

# DETECÇÃO DE RISCO DE CORROSÃO AO LADO DE RECUPERAÇÕES

Fonte: H'A - Hormigón y Acero

Tradução: [DETECTION OPF CORROSION RISK BESIDE PATCH REPAIRS.pdf](#)

<file:///C:/Users/Windows/Documents/INFORME%20CHC/DETECTION%20OPF%20CORROSION%20RISK%20BESIDE%20PATCH%20REPAIRS.pdf>

## ABSTRACT

Via de regra, em estruturas de concreto reais, a corrosão das armaduras gera fissuras paralelas ao aço, mas distribuídas de forma aleatória naquela superfície a fragmentação torna-se irregular. Durante a inspeção e planejamento de reparo de remendo subsequente, as áreas mais intensamente fissuradas são geralmente consideradas como uma indicação de maior corrosão. A unidade para justificar a necessidade de medidas de reparo, por sua vez, é a área das regiões afetadas pelas fissuras. **Na medida em que a área corroída é normalmente maior do que a área afetada pela trinca, se apenas esta última for reparada, os danos podem reaparecer anos ou mesmo meses após a intervenção devido à existência de corrosão do aço não detectada.** A quantidade de área que precisa de remendo na recuperação é uma questão importante com implicações financeiras e de segurança significativas. Os mecanismos que regem a corrosão, a viabilidade do sistema galvânico e acoplamento entre as regiões repassivadas e adjacentes é discutido a seguir. O artigo também aborda o efeito do uso de primers de aço em zonas reparadas e agentes de ligação entre os materiais existentes e os materiais de reparo. Da mesma forma, descreve as três técnicas que podem ser usadas para determinar o quanto de concreto contaminado deve ser removido: **dois tipos de análises químicas (pH ou teor de cloreto) e medições de parâmetro de corrosão (taxa de corrosão) em áreas adjacentes à zona fissurada ou reparada.**

## 1.INTRODUÇÃO

Com o envelhecimento gradual do concreto constituinte, um número crescente de edifícios e infraestruturas estão se deteriorando. Onde o concreto estrutural está envolvido, a maioria dos tipos de danos generalizados é a corrosão do reforço, causada principalmente por cloretos (em ambientes marinhos) ou entrada de sal de degelo ou carbonatação progressiva da cobertura de concreto. Quando aparece a decomposição, adota a forma de enferrujamento ou fissura superficial paralela ao aço. Se ficar sem reparos, tais danos podem fazer com que o suporte de carga sofra redução abaixo das especificações de projeto.

Como o reparo envolve um investimento significativo do proprietário, sua otimização tem implicações financeiras, especialmente quando são um conjunto de edifícios ou várias infraestruturas são afetadas. Autoridades públicas responsáveis pela segurança rodoviária, ferroviária ou operacionalidade portuária se deparam com essa situação.

O chamado reparo de 'patch' (reparo-remendo) aplicado localmente, consiste nas medidas listadas a seguir, sendo a primeira delas a fiscalização para identificação das áreas que necessitam de intervenção (figura 1):

- a) identificação do dano e das zonas a serem reparadas
- b) remoção da cobertura de concreto danificada.
- c) desenferrujamento do aço e (opcional) aplicação de um primer para aumentar a proteção contra corrosão ou fortalecer a ligação ao novo material.
- d) (opcional) aplicação de um agente de ligação entre o concreto e o novo material e restauração da geometria do membro com o novo material para substituir a cobertura anterior.
- e) aplicação de novo revestimento ou pintura para ocultar o remendo.

Esta operação é demorada e trabalhosa, pois envolve uma mão de obra cuidadosa para garantir que o concreto recupere sua funcionalidade (boa ligação entre o material novo e o antigo) e para evitar rachaduras em qualquer um dos estágios intermediários.

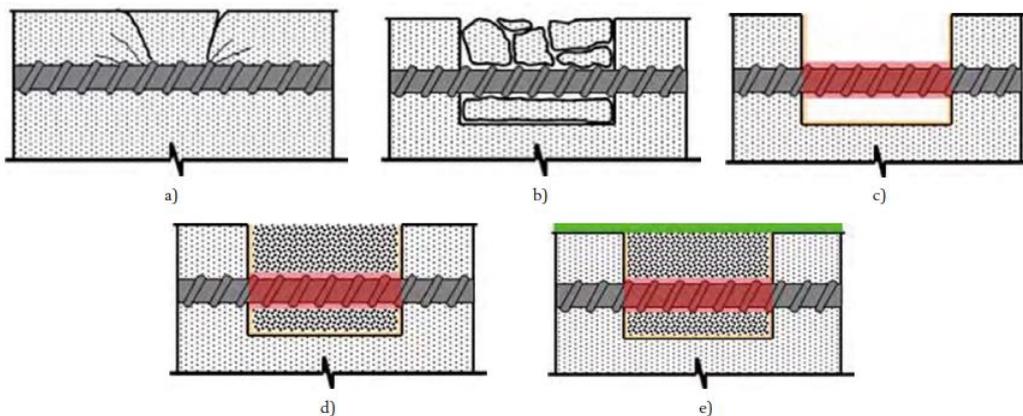


Figure 1. Stages in patch repair: a) inspection to detect damaged areas; b) removal of damaged concrete; c) reinforcement de-rusting and primer application; d) geometric restoration, and e) replacement of concrete cover.

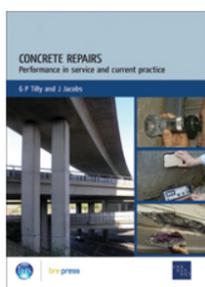
➔ **A experiência tem mostrado que tais reparos têm vida curta, entretanto, mesmo quando o acabamento é adequado [1].** Uma pesquisa realizada no âmbito do projeto europeu CONREPNET [2] encontrou que depois de 20 anos, apenas 5% dos **patches (remendo-reparo)** nunca demandaram mais reparos. Uma série de causas foram definidas, incluindo identificação incorreta das áreas corroídas, inadequada escolha ou colocação inadequada de materiais no local. Os próprios materiais reparados foram considerados duráveis, embora sua composição tenha mudado muito ao longo do tempo, dada as melhorias constantes introduzidas pelos fabricantes.

➔ **Uma das principais razões apresentadas para a falha do “patch” (remendo-reparo) foi que a área reparada era menor do que a área afetada. A área da superfície afetada por manchas de ferrugem ou fissuras não é necessariamente indicativa de onde a corrosão se instalou. A região muitas vezes se estende além da área contendo tais sinais, e como o remendo envolve a remoção do visivelmente deteriorado e cobertura**

de concreto visivelmente deteriorada, as áreas adjacentes em risco de corrosão podem tornar-se despassivadas após o reparo. Em outras palavras, um par galvânico (micropilha de corrosão) pode se formar entre a zona reparada, agindo como um cátodo, e a zona não reparada, agindo como um ânodo, que se torna despassivada. A principal preocupação em torno do local ou reparo de remendo é, portanto, seu mecanismo eletroquímico eficiente. O debate está em andamento sobre o efeito do acoplamento galvânico induzido por reparo de remendo, com alguns autores [3-11] preocupados pelo fato que acelera a corrosão nas áreas adjacentes. Outros [12-24], no entanto, mostraram que o efeito desaparece no curto prazo ou declina-se na presença de primers de aço. Consenso em torno do efeito de casal galvânico e sua duração em estruturas reais ou uso de primers em aço provou ser difícil, porque os estudos sobre o assunto foram conduzidos sob diferentes climas e condições de laboratório, além de diferentes tipos de espécimes.

Este artigo aborda essa questão problemática, descrevendo em os resultados e a discussão sobre o que é considerado um "par galvânico", possíveis taxas de corrosão e circunstâncias de despassivação. Isto também resume e analisa descobertas anteriores [14-24] na medição do casal galvânico que simula o uso de diferentes tipos de primers, teores de cloreto nas áreas adjacentes para as zonas reparadas e o efeito do uso de um agente de ligação entre o novo material e o concreto existente. Uma terceira seção do artigo trata da questão de quanto consertar. Embora, quanto maior a quantidade de concreto danificado removido, mais eficaz é a intervenção, fatores econômicos também devem ser pesados e otimizados, sendo a integridade estrutural comprometida o mínimo possível. Dado, então, que a inspeção deve identificar claramente a extensão do reparo, os testes para determinar a carbonatação restante ou teor de cloreto em as áreas adjacentes às zonas reparadas, juntamente com o uso de técnicas eletroquímicas para medir corrosão, também são brevemente analisadas.

[1]



## Concrete repairs - performance in service and current practice (Downloadable version)

by GP Tilly and J Jacobs (10-Dec-2007)

[Concrete repairs - performance in service and current practice \(Downloadable version\) :](http://www.brebookshop.com)  
[BREbookshop.com](http://www.brebookshop.com)

[www.brebookshop.com/details.jsp?id=321262](http://www.brebookshop.com/details.jsp?id=321262)

[1]

Around 50% of Europe's annual construction budget is spent on refurbishment and repair of existing structures. This report is the culmination of a wide-ranging survey into the performance of both current European concrete repair techniques and inspection practice, and current research projects. It assesses case histories gathered from across the sector from owners of concrete structures, repairers and research institutes, and presents its findings using charts, graphs, tables and photographs. A review of the problems of concrete durability, current issues of sustainability, and the differing expectations of what concrete repairs should achieve, provide an insightful introduction to the subject. The survey was conducted by the CONREPNET network, made up of European research and representative bodies sponsored by the European Commission. Paperback, 56 pages.

Summary, Acknowledgements, abbreviations

1. Introduction

2. Expectations of repairs

3. Performance of repairs in practice

- Background

- Causes of deterioration

- Types of repair

- Performance of repairs

- Causes of repair failure

4. Current repair practice

- Background

- Inspection

- Repair methods

- Quality control

- Comparison with earlier repair practice

- Inspection strategy

5. Current research

- Sizes of research projects

- Research topics

- Outcomes of research projects

6. European standards

- The current position

- Application to performance-based repair

References

Appendices: Concrete repair history questionnaire. Concrete repair methods questionnaire. Concrete repair evaluation methods questionnaire. Concrete repair research questionnaire. Related research projects.

## **2. EXPERIMENTAL**

Os procedimentos analisados abaixo foram realizados em espécimes de laboratório propositadamente preparados ou em membros em edifícios existentes testados in situ. Os tipos de peças de teste são descritos a seguir, e as características específicas do teste são especificadas na respectiva subseção dos resultados.

### **2.1. Amostras usadas para estudar uma possível ação galvânica**

A ação Macrocell foi explorada com uma variedade de dispositivos, tipos de amostra e estruturas existentes. Apenas os procedimentos usados ilustram este artigo, os resultados para os quais foram publicados em outro lugar [14-24], são brevemente descritos abaixo.

1. **Dispositivos do tipo célula de difusão ou eletrodo duplo (figura 2 esquerda):** células de difusão, nas quais um vaso fechado é dividido em duas câmaras por um disco de concreto, são ideais para estudar os efeitos galvânicos porque garantem a separação do ânodo e do cátodo, usam eletrólitos diferentes em cada câmara, podem ser desaerados de forma independente e implantados para testar diferentes tipos de concreto, espessuras de amostra e assim por diante [22,24].

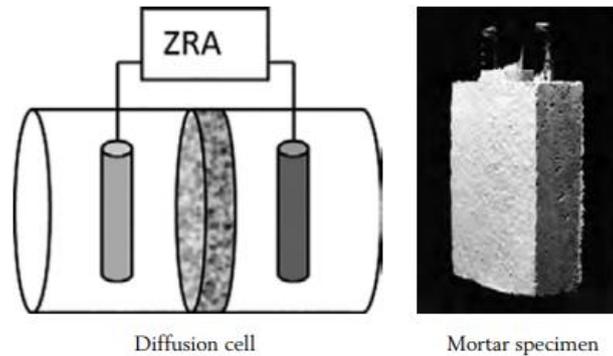


Figure 2. Left: Diffusion cell to study galvanic couples; Right: Laboratory specimen to study galvanic couples.

2. **Amostras com eletrodos embutidos** [15,17, 21] também fornecem o uso de diferentes condições em cada eletrodo (figura 2 à direita).

3. **Vigas ou lajes com vergalhão segmentado (figura 3):** usando concreto, o teste de pares galvânicos consiste em fazer corpos de prova de tamanho médio com pelo menos um contínuo e um barra segmentada como aquela mostrada a título de exemplo em figura 3. Os fios presos aos segmentos possuem uma conexão eletricamente isolada (com fita ou resina) do concreto para evitar a formação de pares galvânicos entre cobre e aço. Com a segmentação, a corrente galvânica ( $I_g$ ) com um amperímetro de resistência zero (ZRA) [16,19,21,24] e a taxa de corrosão ( $I_{corr}$ ) através da técnica Line ar Polarization podem ser medidas separadamente em cada segmento para avaliar o impacto das variáveis estudadas (como umidade, temperatura e teor de cloreto) em relação ao comportamento geral não segmentado.

**Em todos os casos foram utilizadas barras nervuradas.** O espécime tinha duas barras de 60 cm de comprimento colocadas na parte inferior e duas na parte superior conforme mostrado na foto da figura 3. Aqueles na parte inferior e um na zona superior eram contínuos. A outra barra na zona superior foi segmentada em sete partes eletricamente conectadas. Cada parte da barra segmentada tinha 8 cm de comprimento de exposição e todas as barras de reforço eram de diâmetro 6 mm. Eles foram numerados da esquerda da figura 1 até a direita. A parte inferior da viga foi feita com material concreto isento de cloreto, enquanto a parte superior tinha 0,7% de cloretos na mistura de água.

Todas as barras foram desengorduradas e as zonas foram iniciadas com o Sistema 1, 2, 3 ou 4 descrito abaixo de acordo com as especificações do fabricante. Fios elétricos

foram soldados a uma extremidade de cada segmento para posterior conexão aos instrumentos externos, isolando devidamente as soldas com resina epóxi e fita. A própria fundição consistia em um processo de três etapas: primeiro, o fundo foi fundido com concreto sem cloreto. Os lados da área reparada foram vazados com água contendo 0,7% íons de cloreto (por peso de cimento) na forma de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Após 8 dias de cura na câmara de umidade, o centro e parte superior (área reparada) dos espécimes foram preenchidos com o reparo material para simular remendo e curado por mais 28 d. Os sólidos usados para moldar as vigas foram misturados com água contendo 0,7% de íons cloreto (por peso de cimento) na forma de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Esta proporção estava ligeiramente acima o limite de despassivação de aço que geralmente é assumido como estar entre 0,4-0,6%. A ação corrosiva foi confirmada por medir a taxa de corrosão desde o início da mistura registrando valores iniciais acima de  $10 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ .

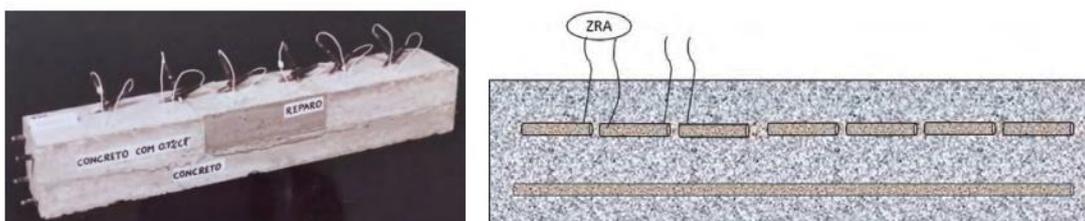


Figure 3. Segmented reinforcing bar to study galvanic current.

Na primeira etapa de fundição da amostra descrita acima (feixe fundo e laterais), o concreto utilizado foi feito com cimento Portland (OPC), uma relação água / cimento de 0,65 e cimento: areia: proporções de cascalho de 1: 2,9: 3.2. Os  $2330 \text{ kg} / \text{m}^3$  argamassa padrão usada como material de reparo de referência no centro da viga foi preparado com  $530 \text{ kg} / \text{m}^3$  do mesmo OPC como na etapa 1, uma relação a / c de 0,42, uma relação cimento: areia de 1: 3 e 1,5% (cimento em peso) de plastificante. Esta área central é referida daqui em diante como a "**zona reparada**".

As diferenças que distinguem os vários testes consistiram em variando: 1) o tipo de primer ou agente de ligação usado entre o material novo e existente; 2) a concentração de cloreto em A mistura; e 3) umidade e temperatura.

Os primers usados foram os seguintes:

o Sistema 1: sem primer, repassivação alcalina padrão com a argamassa de reparo de referência.

o Sistema 2: componente único, epóxi com alto teor de Zn primer de resina (com 74,8% de probabilidade de pó de zinco na interface entre o primer endurecido e o reforço) com ação de proteção catódica. A espessura seca do primer aplicado em duas camadas foi estimado por meio estereomicroscópico de  $330 \mu\text{m}$ .

o Sistema 3: combinação barreira / sistema de inibição consistindo em dispersão acrílica com diciclohexilamina para inibir a corrosão, OPC adicionado com cromo óxido como pigmento antioxidante e nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ) como um inibidor de corrosão.

o Sistema 4: mecanismo de barreira baseado em resina epóxi de dois componentes e endurecedor - Concentração de cloreto: íon cloreto foi adicionado aos concretos a uma concentração de 0,7%, o valor limite encontrado para induzir a despassivação, ou superior.

Concentração de cloreto: íon cloreto foi adicionado ao concretos a uma concentração de 0,7%, o valor limite encontrado para induzir a desassivação, ou superior.

Os espécimes com barras segmentadas após os 28 dias de cura foram posteriormente armazenados sob as condições ambientais listados abaixo, a fim de estudar o comportamento galvânico sob um faixa de conteúdo de umidade [16,19].

1. Reparo (8 dias após a fundição).
2. Cura (24 d).
3. Armazenamento com umidade relativa de 80% a 90% (127 d).
4. Imersão parcial (186 d).
5. Secagem ao ar (1292 d).
6. Armazenamento a 85% UR (1382 d).
7. Armazenamento a 100% UR (1492 d)

4. Estruturas existentes estudadas: como as estruturas existentes não perfuram nenhum reforço segmentado, a corrente galvânica poderia não ser medido, embora as leituras da taxa de corrosão tenham sido tomadas com um corrosímetro com anel de proteção 1 (Veja a descrição em uma subseção subsequente). Dois estudos de caso foram conduzidos para a presente revisão:

a. Um edifício no México cujas colunas (figura 4) exibiu corrosão em diferentes alturas em diferentes lados. Como mostra a figura, os primers testados foram com base, em um, em um inibidor de corrosão, no segundo na formação de barreira e no terceiro pó de zinco como proteção catódica. Agentes de ligação entre os novos e concreto existente foram usados da mesma forma.



Column with corrosion stains at different heights

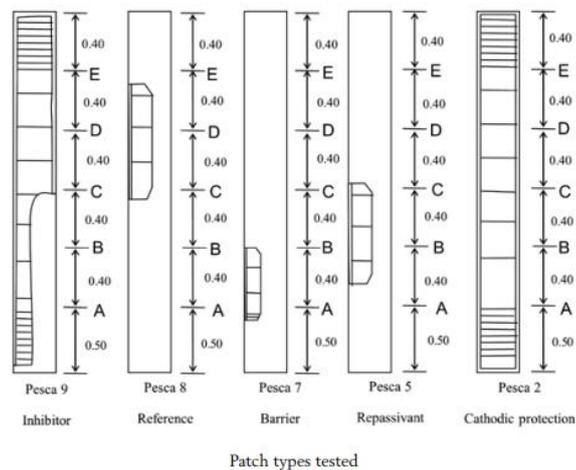


Figure 4. Columns on a building in Mexico repaired using different systems.

b. Um viaduto na autoestrada AP-1 patch2 da Espanha como parte do projeto EXTREPHOR [25], no qual in situ métodos de medição de teor de cloreto foram testados e taxas de corrosão determinadas antes e depois do reparo. Uma visão geral de sua junção de dois níveis é mostrada na fotografia superior da figura 5. O meio da figura mostra três estágios do poço do píer e a faixa inferior três do reparo da tampa do píer. As áreas afetadas incluíram os topos das vigas e cais tampas e eixos. A área reparada estendeu-se 10 cm além do dano de corrosão do aço visível quando a cobertura de concreto foi removida, mesmo onde o concreto não exibiu nenhuma deterioração nas áreas adjacentes.



Figure 5. Viaduct on motorway AP-1 (Spain) patch-repaired.<sup>3</sup>

O procedimento de proteção de reparo aplicado envolveu o uso de:

- um primer com um inibidor de corrosão, aplicado ao reforço antes da regeneração do concreto com um reparo argamassa.
- uma argamassa de reparo tixotrópica contendo corrosão orgânica em hibidores.

- uma argamassa fluida em certas áreas onde argamassas tixotrópicas não pôde ser usado.
- uma tinta de resina acrílica repelente, permeável ao vapor de água, elástica, anti-carbonatante, hidrófugo e agente atmosférico agressivo (CO<sub>2</sub> - SO<sub>2</sub>).

## 2.2. Técnicas

Esta subseção discute as técnicas usadas nos projetos EXTRE PHOR [25] e XRF-CODE [26]

### 2.2.1. Medição in situ de carbonatação de concreto e teor de cloreto

**A carbonatação pode ser facilmente detectada com um indicador de pH (embora a fenolftaleína tenha sido identificada como cancerígena, substâncias alternativas seguras estão agora disponíveis) aplicadas in situ sem necessidade de retardar a sequência de remoção do concreto danificado.** Nem todo concreto carbonatado precisa ser necessariamente removido, no entanto, porque a taxa de corrosão pode ser baixa, não foi necessária a remoção do concreto. **Ou seja, no concreto carbonatado a medição da taxa de corrosão é uma informação crítica para a preservação do concreto original.**

**Onde os cloretos estão presentes, a taxa de corrosão denota o risco envolvido, embora a concentração de cloreto em regiões não inicialmente visadas para reparo também deva ser verificada.** No entanto, o teor de cloreto é muito menos facilmente detectado in situ do que carbonatação. **O único indicador de cor adequado, nitrato de prata, entrega rotineiramente resultados errôneos in situ,** entre outros, porque exige várias horas de exposição a raios ultravioleta para distinguir entre o tom escuro da prata e o tom pálido de cloreto de prata.

Como um dos objetivos do projeto EXTREPHOR era encontrar um método in situ para analisar o teor de cloreto, uma série de abordagens químicas foram estudadas:

- kits de análise rápida de cloreto usados para analisar a qualidade da água.
- o método do eletrodo seletivo de íon cloreto.
- o método de medição da salinidade da piscina.
- o método de turbidez.

À luz das desvantagens desses métodos para uso no local durante as operações de reparo, a literatura foi revisada para possível métodos não destrutivos aplicáveis ao concreto. **A maioria promissor provou ser fluorescência de raios-X (XRF), em uso para algum tempo em laboratórios e para os quais dispositivos portáteis estavam começando a ser comercializados (figura 6). Sua adequação foi estudada como parte do projeto XRF-CODE [26].** A metodologia envolvida parecia ser simples, para as amostras não exigia necessariamente pré-tratamento, visto que o feixe de raio-X pode ser focado na superfície de concreto diretamente. Tal dispositivos são equipados com telas que exibem e registram as leituras indicativas das proporções na amostra de certos elementos pré-selecionados.



Figure 6. Handheld XRF device measuring chlorides in a concrete specimen previously exposed to natural seawater.

### 2.2.2. Medições eletroquímicas

Essencialmente, dois tipos de medidas são usados para estudar casais galvânicos:

- corrente galvânica ( $I_{galv}$ ).
- taxa de corrosão ( $I_{corr}$ )

Embora as duas medições às vezes sejam confundidas com uns aos outros ou considerados sinônimos, eles realmente entregam diferentes tipos de resultados, conforme observado na discussão abaixo. Uma das principais diferenças é que  $I_{galv}$  é dividido pela área de o ânodo, enquanto  $I_{corr}$  é dividido pelo total (ânodo + cátodo) área. Eles não podem, portanto, ser comparados sem normalização de uma das duas correntes para a área usada na outra.

Os procedimentos de medição incluíram o seguinte.

A corrente galvânica ( $I_{galv}$ ) foi medida com um amperímetro de resistência zero (ZRA) usado para fazer leituras anódicas e catódicas separadas em cada segmento. O ZRA mantém uma resistência nula entre os dois eletrodos e mede a corrente entre eles no potencial misto. Tempo de medição variou com o tipo de teste.

o Em amostras de células de difusão, os eletrodos podem estar conectados de forma ininterrupta ou de outra forma e a taxa de corrosão medido para cima ( $I_{corr}$ , para cima) ou para baixo ( $I_{corr}$ , para baixo) -stream de tanto o desconectado quanto o conectado ( $I_{corr}$  e  $I_{galv}$ ) eletrodos.

o Nas vigas preparadas em laboratório com todos os segmentos conectado, o ZRA foi inserido entre os segmentos 1 e 2, convencionalmente considerando o fio conectado ao segmento 1 o cátodo (pólo negativo) e aquele conectado para o segmento 2 o ânodo

(pólo positivo). Em outras palavras, quando Igalv foi positivo no layout convencional, o segmento 2 era anódico em relação ao segmento 1 e vice-versa: quando a leitura de I<sub>g</sub> era negativa, o segmento 2 era catódico em relação ao segmento 1.

Depois que a primeira leitura foi gravada, os fios entre os segmentos 1 e 2 foram reconectados e o ZRA foi inserido entre os segmentos 2 e 3, com o segmento 2 como cátodo e segmento 3 como ânodo. Este mesmo procedimento foi repetido para medir o Igalv nos seis intervalos inter segmentais, interpretando os sinais nos valores descritos. Cada segmento é contribuição para o Igalv total foi encontrada atribuindo o primeiro lendo para o segmento 1 e a diferença algébrica entre esse e o seguinte valor para o segmento 2 e assim por diante. Desde a cada viga tinha uma barra contínua e uma barra segmentada, análises eletroquímicas podem ser conduzidas para cada área do feixe separadamente e seu comportamento anódico ou catódico determinado.

a) Seguindo a prática de rotina, a taxa de corrosão (I<sub>corr</sub>) foi medido em termos de resistência de polarização (R<sub>p</sub>), também conhecido como resistência de polarização linear (LPR), que em ao mesmo tempo, oferece potencial de corrosão (E<sub>corr</sub>) e dados de resistência ambiental (R<sub>e</sub>) [27]. A técnica implantada consistia em aplicar uma corrente de baixa intensidade ao bar e medir a variação do potencial induzido. R<sub>p</sub> foi encontrado como a razão ΔE / ΔI e taxa de corrosão, I<sub>corr</sub>, com a expressão:

$$I_{corr} \left( \frac{\mu A}{cm^2} \right) = \frac{26}{R_p Area} \quad (1)$$

Dado que em grandes espécimes, como vigas ou colunas ou grandes membros no local, a área polarizada é desconhecida, R<sub>p</sub> deve ser medido com um medidor de taxa de corrosão específico. Aqui, o instrumento usado em todo, um dispositivo portátil 5 , foi equipado com um anel de proteção que confinou a corrente a uma área específica [28]. Mais especificamente, a sonda de medição para o auxiliar central eletrodo abrigava um anel de proteção governado por dois minúsculos eletrodos inserido entre os eletrodos central e de guarda para controlar a corrente neste último, conforme mostrado na figura 7. A técnica consistia na aplicação de uma corrente de baixa intensidade ao reforço conforme ilustrado na figura.

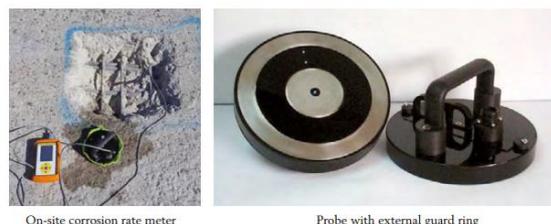


Figure 7. Handheld<sup>®</sup> as used on site and probe with guard ring, central auxiliary electrode and control electrodes between these two.

Os critérios de nível de corrosão aplicados foram os estabelecidos em Recomendações RILEM [29] e fornecidas na tabela 1.

**TABLE 1.**  
Corrosion levels and reinforcement condition by corrosion rate value.

Corrosion level	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{year}$	Rebar condition
Negligible	< 0.1	< 1	Passive
Low	0.1 – 0.5	1 – 5	Depassivated, low humidity concrete
Moderate	0.5 – 1	5 – 10	Active corrosion, medium humidity
High	> 1	>10	Large areas corroding in wet concrete

### 3. RESULTADOS

Os resultados são fornecidos aqui apenas para os testes relevantes aos primários objetivos do estudo, ou seja, identificar as áreas que precisam de reparo e, subsequentemente, monitorar a eficácia do reparo.

#### 3.1. Células de difusão

Os resultados apresentados na figura 8, extraídos de relatórios anteriores [22,24], ilustram o mecanismo que rege o par galvânico formado. A célula (figura 2) continha uma solução de NaOH 0,1 M para induzir o comportamento catódico no metal. Uma barra feita do mesmo aço foi colocada em uma solução de  $\text{FeCl}_2$  0,05 M (para intensificar o comportamento anódico) na outra câmara, desaerada com nitrogênio fluindo continuamente.

A figura mostra os potenciais de corrosão antes e depois conectar os eletrodos. O teste também foi projetado para estudar o efeito de inserir resistência elétrica no circuito para simular diferentes graus de saturação do concreto. Antes de conectar o aço, a resistência obviamente não teve efeito, com o ânodo exibindo valores em torno de -600 mV (calomelano) e o cátodo de cerca de -400 mV, independentemente da resistência no circuito externo. Após a conexão, o vergalhão não foi polarizado até a resistência cair abaixo de 104 ohms. Mais baixo valores, potencial anódico e catódico tenderam a convergir, como esperado, embora não tenham atingido o mesmo valor mesmo em resistência muito baixa, pois a resistência no disco de concreto era muito alta para acomodar tal concorrência.

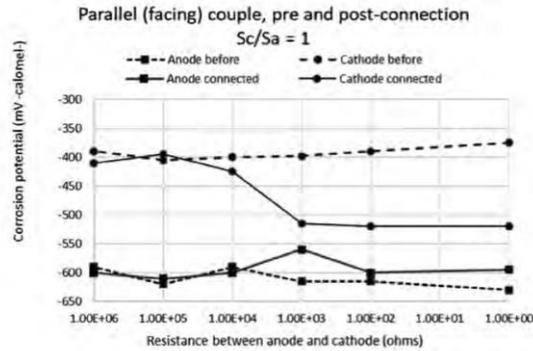


Figure 8. Effect of resistance in the circuit on anode and cathode potential before and after connection ( $S_c/S_a$  is the ratio between the surface of the cathode to the surface of the anode).

### 3.2. Reforço segmentado

Os resultados para reparo de remendo de vergalhão segmentado também foram extraídos de relatórios anteriores, neste caso em vigas de concreto e lajes. A Figura 9 mostra a variação na corrente galvânica densidade (dividida pela área do ânodo) com a área do cátodo / ânodo razão de área ( $S_c / S_a$ ) [20,21,24]. A figura reproduz separadamente resultados de três testes conduzidos em barras com geometrias amplamente diferentes, com barras definidas linearmente ou em paralelo. Quando a proporção aumentou, ou seja, quando o valor do ânodo diminuiu ou o valor do cátodo aumentou, a corrente galvânica aumentou com ele. Nos arranjos lineares, o aumento inicialmente exponencial achatado em razões  $S_c / S_a$  mais altas (isto é, tendiam a um limite superior) e onde os eletrodos foram colocados em paralelo, o aumento foi linear. O a descoberta mais significativa foi que as correntes não excederam um valor de ânodo de cerca de  $30 \mu A / cm^2$  e quando o ânodo era maior ou igual ao cátodo as correntes eram comparativamente pequenas, em torno de  $1 \mu A / cm^2$ . Das várias inferências que podem ser extraídas desses dados, a de maior relevância aqui é que (na ausência de dados de outros autores) na medida em que os valores coincidiram para três testes separados, eles podem muito provavelmente ser passíveis de extrapolação para outras configurações. As expressões dadas na figura podem, então, ser usado para fins de previsão.

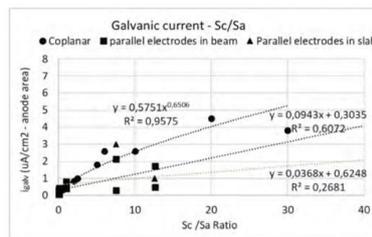


Figure 9. Galvanic current ( $I_{gal}$ ) vs cathode/anode area ( $S_c/S_a$ ) ratio [20,21,24].

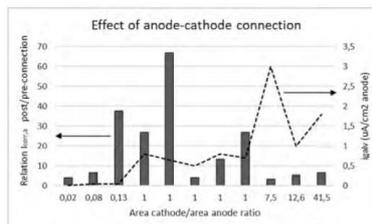


Figure 10. Variation in pre/post-connection anode current ( $I_{an}$ ) ratio and in galvanic current ( $I_{gal}$ ) with cathode area/anode area ( $S_c/S_a$ ) ratio.

Duas tendências são mostradas na figura 10: o aumento da corrente galvânica com a relação  $S_c / S_a$  em um dos casos analisados anteriormente [24] e a relação entre o  $I_{corr}$  pré e pós-conexão,  $\chi$  (dividido apenas pela área anódica) [24], (catódica eficácia,  $\chi$ ):

$$\chi = \frac{I_{corr,a} \text{ after connection}}{I_{corr,a} \text{ before connection}} \quad (2)$$

Como essa proporção revela a extensão da intensificação da corrosão quando catodos maiores são conectados, ele pode ser usado para avaliar o efeito de  $S_c / S_a$  em termos de seu valor efetivo, ou seja, o valor do aumento da corrosão na área anódica. A corrente galvânica representa apenas parte do total, conforme indicado pela expressão:

$$I_{corr} = I_{micro} + I_{galv} \quad (3)$$

Os resultados mostraram que a corrosão não foi acentuada na área anódica quando catodos maiores foram conectados. Os achados podem até ser considerados estranhos, denotando alta eficácia na área proporções de 1 e eficácia insignificante onde tais proporções eram maiores ou menores que 1. A explicação está na posição de os segmentos conectados (o teste foi realizado em uma laje com barras paralelas). Em outras palavras, a resistência do circuito teve um impacto adicional em que a eficácia foi governada pela combinação ação das relações de área e resistência do circuito, em vez de tamanho do cátodo sozinho.

Outros testes foram realizados em espécimes prismáticos como, como mostrado na figura 3 [16,19], onde a área central da barra segmentada foi reparada. Nesses ensaios, as variações em todos os parâmetros eletroquímicos com o tempo, temperatura ambiente e umidade foram monitorados e os três tipos de primers de reforço descritos acima e plotados nas figuras 11 a 14, foram estudados. Valores totais de corrente galvânica (não divididos por nenhuma área) para os sete segmentos embutidos perto do topo do membro (os três centros mais situados na zona reparada) são dados nas figuras 11, 12 e 13. As medições foram lidas 3 dias após o reparo (24 d após a fabricação), 103 dias após o reparo e armazenamento a 80% a 90% UR e 1492 dias após o reparo, > 200 dias, dos quais acima de 95% UR. As condições ambientais prevalecentes durante o teste foram sequenciadas conforme listado em a subseção sobre materiais.

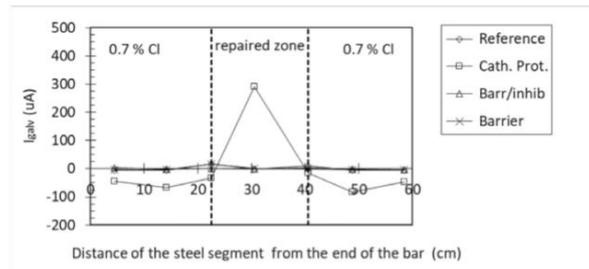


Figure 11. Total galvanic current ( $I_{galv}$ ) in the seven segments of the bar positioned in the patch repair zone 3 d after repair (anodic behaviour in the repaired zone observed only for the cathodic protection system consisting in zinc powder in polymeric matrix) [19].

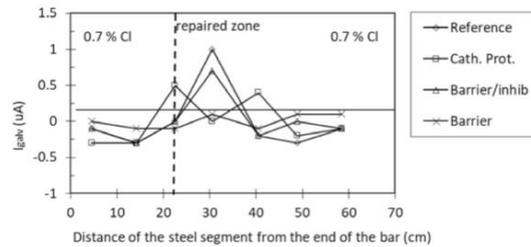


Figure 12. Total galvanic current ( $I_{galv}$ ) in the seven segments of the bar with the patch repair zone 1492 days after repair (all systems observed to have very low current) [19].

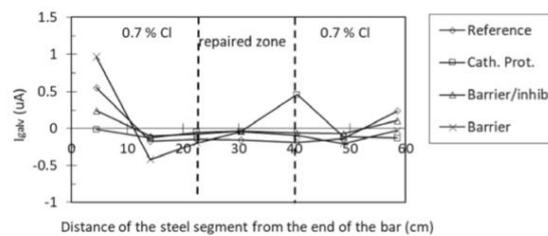


Figure 13. Total galvanic current ( $I_{galv}$ ) in the seven segments of the bar with the patch repair zone 3 days after repair [all systems observed to have very low current with incipient anodic values in the outer-most segments, possibly attributable to carbonation] [19].

A inferência tirada dessas descobertas é que quando uma área é reparada, os segmentos nas áreas adjacentes (na presença de 0,7% de cloretos, um pouco mais alto do que o limiar de indução de corrosão) começam a corroer, embora muito ligeiramente e por um curto período de tempo. Depois de alguns dias, as correntes mudem o sinal, adotando valores desprezíveis, independentemente das condições subsequentes de temperatura e umidade. Uma comparação de os resultados para os primers mostraram que enquanto os que formaram barreiras apenas ou abrigaram tanto o agente de barreira quanto o inibidor exibiu correntes galvânicas muito baixas, a que contém zinco em pó logicamente obtido proporcionou proteção catódica, induzindo as áreas adjacentes para atuar como cátodos.

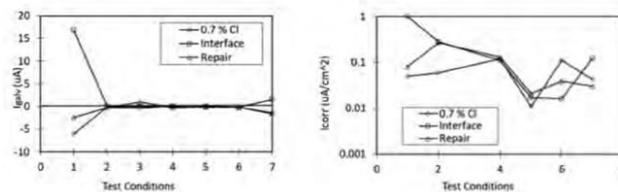


Figure 14. Variation in galvanic current over time (test conditions with time were listed in the Experimental chapter) in the repaired zone, at the repair/existing concrete interface and in the unrepaired zone (left: total galvanic current, significant only in the first few days; right: corrosion rate (<math>< 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2</math> after the first two test conditions) [19].

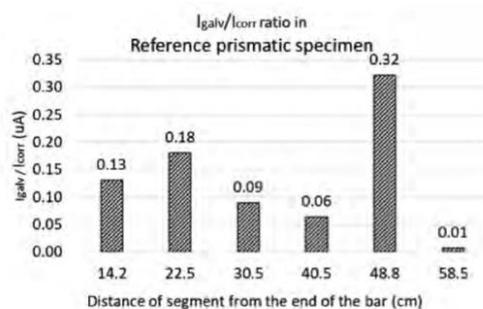


Figure 15. Variation in galvanic current with corrosion rate in the reference specimen [19].

Figura 14, que representa o espécime prismático de referência [19], confirma as correntes galvânicas quase nulas e taxas de corrosão na zona central reparada, o segmento na interface com o concreto existente e aquele no concreto existente adicionado com 0,7% de cloretos. Apesar das sucessivas mudanças na umidade e temperatura aplicadas, os resultados mostraram corrosão quase nula, exceto na primeira medição após o reparo. A Figura 15, por sua vez, representa graficamente a relação entre corrente galvânica e taxa de corrosão nos segmentos de amostra de referência após o último período de teste de 109 dias (cerca de 4,5 anos após a fundição), durante os quais a amostra foi armazenada a 40 ° C e > 95% RH. Exceto em um segmento, a corrente galvânica ascendeu a 20% ou menos da taxa de corrosão. Todos esses achados denotaram risco insignificante de intensificação da corrosão, seja ou não o aço foi preparado, embora o primer de pó de zinco foi indiscutivelmente eficaz porque proporcionou proteção extra às áreas adjacentes. O uso de agentes de ligação [15, 18] entre o novo e os concretos existentes mostraram-se benéficos, pois também reduziram ligeiramente as taxas de corrosão nas áreas adjacentes.

### 3.3. Viaduto reparado

A Figura 16 dá alguns dos altos valores de corrosão medidos na tampa do cais no viaduto antes do reparo e as leituras em torno da zona em um píer em reparo, denotando passividade em as regiões adjacentes.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. O par galvânico: características básicas

Um par galvânico é definido para existir quando dois metais vêm em contato no mesmo eletrólito ou quando uma diferença de potencial surge em um mesmo metal

devido, por exemplo, à aspereza da superfície. Uma corrente é então gerada entre os dois metais ou entre as áreas com potencial diferente no mesmo metal para compensar a diferença de potencial. Um metal ou área (o ânodo) doa elétrons para o outro (cátodo). A corrente resultante ( $I$ ) segue Ohm:  $I = dE/R$ , onde  $dE$  é a diferença de potencial e circuito  $R$  resistência.

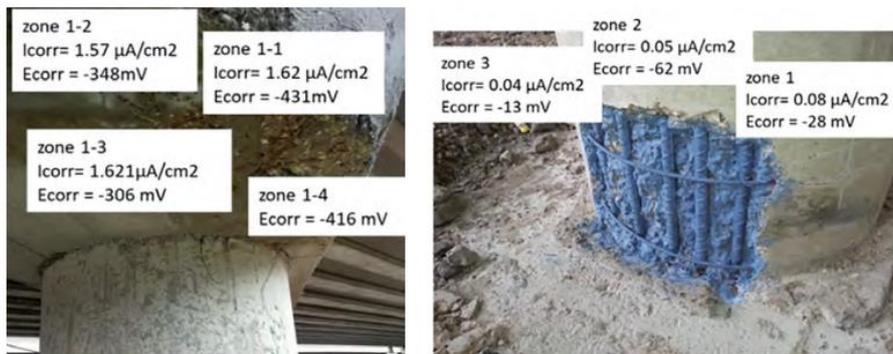
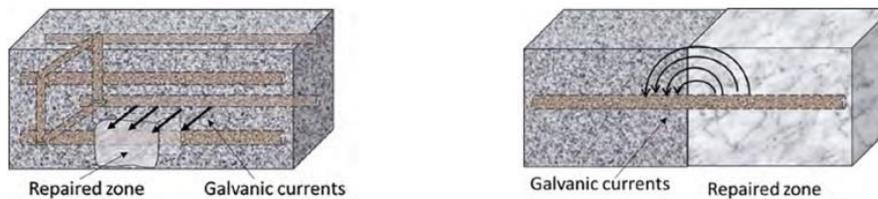


Figure 16. Left: corrosion values on the viaduct pier cap prior to repair; right: corrosion values during repair on a viaduct pier.



Galvanic couple on parallel bars

Galvanic current in linear bars

Figure 17. Left: galvanic currents in parallel bars; right: galvanic current in linear bars.

Como mostra a figura 17, a resistência no meio varia dependendo se os metais ou zonas são lineares ou paralelas, assim como a distribuição de corrente galvânica, que é uniforme onde os eletrodos são paralelos e tendem para baixo com o aumento da distância em layouts lineares. Os pares paralelos representados simulam situações em que vergalhões paralelos à barra reparada são eletricamente conectados a ela através de estribos, enquanto os pares lineares são gerado na barra reparada em áreas adjacentes ao reparado zona. Este último também pode ser encontrado nas laterais do espécime ou membro, onde também podem existir casais paralelos. Outro princípio essencial é que a corrosão do aço no concreto se desenvolve principalmente em resposta às micro células [12,20], ou seja, conforme discutido na seção de resultados, a taxa de corrosão é governada principalmente pelas muitas células geradas na área corroída, enquanto a corrente galvânica em contas de macro célula para apenas uma pequena proporção da corrente total (figura 18 e Equação [3]). Em outras palavras, dada a alta resistência elétrica no concreto, a corrosão decorrente da criação de componentes elétricos circuitos através do material é o resultado de circuitos que cobrem distâncias curtas (mícrons a cm) em vez de circuitos envolvendo movimentos de íons em distâncias mais longas. A exceção é concreto subaquático, onde o meio externo favorece a circulação de correntes galvânicas.

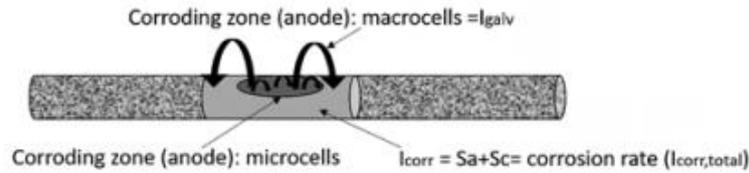


Figure 18. Corrosion generated primarily by microcells (intensity generally lower in macrocells; cathodic area limited by electrical resistance in circuit).

Isso explica por que a ação de pares de macro células induzidas por reparo de remendo é confinada a uma pequena distância e pouco significativa ao longo das interfaces de zonas reparadas / existentes, onde eles persistem apenas no curto prazo. Se as áreas adjacentes ao reparados zonas corroem, é porque continuam cloretos em maior do que a concentração crítica ou foram carbonatados.

#### 4.2. Escopo de correntes galvânicas em zonas reparadas por remendo

As Figuras 11 a 14 mostram que a corrente galvânica é detectada nos primeiros dias após o reparo nas áreas mais próximas à interface, mas não nas regiões mais distantes. Duas inferências podem ser extraídas desses dados.

1. **Antes do reparo**, a área severamente corroída pode proteger caoticamente as áreas adjacentes mais próximas. Em outro palavras, as áreas corroídas atuam como ânodos de sacrifício para as áreas adjacentes. Isso foi verificado no estudo da coluna (figura 4), onde as zonas anódica e catódica foram, detectado ao longo de uma mesma barra e o efeito observado foi mais intenso na parte inferior, mais corroída região.
2. **A proteção catódica proporcionada por áreas corroídas desaparece quando são reparadas, enquanto o efeito reverso, conversão para cátodo com corrosão intensificada na área não reparada, tem vida curta (figura 14).** Conseqüentemente, tais áreas adjacentes sofrem corrosão pós-reparo não porque um cátodo foi criado na zona reparada, mas devido à presença de cloretos em níveis mais elevados do que críticos concentrações ou a persistência da carbonatação.

Em outras palavras, a falha em remover todo o concreto contaminado durante os reparos tem implicações não porque as zonas passivas pós-remendadas intensificam a corrosão, mas porque, antes, parte da área que não corroeu funciona como o resultado do papel do ânodo de sacrifício desempenhado pelas áreas corroídas. **Quando tal 'Ânodos de sacrifício' desaparecem, as áreas contaminadas anteriormente protegidas por essa ação galvânica começam a corroer ativamente. Os testes comprovam que o escopo de ambos os métodos catódicos anteriores a proteção e de sua posterior reversão é restrita a uma distância de alguns cm.** Em membros submersos, a área envolvida pode ser maior devido à menor resistência elétrica do médio. Além disso, depende da existência ou não de um ambiente líquido externo onde as correntes podem circular e, claro, sobre a condutividade desse líquido, que é muito alto no caso da água do mar, onde galvânica significativa efeitos podem surgir.

### 4.3. Ação do primer

Uma maneira de eliminar completamente qualquer ação catódica possível, embora limitada na zona recém-reparada, é aplicar um primer para o vergalhão reparado ou agentes de ligação para interromper o circuito de concreto cruzado. Os primers também são recomendados por fabricantes para aumentar a força de ligação do novo material, pois as nervuras no aço de reforço existente podem ter parcialmente ou totalmente desgastado. Os primers melhoram a ligação, então, constituem proteção adicional nas zonas reparadas e podem eliminar potenciais pares de macro células. Esses casais também podem ser eliminados com agentes projetados para melhorar a aderência entre o concreto existente e o novo material de reparo [18].

A ação do primer ilustrada aqui nas figuras 11, 12 e 13 [15,16,19] foi mostrado para depender da natureza do primer. Todos esses produtos eliminaram ou minimizaram as correntes galvânicas que apareciam nos primeiros dias após o reparo, enquanto o primer epóxi zinco até inverteu o efeito, pois proporcionou proteção catódica nas zonas não reparadas. **Essa ação catódica cessou quando todo o zinco no primer oxidou, mas foi suficiente para retardar qualquer corrosão inicial nas áreas adjacentes, mesmo onde contaminado. Após o esgotamento do zinco, no entanto, a corrosão pode começar nessas áreas.**

O primer epóxi cujo único efeito era gerar uma barreira eliminou totalmente a corrente galvânica, embora mudança significativa no comportamento em relação à referência foi observado, pois onde as áreas adjacentes estavam altamente contaminadas, elas corroeram na mesma extensão que iriam na ausência do primer. Pode-se pensar que os primers contendo um inibidor intensificam o efeito catódico na zona reparada. As descobertas para o produto testado aqui, no entanto, mostraram que o efeito é insignificante em relação à referência, onde o novo material passivava o aço de maneira semelhante à observada na referência. Isso atesta a importância de identificar não apenas o tipo de primer, mas as condições de aplicação no reparo, uma vez que pequenas diferenças de manufatura ou comportamento podem enganar o entendimento. Este foi o caso das colunas reparadas em um prédio público no México (figura 4) onde foram testados primers do mesmo tipo (catódico ou inibidor ou repassivante ou barreira), mas de fabricantes diferentes ou de qualidades diferentes do mesmo fabricante. Essas diferenças, no entanto, não foram refletidas nas correntes galvânicas registradas entre zonas reparadas e não reparadas que eram muito semelhantes em todos os casos e independentemente do tamanho do reparado (catódico) para zonas não reparadas (anódicas).

Os primers do mesmo tipo (inibitórios, repassivadores ou barreira), mas de qualidade variável ou proveniente de fornecedores diferentes usados no exemplo da figura 4, uma coluna em um prédio do governo no México, exibiu diferenças eletroquímicas significativas, conforme a tabela 2 na referência [15] . Esta circunstância pode levar a uma interpretação errônea do efeito de os respectivos primers no comportamento galvânico, presumivelmente induzido por reparo.

#### 4.4. Detecção de áreas contaminadas

Conforme observado na introdução, quando o dano (rachaduras e ferrugem manchas) é inicialmente detectado, com vista tanto a considerações de custos como a garantir o mínimo de alteração da integridade do o concreto original, a tendência geral é reparar apenas áreas com danos visíveis. **Um equilíbrio deve ser alcançado, então, entre evitar a necessidade de remendar novamente de vez em quando em áreas recém-despassivadas quando a passividade é restaurada visivelmente zonas danificadas, mas posteriormente reparadas, e alterações estruturais devido à remoção de concreto. Esse problema é particularmente problemático onde o concreto não está obviamente rachado nem enfraquecido. Mais do que isso, o comportamento estrutural da estrutura reparada, uma questão não tratada aqui, pode ser significativamente impactada pelas propriedades do existente e do novo material. Daí a importância de delimitar claramente as zonas precisam de remoção de ferrugem e restauração, mesmo onde exibem nenhum dano externo.**

Esse propósito básico de inspeção pode ser abordado em dois caminhos:

- a) analisando o teor de cloreto ou carbonatação nas áreas adjacentes ao a ser reparado e remoção de concreto até que o material não contaminado seja encontrado,
- b) medindo a taxa de corrosão eletroquimicamente antes e depois do reparo.

Dada a relação direta entre o custo e a extensão do reparo, o proprietário e o empreiteiro contratado tendem a ter opiniões diferentes sobre a dimensão econômica do patching (remendo-reparo). Como em qualquer outro campo onde a virtude está no meio termo, definindo regra geral ou quantificação sem dar atenção ao caso específico em questão, não é uma tarefa fácil, pois o custo social e o valor do patrimônio podem inclinar a escala em direção a um reparo mais ou menos extenso. Em um visivelmente danificado concreto com valor patrimonial, por exemplo, a abordagem ideal seria remover o mínimo de concreto possível, mesmo com o risco de subsequente despassivação em outras áreas. Em concretos não considerados bens culturais, em contrapartida, todo o material onde se suspeita de contaminação deve ser removida, para prevenir o reforço de se deteriorar ainda mais, proporcionando o comportamento não comprometido esperado. Isso exige uma inspeção detalhada baseado em mais do que mera observação visual.

#### 4.5. Análise no local de carbonatação e teor de cloreto

O interesse em saber quanto concreto é necessário remover levou ao estudo de diferentes métodos de análise de cloretos. Os estudados estão resumidos na tabela 2 abaixo.

**TABLE 2.**  
Types of on-site chloride analysis tested.

METHODS FOR IN SITU CHLORIDE ANALYSIS METHODS		
	ADVANTAGES	DRAWBACKS
- Quick chloride analysis kits used to analyse water quality	Accurate if the right range is found	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A powder sample is required.</li> <li>- The powder must be dissolved in acid or water.</li> <li>- It calls for laboratory procedures (Mohr or diphenylcarbazone method).</li> <li>- The kits are for pre-defined chloride ranges.</li> </ul>
- Chloride ion selective electrode method	Accurate if electrode pre-calibrated	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A powder sample is required.</li> <li>- The powder must be dissolved in acid or water.</li> <li>- The electrode is expensive.</li> </ul>
- Swimming pool salinity measurement method	Less expensive than the selective electrode method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The sample must be prepared in the same manner.</li> <li>- It measures not chloride but sodium.</li> </ul>
- Turbidity method	The simplest of the chemical procedures	<ul style="list-style-type: none"> <li>- It is qualitative only.</li> <li>- The sample must be prepared in the same manner.</li> </ul>
- Silver nitrate colorimetric method directly on concrete	Colour-based and therefore very simple	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The colours are not clearly distinguishable in on-site scenarios.</li> </ul>
- On-site FRX	Immediate, on-site results The operator needs no knowledge of chemical analysis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The instrument is expensive.</li> <li>- The instrument must be calibrated.</li> </ul>

**As conclusões tiradas de um estudo das várias técnicas para a detecção de contaminação por cloreto no concreto remanescente incluíram o seguinte:**

1. Uma questão básica é trabalhar diretamente no concreto tal como está ou pegar uma amostra que precisa ser posteriormente triturada e dissolvida:

a. em ácido para determinar o total de cloretos.

b. na água para determinar os cloretos não ligados. A maioria procedimento adequado para tais análises é estabelecido em Recomendação da RILEM 'Análise de solúvel em água teor de cloreto no concreto '[30], que envolve dissolver a amostra em 50 mL de água destilada e filtrando imediatamente após apenas 3 min. Em tempos mais longos parte do total de cloretos pode se dissolver.

2. Os kits projetados para medições de campo exigem know-how geralmente ausente entre o pessoal de reparo estrutural, ou seja, uma certa compreensão mínima de

química e manuseio de substâncias tóxicas. O método de Mohr ou uso de difenilcarbazona envolvida em suas chamadas de implantação para pessoal especializado. E como esses kits se destinam para faixas de detecção específicas para qualquer nitrato de prata concentração, múltiplas análises podem ser necessárias para encontrar o intervalo certo.

3. O método de turbidez (meio ácido adicionado com nitrato de sil ver) é um pouco mais simples do que os kits, pois é tubos de ensaio qualitativos apenas podem ser preparados com antecedência e o cimento moído simplesmente adicionado in situ. O pessoal envolvido deve, no entanto, ser qualificados para interpretar a turbidez observada ou ser fornecida com amostras padrão (figura 19) pois, como inferido pela figura, traçar distinções nem sempre é simples.

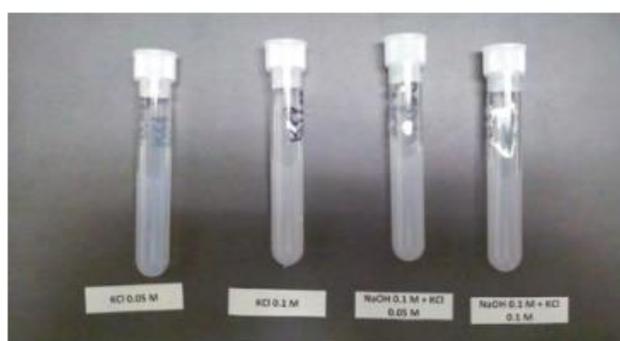


Figure 19. Turbidity test based on nitric acid and silver nitrate.

4. O método de eletrodo de íon de cloreto seletivo é certamente promissor, pois não requer produtos químicos, exceto ácido se o objetivo é determinar o total de cloretos. As amostras podem ser colocadas em tubos de ensaio pré-preparados, embora devam ser pesados, pois como o ensaio é quantitativo, os resultados são referidos ao peso da amostra. Isso, por sua vez, envolve trazer um pequeno saldo para o local de trabalho.



Figure 20. Selective chloride electrode test.



Figure 21. Colour-based silver nitrate indicator chloride test on concrete.

5. O sistema de medição de salinidade baseado em eletrodo usado monitorar piscinas (figura 20) não mede cloretos per si, mas sódio ou condutividade. Enquanto é muito mais barato, então, o aparelho não é recomendado, pois só mede cloreto diretamente se ele fizer parte de cloreto de sódio. Também exige pesagem prévia da amostra e dissolução em ácido ou água.

6. **O método que envolve a pulverização de nitrato de prata diretamente sobre o concreto também não é recomendado, devido à sua escassa sensibilidade em concreto no local.** A Figura 21 mostra no deixo o caso de espécimes submetidos à difusão de cloreto no laboratório (as zonas brancas são aquelas onde os cloretos chegam durante o tempo de teste) e à direita é mostrada uma área da tampa do píer no viaduto descrito anteriormente, onde o nitrato de prata falhou completamente em distinguir entre as áreas contaminadas com cloreto e as não contaminadas. A frente é normalmente difícil de distinguir no local, onde a contaminação é irregular.

Todas essas limitações informaram uma busca por métodos alternativos. Tendo em vista o desenvolvimento incipiente na época do dispositivo portátil Instrumentos de fluorescência de raios-X (XRF), um segundo projeto CDTI foi aplicado para (XRF-CODE) [26] para estudar a viabilidade de seu uso para este propósito. O instrumento inicialmente utilizado está descrito na figura 6. O uso generalizado de XRF para análise elementar teve foi estendido pela equipe dos autores para analisar arquivos profissionais de cloreto em concretos. Até 20 amostras moídas mm a mm em profundidade, o desenho de tais perfis envolve vários testes. A aquisição de um difrator de raios-X e fluorescência facilidade 76 tornou possível analisar 48 amostras simultaneamente [31], aumentando significativamente a eficácia do teste. A desvantagem do procedimento é que como a composição medida é uma porcentagem de todos os compostos na amostra, ela exige pré-calibração contra amostras padrão com teor de cloreto conhecido. Figura 22 calibra a concentração de cloreto detectado por XRF portátil (em ppm) contra os resultados potencio métricos para três amostras padrão com valores amplamente diferentes e para os dois perfis de clo ride plotados na figura 23. De acordo com o último, o XRF portátil entregou leituras um pouco mais baixas do que o método potenciométrico. Após a otimização durante o projeto, o

procedimento de medição rendeu uma correlação muito aceitável. Dispositivos XRF portáteis facilitam o reparo no local, para o as leituras podem ser interpretadas por pessoal sem especialistas treinamento em análise química.

#### 4,6. Medição da taxa de corrosão

Tanto como um suplemento para análises de carbonatação e cloreto e por si só, a medição da taxa de corrosão fornece informações indispensáveis durante a inspeção, bem como durante e após o reparo para confirmar a eficácia, definida em termos de  $0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  limite máximo estabelecido na respectiva recomendação RILEM [29]. Esta técnica pode ser usada para aplicações contínuas e monitoramento abrangente durante todo, ou seja, durante e após reparar. Isso se aplica mesmo se o material de reparo ou o revestimento é à base de polímeros, pois se esses materiais são isolantes para a corrente elétrica, isso é detectado pela impossibilidade de medir a taxa de corrosão, mas precisamente se a taxa de corrosão pode ser medida é um sinal de deterioração desses materiais. , ou seja, a medição da taxa de corrosão é uma maneira de detectar integridade de materiais de reparo à base de epóxi / polímero: assim que sua resistividade diminui e as medidas são viáveis, é uma indicação de sua deterioração.

Teste de taxa de corrosão para comparação das descobertas com o referido limite deve ser realizado em concreto úmido, visto que os valores podem cair abaixo de  $0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  em material seco, pois a corrosão requer umidade. O concreto é suficientemente úmido se exposto à chuva ou spray de água do mar. Se o concreto não entra em contato direto com a água ou está exposto a altas temperaturas possivelmente favorecendo a evaporação de seu teor de água, pode não reter umidade suficiente para suportar corrosão. Consequentemente, o teste deve ser realizado no inverno ou após chuvas abundantes.

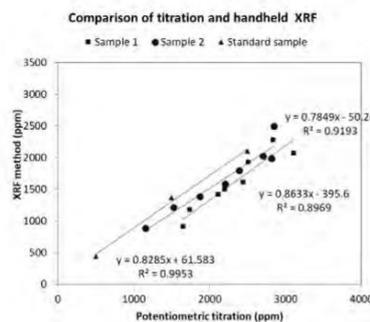


Figure 22. X-ray fluorescence/ traditional potentiometric titration procedure calibration in standard samples bearing known chloride concentrations and for two chloride profiles.

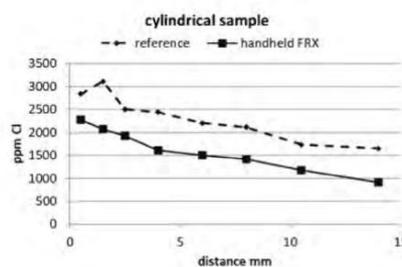


Figure 23. One of the chloride profiles used in the preceding figure, showing the difference between XRF and potentiometric values.

Além do impacto do clima na umidade do concreto [32], os resultados do projeto revelaram que certos materiais de reparo exibiram valores de taxa de corrosão  $> 0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ . Embora os possíveis motivos não foram explorados, eles devem ter tido a ver com os inibidores adicionados ou diferenças no pH relativo para OPC. Nesses casos, o teste deve ser repetido algumas semanas mais tarde para verificar se os valores caem abaixo do  $I_{\text{corr}}$  superior limite definido.

O procedimento de medição é resumido brevemente abaixo.

**Pré-preparo** - medições de taxa de corrosão detectam as áreas mais severamente corroídas, ou seja, a localização de ânodos (onde a taxa de corrosão é mais alta) e cátodos (taxas mais baixas), conforme representado na figura 16, e verificar se as áreas catódicas são passivas ( $I_{\text{corr}} < 0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ ) ou tem um  $I_{\text{corr}}$  menor, mas está corroído. A mera comparação dos valores observados é suficiente para identificar o as áreas mais gravemente afetadas, independentemente de sua aparência e, com base nisso, estabeleça a ordem de reparo mais adequada.

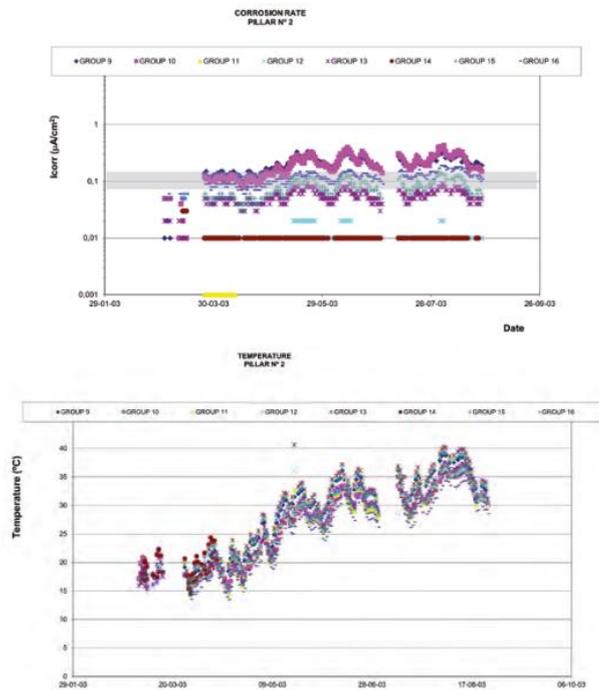


Figure 24. Up: corrosion rate values for a viaduct; and down: temperature values for the same timeframe (note the increase in  $I_{\text{corr}}$  with temperature and the similar pattern of variation of the two parameters).

**Durante o reparo** - uma vez que as áreas onde o concreto deve estar removido são definidos, as medições podem ser feitas nas regiões adjacentes (figura 16) para verificar possíveis mudanças no comportamento após a remoção do concreto contaminado e a limpeza da armadura. Um aumento na taxa de corrosão na área adjacente áreas seriam indicativas de despassivação incipiente e ajuda determinar a conveniência ou não de usar um primer ou agente de ligação para eliminar ou mitigar o efeito galvânico de o reparo.

**Pós-reparo** - o teste deve ser executado para verificar se nenhum das áreas envolvidas tem um valor  $I_{corr}$  que denotaria mais ou deterioração futura menos imediata. No viaduto usado como um exemplo aqui, tal teste de verificação revelou que a taxa de corrosão não excedeu  $0,1 \mu A / cm$  em qualquer lugar da estrutura, permitindo que os proprietários comprovem a eficácia do reparo.

Sensores de taxa de corrosão indiscutivelmente constituem a maneira mais eficaz de monitorar estruturas a longo prazo, um assunto explorado no capítulo de filosofia estratégica dos projetos mencionados [25,26]. As vantagens / desvantagens dos sensores foram analisadas em resposta às dificuldades que eles colocaram aos proprietários para interpretar as leituras e lidar com os dados, para a taxa de corrosão que muda com o clima e interpretação requer um certo grau de especialização. Os dados de um viaduto plotados na figura 24 mostram que a taxa de corrosão é impactada por (isto é, aumenta com) a temperatura. Eventos como tempestades elétricas, por sua vez, pode induzir variações nas condições magnéticas, favorecendo o aparecimento de valores outlier que devem ser descartados ou até mesmo causando medição de dados ou instalação de transmissão fora das idades. **Onde os sensores são usados, sua interpretação deve ser garantida pelo fornecedor como um serviço, ou os proprietários devem ser garantido o acesso aos respectivos algoritmos de inteligência artificial.**

+

## **5 CONCLUSÕES**

As conclusões mais importantes a serem tiradas do anterior são apresentadas brevemente a seguir.

1. Os reparos de remendo podem falhar em remover todo o concreto contaminado, arriscando ainda mais corrosão do reforço que poderia requerem intervenções sucessivas. Essa circunstância reside na raiz do dilema de quanto reparar. Na ausência de implicações estruturais graves, a decisão do proprietário deve ser informada por opinião de especialista e assunto para monitorar a estrutura reparada.
2. Nenhum dos testes realizados pelos autores para estudar o comportamento de pares galvânicos, especificamente aqueles gerados por reparo de remendo, produziu evidências de que tal ação intensifica a corrosão nas áreas adjacentes. O que não foi notado é que as zonas adjacentes começam a corroer porque estão contaminados com cloretos e que a repassivação da zona reparada não potencializa a corrosão das zonas adjacentes, exceto nos primeiros dias após o reparo. Simplesmente o reparo para de atuar como ânodo de sacrifício.
3. Após a repassivação, no entanto, as regiões danificadas são observadas para não atuar mais como ânodos de sacrifício para aqueles em nas imediações. A presença de contaminação em as zonas adjacentes induziria conseqüentemente a corrosão do reforço.

4. Primers de reforço e agentes de ligação dos tipos descrito aqui atenua a corrosão nas áreas adjacentes em a curto prazo, embora em tempos mais longos seu efeito seja insignificante.

5. Bom diagnóstico de pré-reparo para detectar áreas contaminadas foi considerada a chave para avaliar o escopo do reparo, um problema com implicações financeiras e de segurança substanciais. As técnicas para identificar qualquer contaminação residual incluem:

a. teste de carbonatação, que é facilmente acessível, dado a disponibilidade de indicadores de pH eficazes com base em cores.

b. teste de cloreto, que em contraste exige análise laboratorial, embora a fluorescência de raio-X portátil instrumentos altamente compatíveis com trabalho de campo promessa particular a este respeito, apesar da necessidade de pré-calibração.

c. medição da taxa de corrosão in-situ, que é uma técnica essencial que complementa as outras duas, pois determina se o reparo foi eficaz por mostrando, imediatamente ou várias semanas após o reparo, se as taxas de corrosão estão abaixo de  $0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  teto recomendado quando medido em concreto úmido.