,58	T 41/112 LE	0,51	1,40
5 a 10		0,47	1,55		0,49	0,99
10 a 15		0,43	1,44		0,90	0,26
15 a 25		0,52	1,17		1,31	0,16
25 a 35		0,53	0,75		0,82	0,21
35 a 45		0,48	0,41		0,52	0,17
0 a 5	T 41/112 LS	0,10	0,05	T 41/112 LI	0,16	0,28
5 a 10		0,08	0,05		0,30	0,19
10 a 15		0,31	0,09		0,36	0,16
15 a 25		0,32	0,27		0,40	0,27
25 a 35		0,30	0,33		0,26	0,29
35 a 45		0,27	0,28		0,22	0,25

Tabela 7 – Resultados do teor de cloreto na estrutura do Píer de Atracação 2 do Píer Velho

Profundidade (mm)	Local	Cloretos Solúveis (%)	Local	Cloretos Solúveis (%)
0 a 5	L 209 FE	0,18	T 209 IC	1,48
5 a 10		0,22		1,55
10 a 15		0,17		1,38
15 a 25		0,17		1,29
25 a 35		0,17		0,95
35 a 45		0,15		0,68
0 a 5	L 209 FI	0,39	T 209 LB	0,12
5 a 10		0,18		0,54
10 a 15		0,10		0,39
15 a 25		0,15		0,17
25 a 35		0,15		0,16
35 a 45		0,12		0,17
0 a 5	L 209 FCI	1,52	T 209 LI	0,19
5 a 10		1,11		0,21
10 a 15		0,68		0,27
15 a 25		0,39		0,22
25 a 35		0,41		0,21
35 a 45		0,38		0,19
0 a 5	T 209 IB	1,83	T 209 IE	2,19
5 a 10		2,80		4,62
10 a 15		2,40		3,53
15 a 25		2,19		3,03
25 a 35		2,07		1,89
35 a 45		1,41		1,00

Tabela 8 – Resultados do teor de cloreto na estrutura do Píer Novo

Profundidade (mm)	Local	Cloretos Solúveis (%)	Local	Cloretos Solúveis (%)
0 a 5	EP 97 RN	0,17	T 43 IB	0,77
5 a 10		0,04		0,25
10 a 15		0,04		0,19
15 a 25		0,04		0,14
25 a 40		0,04		0,11
40 a 55		0,04		0,08
0 a 5	EP 97 RM	0,95	T 43 IE	1,36
5 a 10		0,24		0,66
10 a 15		0,08		0,23
15 a 25		0,06		0,16
25 a 40		0,05		0,04
40 a 55		0,06		0,04
0 a 5	L 43 FE	0,03	T 43 IC	0,21
5 a 10		0,04		0,04
10 a 15		0,05		0,05
15 a 25		0,05		0,04
25 a 40		0,03		0,05
40 a 55		0,05		0,05
0 a 5	L 43 FI	0,12	T 43 LB	0,07
5 a 10		0,10		0,07
10 a 15		0,07		0,08
15 a 25		0,06		0,07
25 a 40		0,07		0,09
40 a 55		0,07		0,06
0 a 5	L 43 FCI	0,13	T 43 LE	0,11
5 a 10		0,06		0,07
10 a 15		0,06		0,04
15 a 25		0,06		0,02
25 a 40		0,07		0,03
40 a 55		0,06		0,03
0 a 5	T 43 LI	0,07	T 43 LS	0,07
5 a 10		0,07		0,06
10 a 15		0,08		0,06
15 a 25		0,08		0,08
25 a 40		0,08		0,08
40 a 55		0,08		0,08

Tabela 9 - Resultados de medidas eletroquímicas na Ponte de Acesso, face lateral da viga longitudinal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-222	0,91	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 9,50 mm) na face lateral norte.
2BI	-207	0,72	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal, de quina da face lateral norte com a inferior (Ø 25,40 mm).
3BI	-296	0,43	–
4E	-206	0,70	A região entre os pontos P4 e P5 é local de extração de amostras de cloreto (Ponto L41 FE).
5E	-323	0,91	
6BI	-327	0,82	–
7E	-250	0,74	–
8BI	-343	0,91	Próximo aos Pontos 8 e 9, na face inferior, há uma fissura indicando a disgregação do concreto.
9E	-352	1,01	

Tabela 10 - Resultados de medidas eletroquímicas na Ponte de Acesso, face inferior da viga longitudinal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-239	1,32	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 9,50 mm) na face inferior.
2BII	-219	0,58	O símbolo **BII** identifica pontos na barra longitudinal de quina com a face lateral sul da viga (Ø 25,40 mm).
3BI	-198	0,16	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal de quina com a face lateral norte da viga (Ø 25,40 mm).
4BII	-219	0,40	–
5BI	-199	0,13	–
6E	-187	0,32	–
7E	-193	0,66	A região entre os pontos P7 e P10 é local de extração de amostras de cloreto (L41 FCI).
8BII	-300	0,32	
9BI	-295	0,32	
10E	-339	1,82	
11BII	-349	0,55	Próximo ao Ponto 11 finaliza-se uma fissura indicando a disgregação do concreto.
12BI	-338	0,42	–
13E	-356	1,34	–

Tabela 11 – Resultados de medidas eletroquímicas na Ponte de Acesso, face lateral da viga transversal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-290	0,21	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 9,50 mm).
2BII	-267	0,13	O símbolo **BII** identifica pontos na barra longitudinal mais superior da face lateral da viga (Ø 19,00 mm).
3BI	-285	0,17	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal mais inferior da face lateral da viga (Ø 22,20 mm).
4E	-272	0,12	A região após os pontos P4 e P7, é local de extração de amostras de cloreto (T41 LB).
5BII	-275	0,13	
6BI	-279	0,16	
7E	-313	0,44	
8E	-273	0,21	–
9BII	-276	0,13	–
10BI	-263	0,19	–
11E	-293	0,34	–
12BII	-277	0,17	–
13BI	-293	0,18	–
14E	-211	0,12	–
15BII	-229	0,11	–
16BI	-237	0,21	–
17E	-231	0,17	–
18BII	-283	0,21	–
19BI	-321	0,23	–

Tabela 12 – Resultados de medidas eletroquímicas na Ponte de Acesso, face inferior da viga transversal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-211	0,13	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 9,50 mm).
2BI	-279	0,16	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal de quina com a face lateral norte da viga (Ø 19,00 mm).
3E	-233	0,15	A região entre os pontos P3 e P4, é próxima do local de extração de amostras de cloreto (T41 IB).
4BI	-280	0,16	
5E	-362	0,19	–
6E	-362	0,13	–
7BI	-278	0,17	–
8BI	-375	0,37	–
9BI	-423	0,44	–

Tabela 13 – Resultados de medidas eletroquímicas na Ponte de Acesso, face lateral da estaca

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1	-399	0,20	Os Pontos sem símbolo identifica medições nas barras verticais (Ø 31,75 mm).
2	-364	0,21	–
3E	-320	1,04	O símbolo **E** identifica pontos no estribo (arame de Ø 3 mm).
4	-350	0,84	A região entre os pontos P4 e P7 é local de extração de amostras de cloreto, em zona de respingo e névoa (E41 RN). Ponto 6 é local sem leitura pelo Gecor.
5	-430	0,21	
6	–	–	
7E	-263	0,41	
8	–	–	Locais sem leitura pelo Gecor.
9	–	–	
10E	–	–	
11	–	–	
12	–	–	
13E	-343	0,69	–
14	-431	0,21	A região entre os pontos P14 e P18, é local de extração de amostras de cloreto, em zona de respingo e marolas (E41 RM).
15	-355	0,16	
16	-361	0,21	
17	-351	0,50	
18E	-346	0,71	Ponto de maré alta (máxima).
19	-450	0,75	–
20	-380	0,71	–
21E	-471	0,91	–
22	–	–	Nos períodos de medição estes pontos estavam expostos a marolas constantes.
23	–	–	
24E	–	–	

Tabela 14 – Resultados de medidas eletroquímicas no Píer Novo, face lateral da viga longitudinal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Resistividade** (kΩ/cm)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-31	15	–	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 8,00 mm).
2BII	-11	21	–	O símbolo **BII** identifica pontos na barra longitudinal mais superior da face lateral da viga (Ø 10,00 mm).
3BI	-10	21	0,02	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal mais inferior da face lateral da viga (Ø 16,00 mm).
4E	-19	23	0,09	–
5BII	-9	19	0,00	–
6BI	-28	18	0,01	–
7E	-9	20	–	–
8BII	-10	25	–	–
9BI	-6	20	–	–
10E	-14	20	–	–
11BII	-27	25	–	–
12BI	-14	25	0,00	–
13E	-10	27	0,00	–
14BII	-33	22	0,00	–
15BI	-13	19	–	–
16E	-12	24	–	–
17BII	-2	18	–	–
18BI	-12	17	–	–
19E	-8	14	–	–
20BI	-27	17	–	–
21E	-20	20	–	A região entre os pontos P21 e P24, é local de extração de amostras de cloreto (L43 FE). O Ponto 23 não teve leitura pelo Gecor.
22BII	-10	21	–	
23BI	–	–	–	
24E	-4	14	0,01	
25BII	-29	20	0,05	–
26BI	-1	13	0,00	–
27E	-41	16	–	–
28BII	-6	21	–	–
29BI	-20	17	–	–
30BII	-7	22	–	–
31BI	-25	23	–	–
32E	-14	18	–	–

Tabela 15 - Resultados de medidas eletroquímicas no Píer Novo, face inferior da viga longitudinal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Resistividade** (kΩ/cm)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-10	11	–	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 8,00 mm).
2BII	-24	18	–	O símbolo **BII** identifica pontos na barra longitudinal mais superior da face lateral da viga (Ø 10,00 mm).
3BI	-7	21	0,02	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal mais inferior da face lateral da viga (Ø 16,00 mm).
4E	-6	16	0,00	–
5BII	-11	21	0,01	–
6BI	-2	10	0,01	–
7E	-5	15	–	–
8BII	-15	16	–	–
9BI	-12	16	–	–
10E	-31	18	–	–
11BII	-25	12	–	–
12BI	-15	18	0,00	–
13E	-17	19	0,01	–
14BII	-21	15	0,01	–
15BI	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
16E	-26	19	–	–
17BI	-24	19	–	–
18E	-31	20	–	–
19BI	-15	18	–	–
20E	-24	18	–	A região entre os pontos P21 e P23, é local de extração de amostras de cloreto (L43 FCI).
21BII	-31	19	–	
22BI	-22	17	–	
23E	-31	20	0,00	
24BII	-31	19	0,01	–
25BI	-36	20	0,01	–
26E	-25	12	–	–
27BII	-27	14	–	–
28BI	-31	19	–	–
29E	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
30BII	-25	14	–	–
31BI	-27	17	–	–
32E	-31	19	–	–

Tabela 16 – Resultados de medidas eletroquímicas no Píer Novo, face lateral da viga transversal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Resistividade** (kΩ/cm)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	–	–	–	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 8,00 mm). Local sem leitura pelo Gecor.
2BII	–	–	–	O símbolo **BII** identifica pontos na barra longitudinal mais superior da face lateral da viga (Ø 10,00 mm). Local sem leitura pelo Gecor.
3BI	-18	67	–	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal mais inferior da face lateral da viga (Ø 20,00 mm).
4E	-49	35	0,08	A região entre os pontos P4 e P7, é local de extração de amostras de cloreto (T43 LB).
5BII	-36	53	0,00	
6BI	-26	64	0,00	
7E	-18	35	0,04	
8BII	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
9BI	-20	51	–	–
10E	-16	64	–	–
11BII	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
12BI	-62	67	–	–
13E	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
14BII	-7	45	–	–
15BI	-14	54	–	–
16E	-27	45	0,01	A região entre os pontos P16 e P19, é local de extração de amostras de cloreto (T43 LE).
17BII	-39	43	0,01	
18BI	-24	40	0,01	
19E	–	–	–	Locais sem leitura pelo Gecor.
20BII	–	–	–	
21BI	–	–	–	
22E	–	–	–	
23BII	-24	61	–	–
24BI	–	–	–	Local sem leitura pelo Gecor.
25E	-50	66	0,00	A região entre os pontos P25 e P27, é local de extração de amostras de cloreto (T43 LI).
26BII	-31	81	0,00	
27BI	-16	59	0,01	

Tabela 17 – Resultados de medidas eletroquímicas no Píer Novo, face inferior da viga transversal

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Resistividade** (kΩ/cm)	**Taxa de corrosão** ($\mu A/cm^2$)	**Observações**
1E	-91	26	–	O símbolo **E** identifica pontos nos estribos (Ø 8,00 mm).
2BI	-130	27	–	O símbolo **BI** identifica pontos na barra longitudinal de quina com a face lateral norte da viga (Ø 20,00 mm).
3E	-135	26	0,02	A região entre os pontos P3 e P5, é próximo de local de extração de amostras de cloreto (T43 IB).
4BI	-157	22	0,01	
5E	-115	25	–	
6E	-73	18	–	–
7BI	-174	22	–	–
8E	-102	22	–	–
9BI	-141	29	–	–
10E	-71	17	0,01	–
11BI	-82	21	0,00	–
12E	-34	10	–	–
13BI	-58	13	–	–
14E	-21	17	–	–
15BI	-21	26	–	–
16E	-49	15	0,00	A região entre os pontos P16 e P17 é local de extração de amostras de cloreto (T43 IC).
17BI	-69	37	0,01	

Tabela 18 – Resultados de medidas eletroquímicas no Píer Novo, face lateral da estaca

Ponto (P)	**Potencial de corrosão** (mV, ECSC)	**Resistividade (kΩ/cm)**	**Taxa de corrosão ($\mu A/cm^2$)**	**Observações**
1E	-160	21	–	O símbolo **E** identifica pontos em estribos (Ø 8,00 mm).
2	-164	31	–	Os Pontos sem identificação corresponde a medições nas barras verticais (Ø 16,00 mm).
3	-170	28	–	–
4	-166	29	–	A região entre os pontos P4 e P5, é local de extração de amostras de cloreto, em zona de respingo e névoa (EP97 RN).
5	-157	25	0,02	
6	-188	23	0,00	–
7E	-130	23	0,10	–
8	-154	24	–	–
9E	-120	29	–	–
10	-160	23	–	–
11	-180	24	–	–
12	-159	49	–	–
13	192	24	–	–
14E	196	19	0,01	–
15	-121	32	–	A região entre os pontos P15 e P16, é local de extração de amostras de cloreto, em zona de respingo e marolas (EP97 RM).
16	-144	32	0,01	
17	-192	29	–	–
18	-136	31	–	–
19E	-122	20	–	Ponto de maré alta (máxima).
20	-285	23	–	–
21	-278	22	–	–
22E	-252	15	–	Início da exposição às marolas.
23	-233	49	–	Medição complementares feitas com maré bem mais baixa. Abaixo do ponto P28 inicia a presença de cracas na superfície.
24	-219	18	–	
25E	-243	26	0,01	
26	-323	21	0,01	
27	-272	24	0,00	
28E	-309	21	0,03	

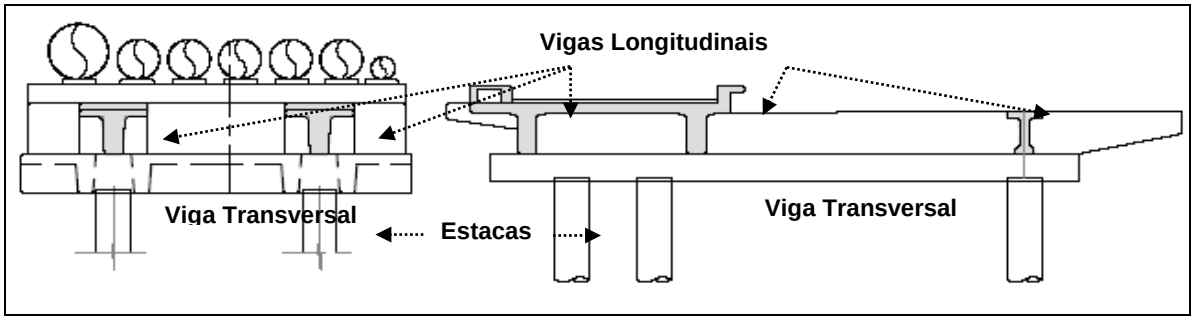

Figura 1 – Corte esquemático da estrutura do Píer Novo (a esquerda) e da Ponte de Acesso do Píer Velho (a direita)

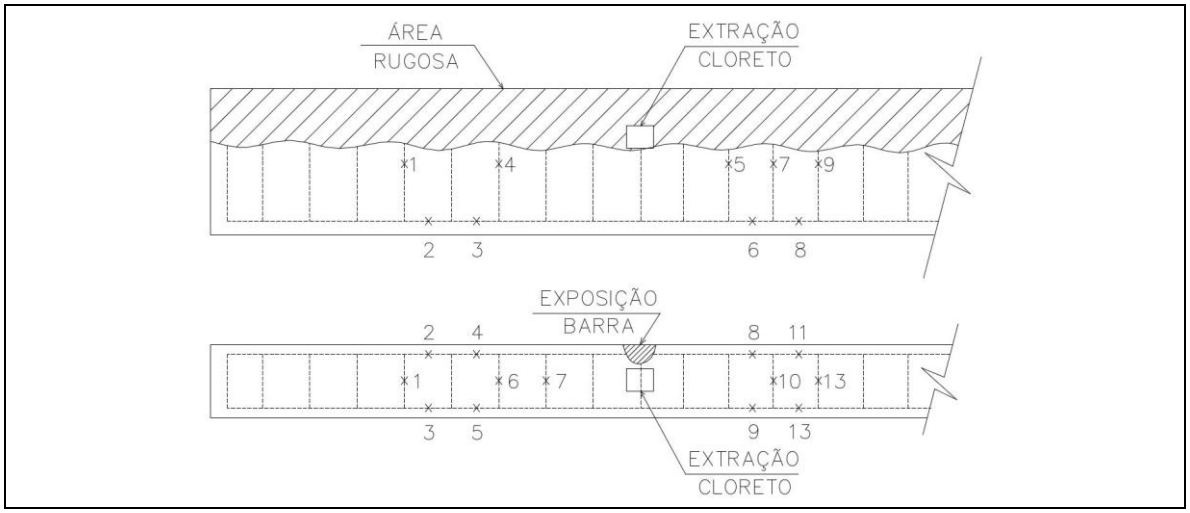

Figura 2 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura da face lateral e inferior de viga longitudinal da Ponte de Acesso para as medidas eletroquímicas

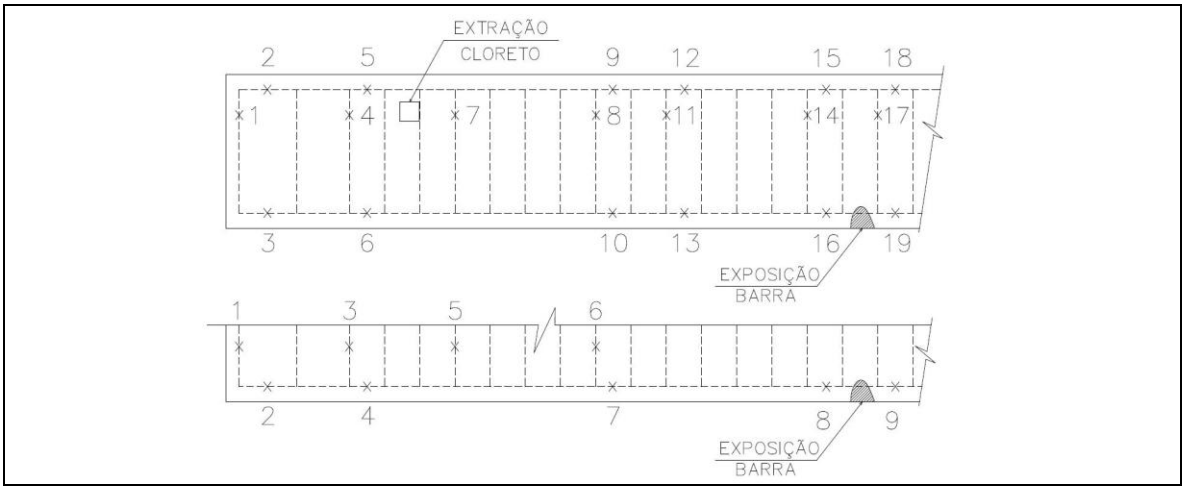

Figura 3 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura da face lateral e inferior de viga transversal da Ponte de Acesso para as medidas eletroquímicas

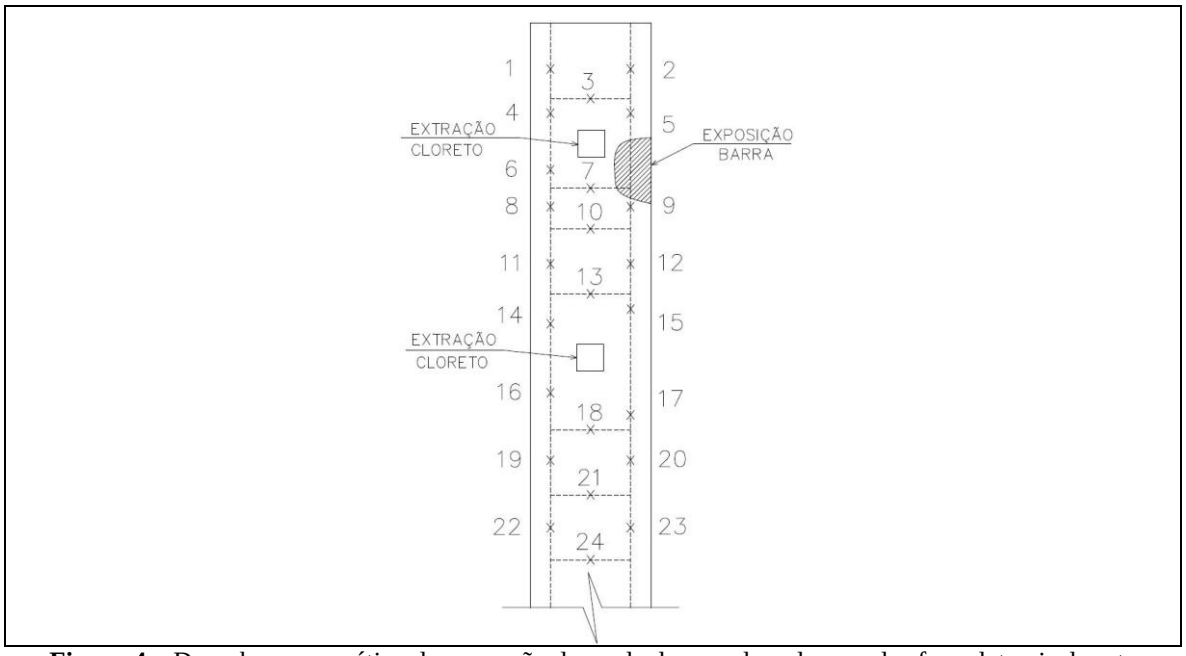

Figura 4 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura de uma das faces laterais de estaca da Ponte de Acesso para as medidas eletroquímicas

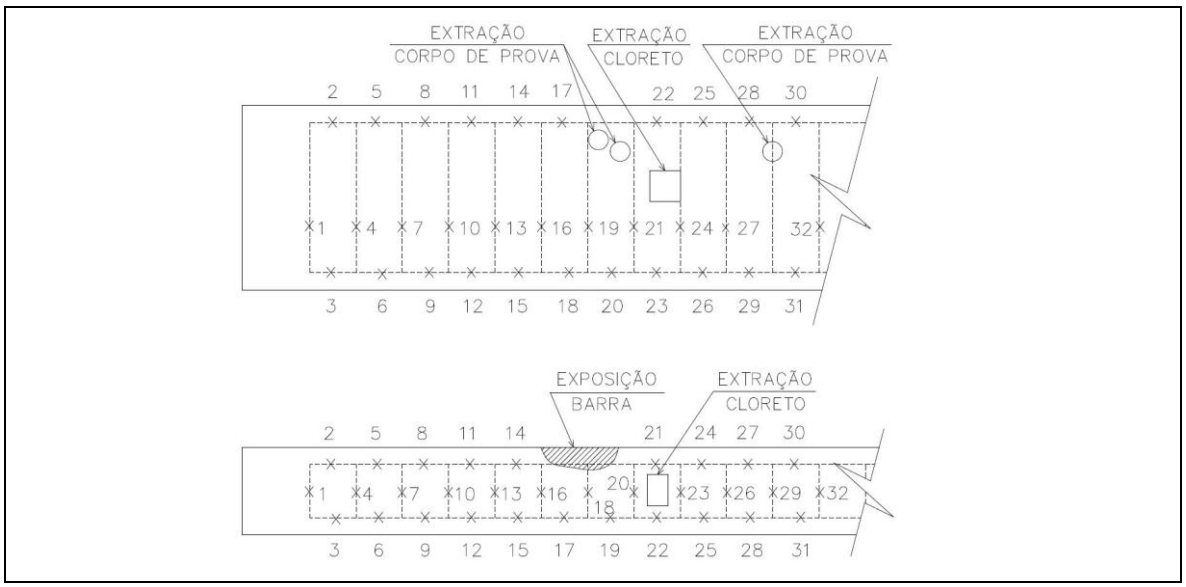

Figura 5 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura da face lateral e inferior de viga longitudinal do Píer Novo para as medidas eletroquímicas

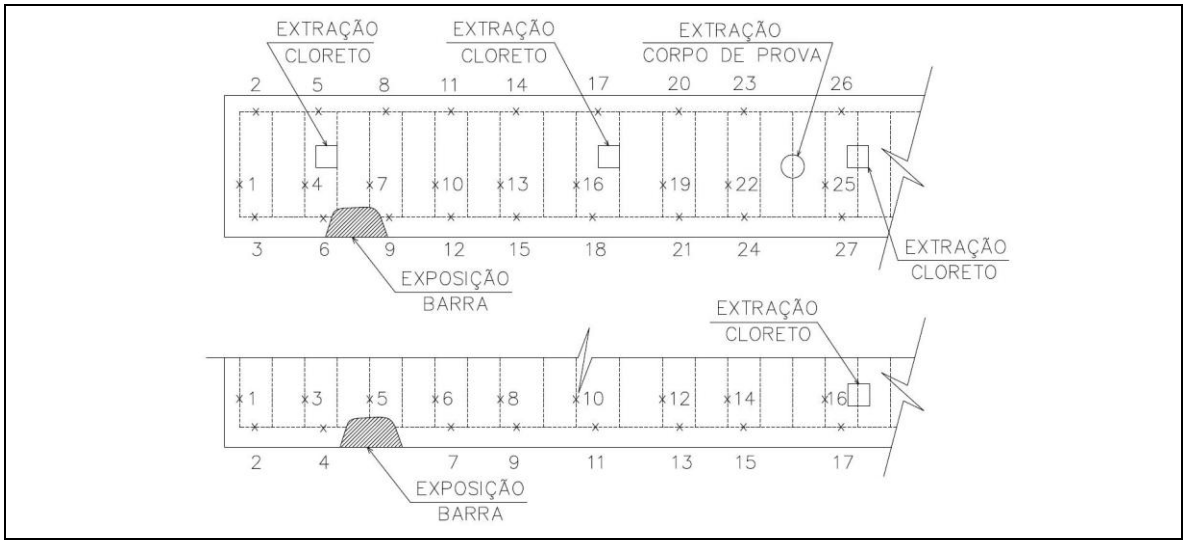

Figura 6 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura da face lateral e inferior de viga transversal do Píer Novo para as medidas eletroquímicas

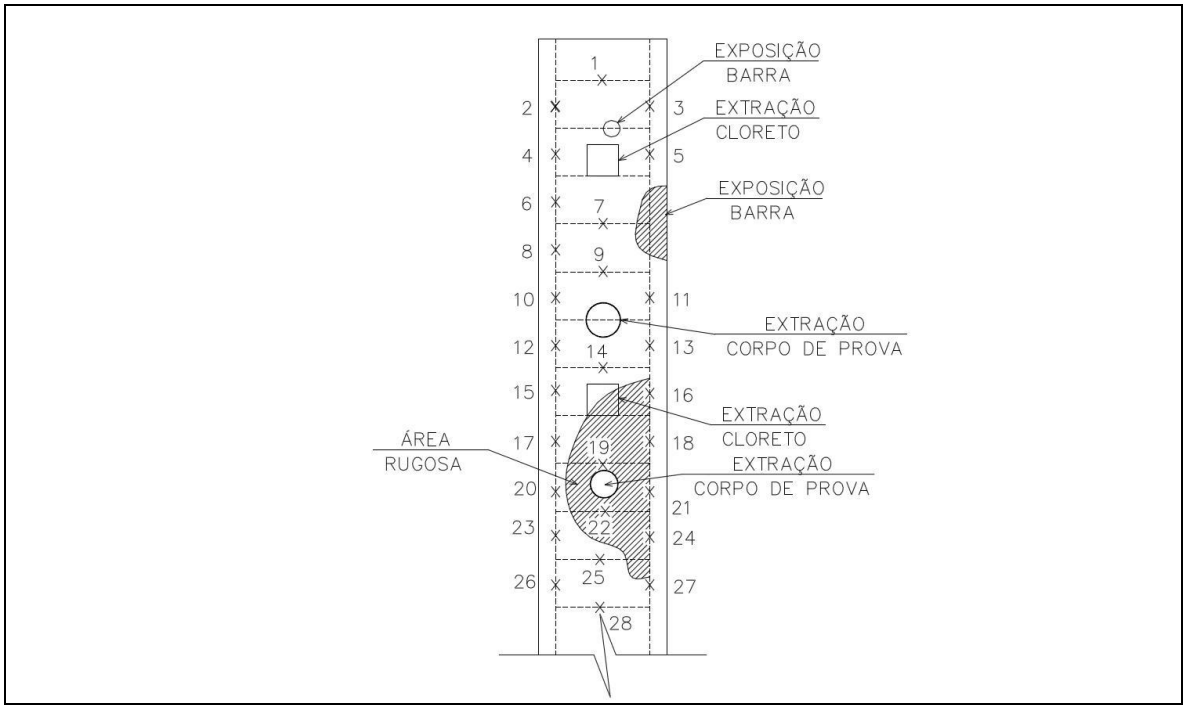

Figura 7 – Desenho esquemático da marcação da grade da armadura de uma das faces laterais de estaca do Píer Novo para as medidas eletroquímicas

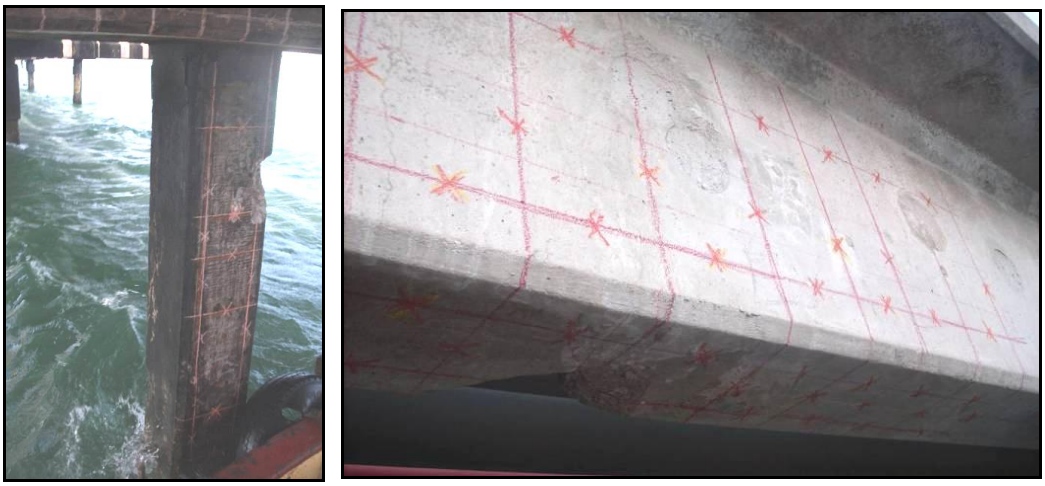

Figura 8 – Grade de armação para medições eletroquímicas em estaca da Ponte de Acesso do Píer Velho e em viga longitudinal do Píer Novo

Figura 9 – Realização de medida da taxa e do potencial de corrosão com o sensor A do Gecor 8 na viga longitudinal do Píer de Atracação 1 e na viga transversal do Píer de Atracação 2 do Píer Velho

Figura 10 – Fissuração sistemática colmatada por carbonatação e por produtos injetados de recuperação e concreto disgregado com armadura exposta corroída (alguns estribos secionados) em vigas longitudinais da Ponte de Acesso do Píer Velho

Figura 11 – Intervenção de reparo e concreto original com fissuração em estaca e manchas (carbonatação, umidade e oxidação) em face inferior de viga transversal da Ponte de Acesso do Píer Velho

Figura 12 – Concreto disgregado com bainha de protensão e armadura exposta corroída (estribos secionados) e fissuração em vigas longitudinais recuperadas do Píer de Atracação 2 do Píer Velho

Figura 13 – Fissuração, manchas e porosidade superficial em vigas longitudinais do Píer Novo. A fratura de uma das fissuras indicou que esta acompanhava o alinhamento do estribo e que tinha profundidade equivalente a espessura do concreto de cobrimento

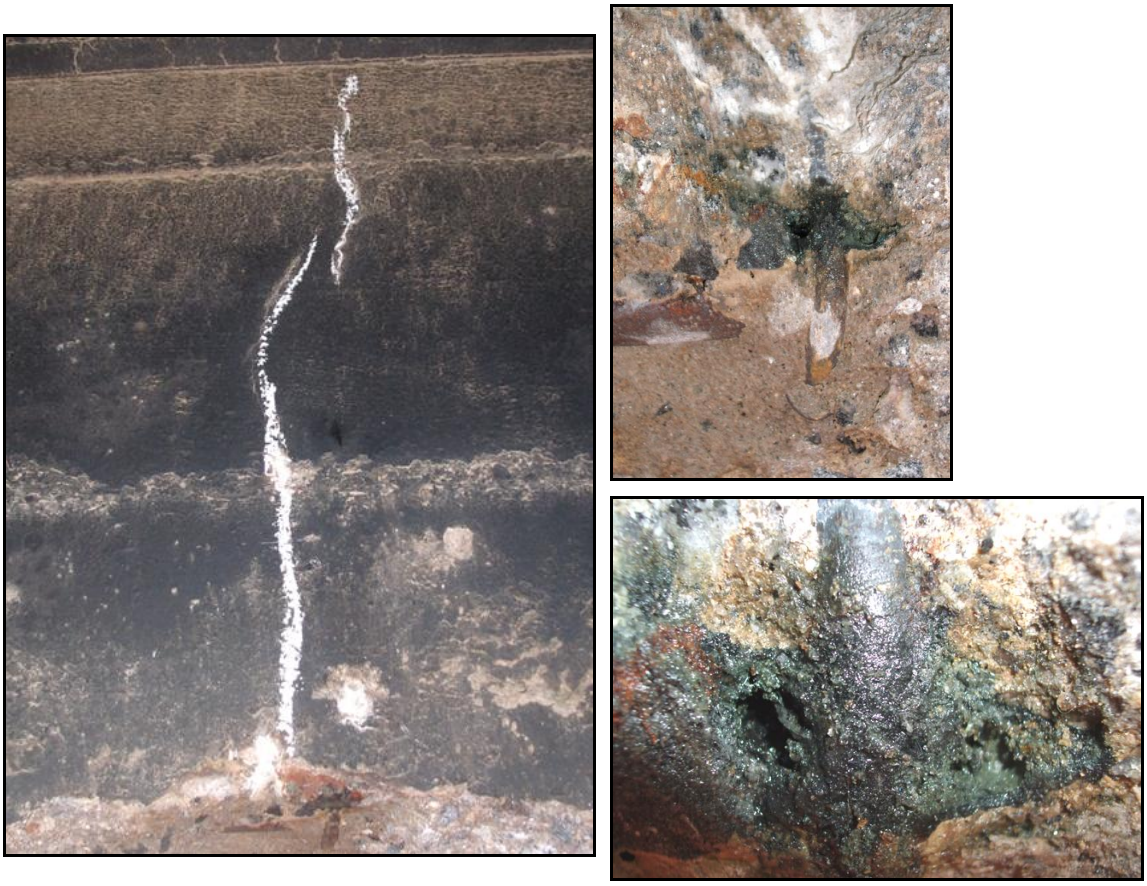

Figura 14 – Fratura em região de uma fissura sem presença de anomalias na face lateral de uma viga longitudinal da Ponte de Acesso do Píer Velho, que mostra o estribo com local sem corrosão (região acinzentada, trecho na face lateral da viga), despassivado (região escurecida, trecho na face inferior da viga) e local com acúmulo de produtos de corrosão (região verde, trecho de quina entre as faces)

Figura 15 – Fratura do concreto para confirmação do estado ativo de corrosão na barra de quina da face inferior com lateral sul da viga longitudinal da Ponte de Acesso do Píer Velho