

## **Ensaio de caracterização do risco de corrosão em elementos de betão armado da Ponte Edgar Cardoso**

**N. Müller<sup>1</sup>**

**C. Sousa<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

A Ponte Edgar Cardoso, situada na Figueira da Foz, está em processo de reabilitação, pela empresa Mota-Engil. A reabilitação envolve, entre outros trabalhos, a reparação localizada dos elementos de betão armado afetados pela corrosão das armaduras de aço. Este artigo visa sintetizar o trabalho desenvolvido no âmbito de uma dissertação de mestrado, que investigou como os ensaios de caracterização podem ajudar a compreender o estado atual da estrutura, especialmente no que diz respeito à corrosão das armaduras embebidas no betão. Foram realizados ensaios para mapeamento, in-situ, na superfície de elementos de betão selecionados, dos seguintes parâmetros: potencial de corrosão, medido através do método da meia célula; resistividade do betão, medida através do método da sonda de Wenner; e espessura de recobrimento das armaduras, medida através de detetor eletromagnético. Além disso, foram recolhidas amostras de betão para avaliação experimental, em laboratório, dos seguintes parâmetros: profundidade de carbonatação; teor de cloretos; resistência à compressão; e absorção de água. Os resultados obtidos foram interpretados com base no conhecimento atual, visando estudar: (i) a forma como os resultados dos ensaios refletem as diferenças no estado da estrutura em diferentes posições, ou seja, em posições com diferentes graus de propagação das reações de corrosão das armaduras; (ii) como os resultados dos ensaios, em conjunto com os resultados da inspeção do estado da estrutura, podem contribuir para o prognóstico da evolução futura dos danos por corrosão nesta estrutura.

**Palavras-chave:** Corrosão; Betão armado; Reabilitação; Ensaio; Métodos eletroquímicos.

### **1. INTRODUÇÃO**

A técnica do betão armado, desenvolvida originalmente no século XIX e amplamente aplicada em edifícios e infraestruturas devido à sua resistência, disponibilidade de matéria-prima, adaptabilidade e baixo custo [1], era inicialmente vista como duradoura. Contudo, a falta de atenção à durabilidade resultou em deteriorações precoces e patologias, afetando a segurança e funcionalidade das construções e gerando elevados custos de reparação. Um estudo comparativo, apresentado no Quadro 1, revela que os gastos com construção e manutenção variam por país: na Alemanha são semelhantes, na Itália a manutenção predomina, e em França os novos projetos têm mais gastos [2]. Nos Estados Unidos, até 1996, 20 bilhões de dólares foram usados na recuperação de pontes devido à corrosão, com 500 milhões adicionais por ano [3]. No Reino Unido, 4% do PNB é destinado a manutenções e reparações [4], e a corrosão causa perdas de 1,25% a 3,5% do PNB em países desenvolvidos e em desenvolvimento [5].

Uma das principais causas de deterioração é a corrosão das armaduras, resultante principalmente da carbonatação e da penetração de cloretos. Este fenómeno é definido como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos [6].

---

<sup>1</sup> Mota-Engil (Mota-Engil, Porto, Portugal. [nathanymuller@gmail.com](mailto:nathanymuller@gmail.com))

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade Porto, Porto, Portugal. [cfsousa@fe.up.pt](mailto:cfsousa@fe.up.pt)

Quadro 1. Gastos com novas construções e manutenção de estruturas [2].

<i>País</i>	<i>Construções novas (bilhões de Euros)</i>	<i>Manutenções e reparos (bilhões de Euros)</i>	<i>Gastos totais com construção (bilhões de Euros)</i>
França	85,6	79,6	165,2
Alemanha	99,7	99,0	198,7
Itália	99,7	76,8	135,4

Nota: Todos os dados referem-se ao ano de 2004, exceto o caso da Itália que se refere ao ano de 2002.

## 2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA OBRA DE ARTE E DOS TRABALHOS DE REABILITAÇÃO

### 2.1. Obra de Arte

A Ponte Edgar Cardoso, Figura 1, projetada pelo Engenheiro Edgar Cardoso e inaugurada em 1982, foi a primeira ponte atirantada de Portugal. Com 1421 metros de extensão, atravessa o rio Mondego na Estrada Nacional 109, possuindo um eixo Norte-Sul, e sendo composta pela ponte de tirantes, viadutos de acesso nas margens, e encontros.

Atualmente, a Infraestruturas de Portugal (IP) está a reabilitar a ponte para substituir o sistema de tirantes devido à sua degradação e corrosão, especialmente nas ancoragens. A ponte utiliza aço e betão no seu tabuleiro, suportado por duas torres de betão armado de 80 m de altura, e seis pares de tirantes por torre. As torres são compostas por elementos retangulares ocos e travessas pré-esforçadas. Os viadutos têm tabuleiros em laje vigada e pilares ocos, conectados por travessas, sendo a ligação do tabuleiro aos encontros realizada por intermédio de aparelhos de apoio e dissipadores sísmicos instalados durante uma das intervenções de reabilitação da ponte.



Figura 1. Vista geral da ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz.

### 2.2. Trabalhos de reabilitação

Desde a sua inauguração, a Ponte Edgar Cardoso tem sido alvo de várias intervenções de reabilitação para garantir a sua segurança e durabilidade. Entre 1997 e 2006, foram realizadas importantes obras, incluindo o reforço das torres para resistir a ações sísmicas. Além disso, foram feitas reparações gerais no betão e a proteção das superfícies externas das torres com tinta acrílica, com o objetivo de estabilizar e prolongar a vida útil da estrutura.

Entre 2010 e 2013, a atenção foi direcionada à base das torres, onde se procederam a limpezas, selagens e injeções de fissuras. A aplicação de um barramento impermeabilizante e pintura acrílica visaram mitigar a corrosão e fissuração causada por reações expansivas do tipo alcalis-sílica, identificadas nas inspeções. Este trabalho teve como objetivo melhorar a durabilidade das torres e assegurar a sua integridade estrutural.

Desde 2013, as intervenções na ponte têm continuado com foco na monitorização e manutenção contínua. Entre 2016 e 2017, a reabilitação da base das torres foi concluída, mas as inspeções de 2017 revelaram infiltrações e corrosão em elementos metálicos, além de fissuras e fios partidos. Foi realizada uma nova inspeção que confirmou a presença de corrosão e fissuras, recomendando a aplicação de um sistema de proteção ao betão que minimize o ingresso de água e permita a secagem do betão, pelo que se faz necessária a monitorização da variação do teor de humidade através de sensores de resistividade e temperatura no interior do betão. A Mota-Engil está atualmente a executar um extenso programa de reabilitação, que inclui a substituição do sistema de atirantamento, pintura do tabuleiro metálico, reparação de betão e outras melhorias essenciais para garantir a integridade da ponte.

### 3. PLANO DE ENSAIOS NO ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Os ensaios apresentados neste artigo não fazem parte dos trabalhos contratualizados no âmbito do projeto ou da empreitada de reabilitação. São ensaios exploratórios, realizados exclusivamente no âmbito da dissertação de mestrado. Assim, os ensaios incidiram apenas sobre áreas muito limitadas da estrutura. Caso se pretendesse uma caracterização global do estado da estrutura, então seria necessária uma campanha de ensaios mais abrangente, abarcando mais localizações.

A seleção dos locais de realização das medições teve em consideração: a facilidade de acesso, atendendo ao andamento dos trabalhos a decorrer e aos previstos; as condições de exposição ambiental dos locais escolhidos; o interesse em estudar elementos estruturais de diferentes tipos.

Assim, os ensaios *in-situ* (mapeamento do potencial de corrosão, resistividade e espessura de recobrimento das armaduras) foram realizados na Torre Norte (TN), nas faces voltadas a Sul (TN/S) e a Montante (TN/M). E, para incluir um betão de diferentes características e um elemento estrutural diferente, foram realizadas também medições na superfície de um separador tipo New Jersey localizado junto à Torre Norte (NJ/N), numa face voltada a jusante. Nessas posições foram também recolhidas amostras para determinação em laboratório do teor de cloretos e da profundidade de carbonatação do betão. O separador NJ não possui qualquer revestimento, isto é, o betão encontra-se exposto ao ambiente neste elemento estrutural. Pelo contrário, o betão das torres encontra-se revestido por tinta. As medições cujos resultados se apresentam neste artigo foram realizadas após decapagem, isto é, com os sensores diretamente em contacto com o betão. No âmbito da dissertação, foram ainda realizadas medições em superfícies não decapadas, mas, por limitação de espaço e para manter o foco nos aspetos essenciais, os resultados em superfícies não decapadas não são mostrados neste artigo.

O conjunto completo de ensaios realizados em laboratório envolve a determinação experimental dos seguintes parâmetros: resistência à compressão, absorção de água, teor de cloretos e profundidade de carbonatação. Para esse efeito, foram utilizados provetes extraídos por caroteamento, tendo os carotes sido extraídos previamente, durante as furações necessárias à instalação de barras de aço, de reforço, no topo das torres. A nomenclatura usada para identificar a posição de cada amostra foi: TN/J – Torre Norte/superfície volta a Jusante; TN – Torre Norte, sendo desconhecida a orientação da superfície onde foi extraído o carote; TS/M – Torre Sul/ superfície volta a Montante; TS/J – Torre Sul/ superfície voltada a Jusante; TS – Torre Sul, sendo desconhecida a orientação da superfície onde foi extraído o carote.

#### 3.1. Plano de ensaios *in-situ*

Os primeiros trabalhos em obra incluíram a seleção dos locais de medição e a identificação das armaduras utilizando um detetor eletromagnético (modelo PS 200 da Hilti). Este processo envolveu a

varredura das áreas selecionadas para localizar a malha de armaduras nas direções vertical e horizontal, bem como a medição da espessura do recobrimento das armaduras.

Em seguida, foi realizada a medição da resistividade do betão, com o método dos quatro elétrodos (sonda de Wenner). Houve o cuidado de realizar estas medições de tal forma que, entre os 4 elétrodos, não existissem armaduras que pudessem transportar cargas elétricas e interferir nas medições.

Finalmente, a medição do potencial de corrosão foi realizada através do método da meia célula, com um eletrodo de referência, do tipo cobre-sulfato de cobre. Para realizar o mapeamento desta variável, o eletrodo de referência foi sempre posto em contacto com a superfície de betão numa posição sempre equidistante entre as armaduras previamente detetadas. Ao todo, o plano de ensaios abrangeu uma área de aproximadamente 12 m<sup>2</sup>, onde foi realizado o mapeamento na Torre Norte, e 1,4 m<sup>2</sup>, no New Jersey.

### **3.2. Plano de ensaios no laboratório**

Os ensaios laboratoriais foram realizados em amostras de betão, obtidas a partir dos carotes extraídos, que apresentavam diâmetros a variar entre 45 e 49 mm.

Para determinar o teor de cloretos no betão, recorreu-se ao método Rapid Chloride Test (RCT) da German Instruments, com o kit RTC-500. O método envolve a análise de amostras constituídas por pó do material a analisar. Recolheu-se pó num total de 6 posições. E, em cada uma dessas posições, recolheu-se pó a 5 profundidades: 0-1 cm, 1-2 cm, 2-3 cm, 3-4 cm e 4-5 cm. Para esse efeito, foram serrados discos de 1 em 1 cm. E, em cada um dos discos, a recolha do pó foi feita por furação, evitando os agregados grossos aparentes. Assim, pode considerar-se que o pó recolhido é essencialmente de argamassa endurecida (sem agregados grossos).

A determinação da profundidade de carbonatação foi feita através do método da aspersão com solução alcoólica de fenolftaleína, em superfície recente de fratura, e posterior medição com régua graduada. Foi feita em 6 posições.

Para os ensaios de resistência à compressão, os carotes foram cortados e retificados, adotando provetes com altura igual ao diâmetro e seguindo a norma NP EN 12390-1, verificando a sua planeza e perpendicularidade, e submetendo-os posteriormente a força monotonamente crescente com velocidade constante. Foram ensaiados 8 provetes, sendo 4 as posições analisadas (2 provetes por posição).

Por fim, o ensaio de absorção de água foi conduzido de acordo com a especificação E394-1993 do LNEC, mas com uma limitação: os provetes que foi possível obter apresentam um volume de cerca de 0,18 dm<sup>3</sup>, enquanto a especificação indica que o volume mínimo de cada provete a ensaiar deverá ser 1 dm<sup>3</sup>. Os provetes (segmentos de carote) foram submersos em intervalos de 45 minutos, preenchendo 1/3 da altura do provete, até à submersão total do carote em água. Permaneceram submersos durante 7 dias até estabilização da massa saturada. Após a secagem em estufa, calculou-se o teor de absorção de água, em percentagem do volume da amostra, conforme indica a especificação. As medições foram realizadas em 4 provetes de 4 posições diferentes.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Ensaio em obra

A medição da espessura de recobrimento foi feita não apenas como pré-requisito dos outros ensaios, mas também para avaliar a proteção que está a ser conferida às armaduras. Foi registada nos elementos estruturais observados (Figura 2). Existindo duas camadas de armadura junto a cada face de betão (armaduras em direções perpendiculares), interessa avaliar a espessura de recobrimento da camada de armadura mais superficial. Os resultados da medição desse parâmetro são sintetizados no histograma apresentado na Figura 3, utilizando classes com uma amplitude de 5 mm. O gráfico indica a frequência dos resultados para cada classe e apresenta a frequência relativa, que é o número de medições numa classe dividido pelo total de medições, sendo 63 para as zonas TN/S e TN/M, e 24 para a posição NJ/N Jusante. A apresentação da frequência relativa facilita a comparação das distribuições estatísticas dos resultados em diferentes zonas com diferentes números totais de medições.

Numa perspetiva atual da ponte, os resultados obtidos podem ser discutidos com base no Eurocódigo 2, que define a classe de exposição dos elementos ensaiados como XS1. Para um tempo de vida útil de projeto de 50 anos, o recobrimento mínimo exigido é de 35 mm e o nominal é de 45 mm (valor a especificar nos desenhos e dimensão dos espaçadores a colocar em obra). Sendo assim, verifica-se que, para este ambiente agressivo, há locais onde o recobrimento medido é inferior ao exigido.



Figura 2. Fotografia representativa do ensaio realizado na posição TN/M.

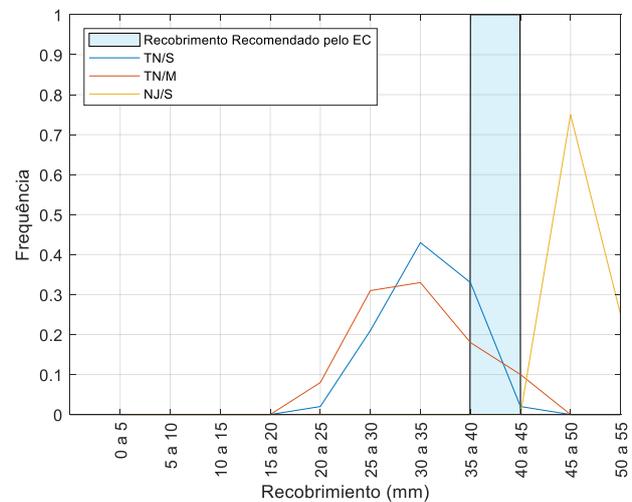


Figura 3. Histograma da espessura de recobrimento medida nas zonas analisadas com betão decapado.

Quadro 2. Critérios de avaliação do risco de corrosão de acordo com a recomendação TC 154 do RILEM.

Resistividade ( $\Omega.m$ )	Risco de corrosão
<100	Alto
100-500	Moderado
500-1000	Baixo
>1000	Insignificante

A discussão dos resultados relativos às medições da resistividade do betão pode ser feitas com base nas indicações da recomendação TC 154 do RILEM, sintetizadas no Quadro 2. Sabe-se que as resistividades mais elevadas são encontradas em betão pouco poroso e, principalmente, em betão seco. Por outro lado,

os betões com teores de humidade mais elevados apresentam valores mais baixos da resistividade, por ser maior a facilidade com que são conduzidas as cargas elétricas e, conseqüentemente, será maior aí a velocidade de corrosão, se encontrarem reunidas as restantes condições para ocorrerem as reações de corrosão. Em cada uma das zonas onde foram realizadas medições, os resultados foram compilados num mapa conforme se exemplifica na Figura 4.

Além disso, os resultados foram compilados num histograma (Figura 5). Observam-se resultados no betão da torre bastante diferentes dos obtidos no New Jersey. Estas diferenças são uma consequência das diferenças nos betões existentes em cada elemento estrutural, e do respetivo teor de humidade. Os valores obtidos no NJ indicam que o risco de corrosão é nesse elemento baixo ou insignificante, de acordo com a recomendação RILEM. Na torre, os valores obtidos, apesar de menores, encontram-se entre 200 e 300  $\Omega.m$ , correspondendo a um risco de corrosão moderado.

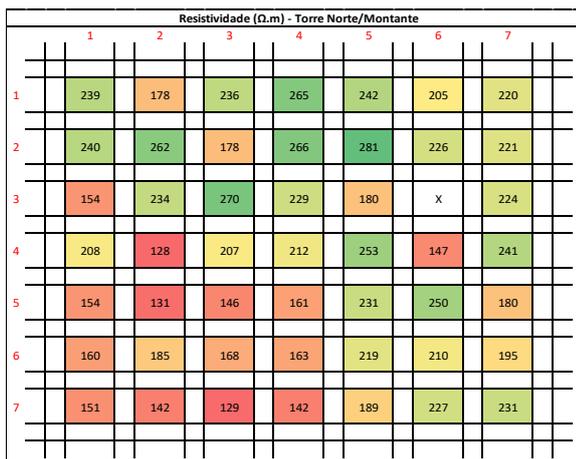


Figura 4. Valores de resistividade do betão referentes à zona TN/M.

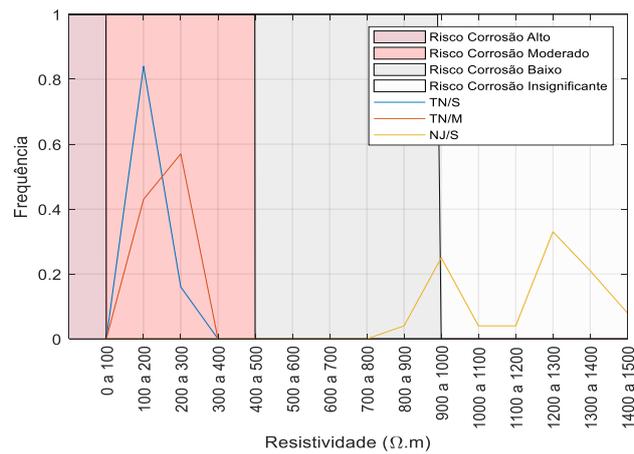


Figura 5. Histograma dos valores de resistividade medidos nas três zonas analisadas onde o betão não está recoberto por tinta.

O ensaio de medição do potencial de corrosão procura avaliar a probabilidade de estarem a ocorrer reações de corrosão das armaduras, em cada ponto de medição. Os resultados obtidos em cada posição foram resumidos num mapa (exemplo na Figura 6), onde os potenciais mais negativos são apresentados com cor vermelha, por corresponderem a uma maior probabilidade de ocorrência de corrosão.

O documento C876-15 da ASTM apresenta uma indicação para a probabilidade de existir corrosão, em função do potencial medido (Quadro 3), para elementos estruturais expostos à atmosfera (conforme acontece no presente caso de estudo). Sabe-se que esta é uma indicação simplificada, uma vez que o potencial medido é influenciado por diversos fatores, mas os potenciais mais negativos identificam em geral as posições onde é de facto mais provável estar a ocorrer corrosão.

Quadro 3. Probabilidade de existência de corrosão da armadura, de acordo com o documento C876-15 da ASTM.

Potencial (mV)	Probabilidade de corrosão
> -200	Inferior a 10%
-200 a -350	Incerta
< -350	Superior a 90%

No histograma que resume todos os resultados obtidos (Figura 7), observa-se uma variação significativa de ponto para ponto. A TN apresenta alguns valores classificados com uma probabilidade de corrosão superior a 90%, mas a maior parte dos resultados está no intervalo de -200 a -350mV, correspondendo a uma probabilidade de corrosão incerta. No caso do NJ há uma probabilidade de corrosão <10%, o que é consistente com os resultados previamente apresentados para a resistividade e espessura de recobrimento.



Figura 6. Valores do potencial de corrosão do betão referentes à zona TN/M.

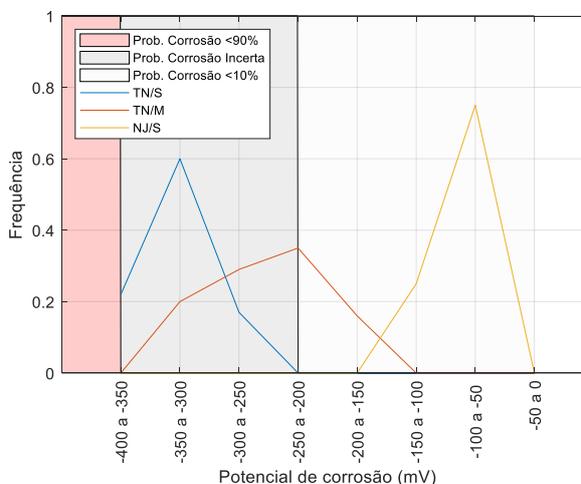


Figura 7. Histograma dos valores do potencial de corrosão medidos nas zonas com betão decapado.

Analisando a correlação entre o potencial de corrosão e a resistividade (Figura 8), observa-se que os valores mais elevados da resistividade ocorrem em pontos com valores menos negativos do potencial, ambos os resultados indicando um menor risco de corrosão (o que acontece no caso do New Jersey).

Estudando a correlação entre o potencial de corrosão e a espessura de recobrimento (Figura 9), observa-se que quanto maior é essa espessura, menor é a probabilidade de existirem reações de corrosão, à luz da interpretação dos resultados da medição do potencial de corrosão, sendo essa a situação em que se encontra o New Jersey.

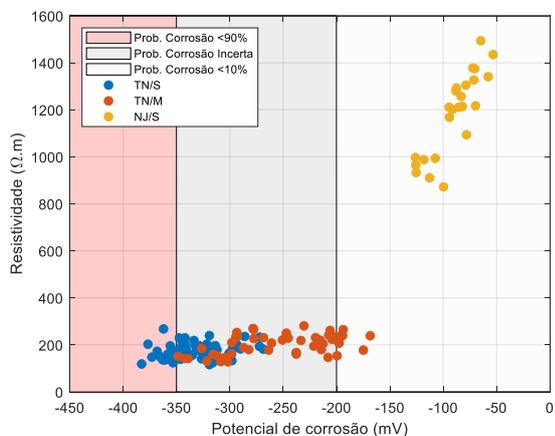


Figura 8. Relação entre os valores medidos do potencial de corrosão e da resistividade.

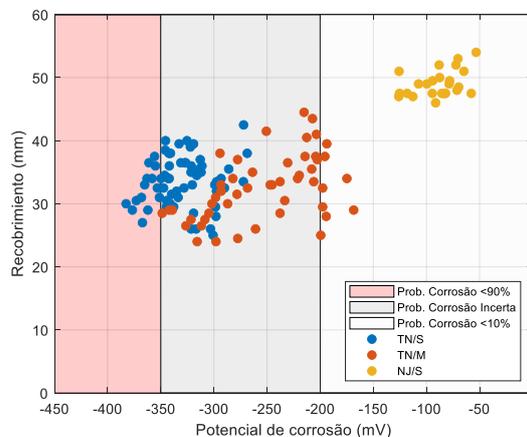


Figura 9. Relação entre os valores medidos do potencial de corrosão e da espessura de recobrimento.

## 4.2. Ensaio em laboratório

A medição do teor de cloretos, a diferentes profundidades, conduziu aos resultados apresentados na Figura 10. De um modo geral, na camada mais superficial, são obtidos menores teores do que na camada seguinte, sendo este um resultado comum. Nas camadas que se seguem, a maior profundidade, a tendência esperada é a de diminuição do teor de cloretos à medida que a profundidade aumenta, uma vez que a penetração do agente agressivo está a acontecer a partir da superfície exposta à atmosfera. No entanto, há alguma dispersão em torno desta tendência, em resultado da heterogeneidade do betão e da incerteza associada a este processo de medição. Obtiveram-se resultados semelhantes nas posições TN/M, TS/J e TS/M, com baixos valores na profundidade de 0-1 cm, um aumento significativo entre 1-2 cm, uma queda entre 2-3 cm, um ligeiro aumento entre 3-4 cm e uma queda final entre 4-5 cm.

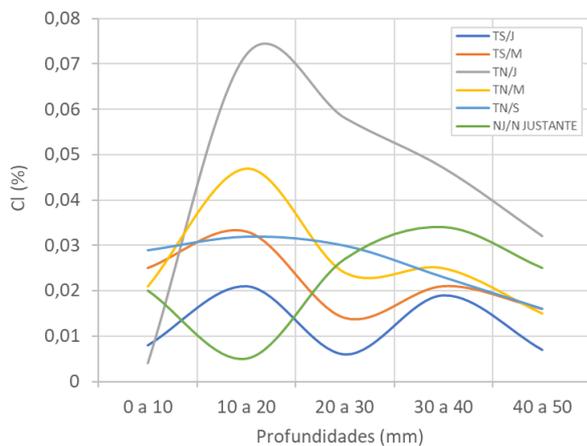


Figura 10. Teor de cloretos medido, em percentagem da massa da amostra ( $t_a$ ).

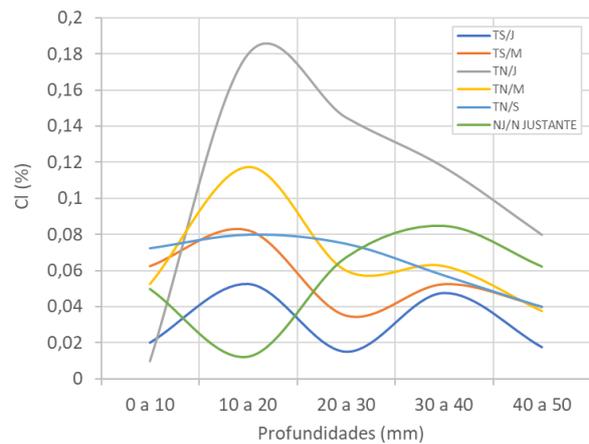


Figura 11. Estimativa para o teor de cloretos em percentagem de massa de cimento ( $t_c$ ).

Quando o teor crítico de cloretos,  $Cl_{crit}^-$ , é atingido, ocorre a despassivação da camada protetora do aço e pode ser iniciado o processo corrosivo. O valor de  $Cl_{crit}^-$  depende de um conjunto de fatores relacionados com o material e o ambiente, não sendo geralmente possível conhecer o seu valor exato. Em geral, é um entre 0,4% e 1% da percentagem da massa de cloretos relativamente à massa do cimento.

Os valores de teor de cloretos determinados em laboratório são expressos em percentagem da massa da amostra. Então, para efeitos de comparação com o valor de  $Cl_{crit}^-$ , é necessário convertê-los num resultado em percentagem da massa de cimento. Essa conversão é feita por estimativa, uma vez que não se conhece o valor exato da percentagem de cimento presente na amostra em estudo. Assim, para realizar essa estimativa, adotou-se um valor plausível para a dosagem de cimento ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) e para a dosagem dos restantes constituintes exceto agregado grosso ( $750 \text{ kg/m}^3$ ), uma vez que na recolha da amostra foram evitados os agregados grossos.

Desta forma, o teor de cloretos em percentagem da massa de cimento ( $t_c$ ) pode ser estimado pela Eq. (1), onde  $t_a$  é o teor de cloretos em percentagem da massa da amostra usada em laboratório:

$$t_c(\%) = t_a(\%) \frac{750}{300} \quad (1)$$

Os resultados são apresentados na Figura 11, onde se vê que o valor mais elevado obtido para  $t_c$  foi 0,18% da massa de cimento. Portanto, todos os teores de cloretos medidos encontram-se abaixo do teor crítico de cloretos,  $Cl_{crit}^-$ , que pode conduzir à destruição da película passiva. Além disso, observa-se

que o valor mais alto foi obtido no separador NJ. Nas torres da ponte o maior valor de  $t_c$  obtido foi 0,12%.

Nos mesmos carotes onde foi medido o teor de cloretos, foi feita a determinação da profundidade de carbonatação do betão, através da aspersão com solução alcoólica de fenolftaleína. Após o ensaio, o betão não carbonatado, com um pH superior a cerca de 9, exibe uma coloração rosa. Os resultados são apresentados no Quadro 4, onde se vê que, em todas as amostras de betão das torres da ponte, a profundidade de carbonatação medida foi, no máximo, de 11mm, na TN/M. Já no NJ, obteve-se um valor superior, de 17 mm.

Correlacionando os resultados de diferentes ensaios, conclui-se que no NJ a frente carbonatada se estende até maior profundidade, bem como o teor de cloretos, em consequência de este betão se encontrar mais seco do que o das torres da ponte, conforme demonstram os resultados da medição da resistividade.

Quadro 4. Resultados dos ensaios de carbonatação, resistência à compressão e absorção de água.

<i>Referência</i>	<i>Profundidade de Carbonatação (mm)</i>	<i>Referência</i>	<i>Tensão de Rotura (MPa)</i>	<i>Referência</i>	<i>Teor de Absorção de Água (%)</i>
TS/J	1	TS/J 3-1	77,8	TS 2	12,5
TS/M	5	TS/J 3-2	76,2	TS 3	12,6
TN/J	6	TS 1-1	69,9	TN 2	13,4
TN/M	11	TS 1-2	60,7	TN 3	15,0
TN/S	3	TN/J -1	54,8		
NJ/N Jusante	17	TN/J -1	62,5		
		TN 2-1	62,2		
		TN 2-2	61,8		

Outro ensaio realizado em laboratório foi o da resistência à compressão, que reflete não apenas a capacidade resistente do betão, mas também fornece informações indiretas sobre a sua permeabilidade e a capacidade de resistir à penetração de agentes corrosivos, uma vez que um betão menos resistente é normalmente mais poroso. Os resultados deste ensaio foram avaliados com base no caderno de encargos do projeto de reabilitação, que previa um betão de classe C40/50 ou superior do betão original. Os resultados apresentados no Quadro 4 mostram valores compatíveis com os esperados para uma classe de resistência C40/50, atingindo em diversas posições resistências bastante superiores à mínima exigida para a classe. Importa notar o facto de estes ensaios de compressão terem sido realizados sobre provetes de reduzido diâmetro (os que estavam disponíveis), o que faz com que a incerteza associada à quantificação experimental deste parâmetro seja superior à que existiria se o diâmetro do provete fosse superior ao triplo da dimensão máxima do agregado.

Complementando a análise, no Quadro 4 observou-se que um betão com alta resistência à compressão, como o da localização TS, tende a ter menor teor de absorção de água, refletindo uma menor porosidade. Em contraste, a amostra TN, com menor resistência à compressão, apresentou maiores percentuais de absorção de água. Além disso, o provete TS/J, que apresentou maior valor de tensão de rotura à compressão, foi onde foi obtida a menor profundidade carbonatada, demonstrando uma correlação adicional entre a resistência à compressão e a porosidade.

## **CONCLUSÕES**

Apesar de os ensaios cujos resultados aqui se apresentam terem incidido sobre um número limitado de localizações, foi possível obter conclusões sobre os efeitos de corrosão na ponte e o prognóstico da sua evolução futura. Nos ensaios realizados sobre o betão das torres da ponte atirantada, concluiu-se que: (i) o betão apresenta uma boa resistência mecânica; (ii) a sua profundidade de carbonatação é bastante reduzida (inferior a cerca de 10mm); (iii) o teor de cloretos medido nas camadas superficiais de betão é inferior ao valor crítico que é geralmente considerando necessário para promover o início da corrosão das armaduras; (iv) o facto de o betão se encontrar com um teor de humidade elevado, conforme demonstram as medições da resistividade, contribui para a reduzida profundidade de carbonatação; (v) as medições da profundidade de carbonatação, do teor de cloretos e da espessura de recobrimento mostram que, nos locais observados, as armaduras se encontram no estado passivo, isto é, sem início das reações de corrosão; (vi) as medições da resistividade apontam para um risco de corrosão moderado, mas esse risco só se efetivará se as armaduras se encontrarem despассивadas, o que não se verificou nas zonas estudadas; (vii) podem existir outros locais na ponte onde o teor de cloretos no betão, ao nível das armaduras, seja superior ao obtido nas medições realizadas, sendo essa a causa da existência de corrosão em diversas posições na estrutura; a realização de medições nessas posições ficaram fora do âmbito do presente trabalho; (viii) para obter conclusões mais gerais sobre o estado da ponte, seria necessário alargar a campanha de ensaios a outras localizações.

Nos ensaios realizados num elemento estrutural diferente, o separador tipo New Jersey, foi possível observar um desempenho muito diferente do observado nas torres, com uma maior penetração de agentes agressivos, mas com um risco de corrosão muito baixo em virtude do menor teor de humidade e maior espessura de recobrimento das armaduras.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020>) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Os autores agradecem à Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A. o apoio que permitiu a realização do trabalho experimental in-situ.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Ravara, P. B. (2008). A consolidação de uma prática: do edifício fabril em betão armado nos EUA aos modelos europeus na modernidade.
- [2] Ueda, T., & Takewaka, K. (2007). Performance-based standard specifications for maintenance and repair of concrete structures in Japan. *Structural Engineering International*, 17(4), 359–366.
- [3] Ping, G., Elliott, S., Beaudoin, J. J., & Arsenault, B. (1996). Corrosion resistance of stainless steel in chloride contaminated concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(8), 1151–1156.
- [4] Neville, A. (2000). There is more to concrete than cement. *Concrete International*, 22(1), 73–74.
- [5] Andrade, C. (1988). Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. *Informes de La Construcción*, 40(398), 7–14.
- [6] Lapa, J. S. (2008). *Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto*. Belo Horizonte.