



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Aplicabilidade de ensaios não-destrutivos para obtenção de dados de projeto e avaliação da condição estrutural de pontes de concreto armado

Matheus Sant'Anna Andrade¹, Diôgo S. Oliveira², Marco Antônio N. Cardoso³, Carol F. R. Santos⁴, Álvaro C. Coelho⁵, Ana C. P. Martins⁶, Christian A. F. Souza⁷, José Carlos L. Ribeiro⁸, José Maria F. Carvalho⁹, Kléos M. L. César Jr.¹⁰

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV)/Departamento de Engenharia Civil (DEC)/ matheus.andrade@ufv.br
^{2,3,4,5,6,7,8,9,10} UFV/ DEC/diogooliveira@ufv.br², marco.a.cardoso@ufv.br³, carolrezende@ufv.br⁴,
alvaro.coelho@ufv.br⁵, ana.martins5@ufv.br⁶, christian.souza@ufv.br⁷, jcarlos.ribeiro@ufv.br⁸,
josemaria.carvalho@ufv.br⁹, kleos@ufv.br¹⁰

Resumo

Ensaos não-destrutivos (END) são uma ferramenta capaz de fornecer informações sobre as estruturas tanto para a obtenção de dados de projeto quanto para a avaliação da condição estrutural. A utilização de técnicas não-destrutivas se destaca pela facilidade, rapidez e baixo custo de execução. Neste trabalho, foram analisadas a aplicabilidade, a acurácia e as informações que podem ser retiradas a partir de ensaios em campo para reconstituição de projeto e avaliação da condição estrutural de pontes. Desse modo, foram realizados ensaios com esclerômetro, ultrassom e pacômetro, para estimativa dos dados de projeto, e ensaio de potencial de corrosão para avaliar a condição estrutural de três pontes localizadas no interior de Minas Gerais. Observou-se que o pacômetro apresenta limitações em regiões de grande densidade de armação. O equipamento não apresentou boa precisão tanto na identificação de armaduras quanto na estimativa de seu diâmetro. Com relação às propriedades do concreto, verificou-se que o índice esclerométrico não pode ser correlacionado com a resistência quando considerado isoladamente. Por outro lado, foi possível obter modelos preliminares que correlacionam a velocidade de propagação de pulso ultrassônico indireta com a resistência do concreto. Além disso, foi desenvolvido um modelo preliminar a partir da metodologia SonReb, que combina a utilização do esclerômetro com o ultrassom, o que permitiu melhorar a resposta obtida, pois o esclerômetro e o ultrassom são afetados de forma oposta quando se trabalha com concretos antigos com elevado grau de carbonatação. Por fim, a análise do potencial de corrosão se mostrou eficiente para identificar pontos de vulnerabilidade da estrutura que estão mais susceptíveis ao desenvolvimento de processo de corrosão ativa.

Palavras-chave

Ensaos não-destrutivos; Pontes de Concreto Armado; Velocidade de pulso ultrassônico; Metodologia SonReb.

1. Introdução

A avaliação da condição estrutural de pontes é feita, principalmente, por meio de inspeções visuais. Esse tipo de inspeção se baseia nas observações do inspetor e pode contar também com instrumentos simples para evidenciar pequenos danos como fissuras, trincas, etc (COST 345, 2007; DNIT, 2004). Inspeções visuais fornecem um baixo volume de informações, visto que só se pode avaliar aquilo que está ao alcance do inspetor porém, apesar de ser uma análise subjetiva e qualitativa, inspeções visuais são a prática dominante para a avaliação da condição estrutural de pontes, já que é um método rápido e barato de detecção de patologias em estruturas (ALANI; ABOUTALEBI; KILIC, 2014; OMAR; NEHDI, 2018). Além disso, as observações de inspeções visuais são facilmente relacionáveis às estratégias de manutenção e reparado das OAE (COST 345, 2007).

No entanto, a realização de ensaios complementares é capaz de fornecer um elevado nível de informações sobre a estrutura e os mecanismos de deterioração em desenvolvimento. Nesse contexto, a utilização de técnicas que permitam extrair informações sobre as propriedades dos materiais, bem como sobre grau de deterioração da estrutura, se mostram como importantes ferramentas na avaliação global da estrutura. Dentre essas técnicas, destaca-se a realização de ensaios semidestrutivos (ESD) ou não-destrutivos (END) nas pontes. Tais ensaios são utilizados para complementar inspeções visuais fornecendo informações sobre as condições dos elementos das pontes que não são detectáveis apenas pela inspeção visual (PENNDOT, 2021).

Apesar de fornecer informações relevantes sobre as propriedades do concreto utilizado em pontes, a execução de ESD é uma atividade cara, invasiva, que demanda tempo e, que em muitos casos, é difícil de ser executada. Consequentemente, poucos testemunhos são extraídos, o que não permite o mapeamento completo dos níveis de resistência na estrutura sob investigação (VASANELLI *et al.*, 2017). Por outro lado, os END apresentam uma série de vantagens devido à agilidade e efetividade na obtenção de resultados (VASANELLI *et al.*, 2017). Além de não danificarem a estrutura, END podem ser realizados com a estrutura em serviço e ainda podem contribuir para a tomada de decisão e manutenção corretiva das estruturas em análise (ESTEVES; MEDEIROS-JUNIOR; MEDEIROS, 2018; RENS; NOGUEIRA; TRANSUE, 2005). Além disso, END são particularmente importantes para avaliar a capacidade de carga de estruturas existentes, dada a impossibilidade de realizar testes em testemunhos moldados com o mesmo concreto usado na construção e a dificuldade envolvida no processo de extração de corpos de prova (BRECCOLOTTI; BONFIGLI; MATERAZZI, 2013)

Este artigo busca levantar informações sobre os ensaios experimentais (END e ESD) mais comuns que podem ser aplicados em uma ponte e avaliar a sua aplicabilidade para as principais patologias encontradas nesse tipo de estrutura. Para tal, é feita uma revisão acerca do princípio de funcionamento de cada ensaio, seguido pela aplicação prática das técnicas escolhidas.

2. Ensaios não-destrutivos (END)

2.1. Localização de armaduras

Um dos principais problemas para o gerenciamento de pontes no Brasil é a falta de informação sobre as estruturas existentes. Grande parte das pontes que compõem o sistema viário brasileiro são muito antigas e não possuem seus projetos arquivados ou estes se perderam com o tempo. Assim, em muitos casos não é possível obter informações cruciais para a análise das pontes, como a resistência do concreto e as armaduras adotadas em cada estrutura. Nesse sentido, tem-se como um primeiro passo na realização de inspeções detalhadas, a utilização de um equipamento para identificar a existência e a posição das barras de aço na estrutura. O equipamento utilizado para identificação das barras de aço é chamado pacômetro e tem como principal vantagem a capacidade de identificar não somente a presença de barras de aço, mas também estimar o seu diâmetro e a espessura do cobrimento de concreto.

2.2. Esclerometria

O ensaio esclerométrico é prescrito pela NBR 7584 (ABNT, 2012) e fornece informações a respeito da dureza superficial do concreto a uma profundidade de aproximadamente 20 a 30 mm (ABNT, 2012; BREYSSE, 2012). Este é o método não-destrutivo mais simples e mais barato, e a partir dele é possível verificar a uniformidade da dureza da superfície do concreto em diversos pontos da estrutura (BREYSSE, 2012; MASI; CHIAUZZI, 2013; PUCINOTTI, RAFFAELE, 2015).

Apesar de ser um teste simples, existem vários fatores que afetam seu resultado além da resistência do concreto em si. Assim, os resultados obtidos por esse método não são tão confiáveis quanto outros métodos (ACI COMMITTEE 228, 2003). Diversos autores verificaram pequena correlação e baixo nível de significância entre o resultado obtido pelo esclerômetro e a resistência à compressão do concreto, apresentando validade estatística questionável devido à alta dispersão dos dados obtidos (BRENCICH *et al.*, 2013; MASI; CHIAUZZI, 2013; PUCINOTTI, R., 2013).

Outro ponto que apresenta grande influência sobre o Índice Esclerométrico (IE), é o desenvolvimento do processo de carbonatação. Por se tratar de um processo de deterioração que afeta principalmente a camada superficial de concreto, a carbonatação apresenta grande influência sobre os resultados desse ensaio. A formação de CaCO_3 como produto do processo de carbonatação, devido à sua natureza expansiva, provoca a redução da porosidade do concreto e o aumento da dureza superficial, superestimando o IE obtido neste ensaio (ACI COMMITTEE 228, 2003; KIM *et al.*, 2009; MASI; CHIAUZZI, 2013).

2.3. Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A velocidade de pulso ultrassônico é um ensaio que determina a condição relativa do concreto pela propagação de uma onda sônica de alta frequência através do material. A onda é emitida por um transmissor e viaja através do elemento até ser detectado por um receptor (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2004). Para um dado concreto, uma mudança na velocidade de propagação da onda está diretamente relacionada com uma mudança no módulo de elasticidade do material (ACI COMMITTEE 228, 2003; BREYSSE, 2012).

Existem vários modelos de correlação entre a velocidade de propagação e a resistência do concreto; no entanto, nenhum pode ser generalizado, devido ao fato a velocidade ser altamente influenciada pela composição do concreto e por características ambientais (SANTINI; FORTE; SGUERRI, 2020). Assim, para estimar a resistência do concreto a partir da VPU, deve-se sempre trabalhar com a correlação entre os resultados de ultrassom e testemunhos extraídos da própria estrutura (BRENCICH *et al.*, 2013; PUCINOTTI, R., 2013).

Apesar de a velocidade de onda variar com a densidade do material, outros fatores podem influenciar as leituras deste ensaio, como a existência de armaduras. De acordo com (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2004), sempre que possível, devem ser evitadas medições de velocidade próximas às barras de aço. Recomenda-se primeiro identificar a posição das armaduras e então realizar a leitura de velocidade em regiões que a influência das barras possa ser negligenciada. (BREYSSE, 2012)

2.4. Metodologia SonReb

A metodologia SonReb combina a utilização do esclerômetro com o ultrassom para estimar a resistência do concreto. Essa metodologia se baseia na suposição de que combinar ENDs que medem diferentes propriedades físicas do concreto, ambas correlacionáveis com a resistência, poderia diminuir as incertezas do método (BRECCOLOTTI; BONFIGLI; MATERAZZI, 2013).

O método SonReb é a combinação de END mais conhecida e mais amplamente utilizada (BREYSSE, 2012). O conceito por trás da combinação destes métodos é que alguns fatores que afetam tanto a leitura do ultrassom quanto do esclerômetro, são afetados de maneiras opostas. Por exemplo, enquanto a velocidade de propagação aumenta com a umidade e diminui com a idade do concreto, o contrário acontece com o índice esclerométrico (MASI; CHIAUZZI, 2013).

2.5. Potencial de Corrosão

O potencial de corrosão é um ensaio utilizado para avaliar a probabilidade de existência de corrosão ativa em um elemento estrutural. É importante ressaltar que as medições de potencial de corrosão não representam informações quantitativas sobre a taxa de corrosão das barras, mas sim sobre a probabilidade de existir um processo ativo de corrosão (RILEM, 2003). Sendo assim, esse ensaio se mostra como uma boa alternativa para mapeamento e identificação de possíveis pontos de corrosão para serem ensaiados por meio de técnicas mais complexas e localizadas. Os resultados do ensaio de potencial de corrosão podem ser interpretados conforme a Tabela 1.

Deve-se considerar, no entanto, que os limites definidos não devem ser considerados em situações que a frente de carbonatação tenha atingido as barras de aço sob análise. Além da profundidade da frente de carbonatação, o resultado obtido para esse ensaio é influenciado por alguns parâmetros, como a temperatura, a umidade e a concentração de cloretos (RILEM, 2003; ZOU *et al.*, 2016). Quando a frente de carbonatação ultrapassa todo o cobrimento de concreto, atingindo a

armadura, os potenciais tendem a ser mais positivos (RILEM, 2003). Por outro lado, o aumento da temperatura e da umidade leva a valores de potenciais mais negativos. O valor do potencial de corrosão também diminui com o aumento da concentração de íons cloreto (RILEM, 2003; ZOU *et al.*, 2016). Assim, a (RILEM, 2003) indica que a determinação a existência de corrosão nas barras, não deve ser feito com o valor absoluto do potencial, mas sim com o gradiente de potencial entre dois pontos.

Tabela 1. Interpretação do potencial de corrosão.

Potencial	Interpretação
$P \geq -200 \text{ mV}$	90% de probabilidade de existir corrosão ativa
$-350 \text{ mV} \leq P \leq -200 \text{ mV}$	Inconclusivo
$P \leq -350 \text{ mV}$	90% de probabilidade de existir corrosão ativa

3. Metodologia

Este estudo busca analisar a aplicabilidade de ensaios não-destrutivos em pontes localizadas no interior do estado de Minas Gerais, conforme informações apresentadas na Tabela 2. Em cada uma das pontes analisadas foram realizados ensaios para localização de armaduras com o pacômetro, ensaio de dureza superficial com o esclerômetro, velocidade de pulso ultrassônico e ensaio de potencial de corrosão. Além dos END citados, também foram realizados ESD, como a extração de testemunhos e aspersão de fenolftaleína pra verificar o avanço da frente de carbonatação.

Tabela 2. Estruturas selecionadas e suas informações.

Estrutura	Informações
Ponte sobre o Ribeirão Teixeira	Localização: Teixeira – MG (BR 120) Ano de construção ¹ : 1985 Comprimento: 32 metros distribuídos em 2 balanços de 6 metros e 1 vão de 20 m
Viaduto de Coimbra I	Localização: Coimbra – MG (BR 120) Ano de construção ¹ : 1985 Comprimento: 100 metros distribuídos em 2 balanços de 6 m e 4 vãos de 22 m
Ponte sobre o Rio Pirapetinga	Localização: Piranga – MG (BR 482) Ano de construção ¹ : 2013 Comprimento: 49 metros distribuídos em 3 vãos iguais

Notas: ¹ O ano de construção das estruturas foi estimado com base em informações locais.

4. Resultados e Discussão

Os resultados dos END em cada estrutura, estão apresentados, de maneira geral, na Tabela 3. Cada um dos resultados será discutido de maneira detalhada em nos tópicos 4.1 a 4.6. Percebe-se que as pontes sobre o Ribeirão Pirapetinga (Piranga) e o Viaduto de Coimbra possuem resistência do concreto próxima, apesar da diferença de idade. Por outro lado, a ponte de Teixeira e a de Coimbra apresenta grande diferença da resistência do concreto, apesar de possuírem a mesma idade.

4.1. Localização das armaduras

O ensaio para identificação de armaduras foi realizado inicialmente em todas as três estruturas para escolha dos pontos de extração dos testemunhos. A utilização do pacômetro para identificação das barras antes da realização de outros END se mostra como uma etapa essencial já que a pré-identificação das barras é fundamental não apenas para evitar que os END sejam feitos diretamente sobre as barras de aço, mas também para definir qual a melhor direção de ensaio.

Tabela 3. Resumo dos resultados obtidos

Ponte	IE ¹	UPV ¹	f _c ¹
Ponte sobre o Ribeirão Teixeira	63,6	2651	13,8
Ponte sobre o Rio Pirapetinga	46,5	3312	36,5
Viaduto de Coimbra I	65,9	3261	39,2

¹ Valores médios obtidos a partir de seis resultados.

Além disso, foi feita a análise do ensaio em um pilar da ponte de Coimbra e uma longarina de Teixeira. Para o pilar, foram identificadas seis barras longitudinais de diâmetro aproximadamente igual a 25 mm distribuídas em uma face deste pilar e estribos aproximadamente a cada 20 cm, conforme mostrado na Figura 1. Verificou-se, portanto, que para este tipo de elemento estrutural, o pacômetro apresentou bons resultados para identificação das barras e do cobrimento de concreto, apesar de deixar a desejar na estimativa do diâmetro das barras.

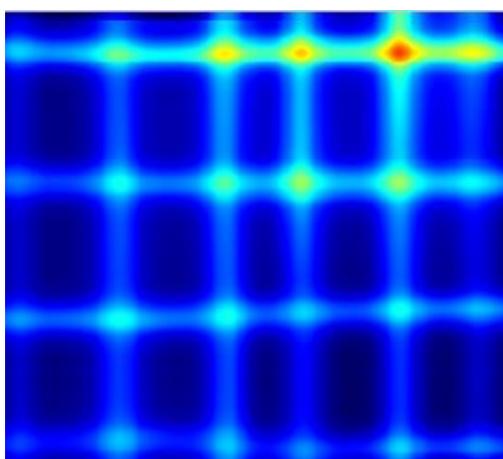


Figura 1. Identificação das armaduras de um pilar de ponte

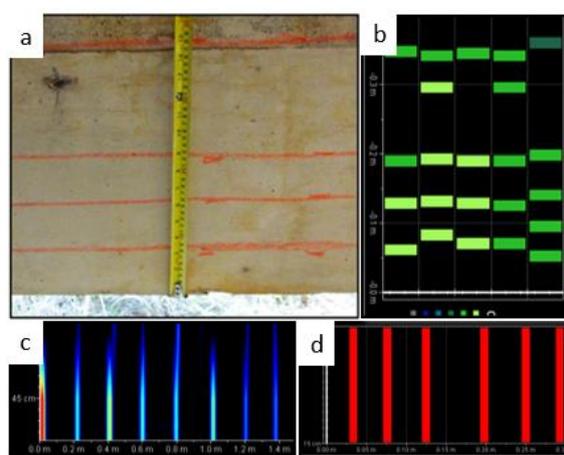


Figura 2. Identificação de armaduras longitudinais e transversais em uma viga de ponte

No caso da viga, a identificação da camada superficial de barras (estribos) se sobressaiu, enquanto a identificação da segunda camada (barras longitudinais) foi comprometida. Na Figura 2 é mostrada a utilização do pacômetro para determinar o posicionamento das barras de aço em uma viga: b) camadas de barras na face lateral da viga, c) estribos, d) número de barras na face inferior.

No caso dos estribos, é possível observar a precisa identificação das barras e o espaçamento regular entre elas. Nesse caso, o pacômetro mostrou boa precisão tanto para localização das armaduras quanto para a estimativa do diâmetro. Quanto à identificação do número de camadas de barras na zona de armação passiva da viga, foram identificadas inicialmente três camadas de armaduras. Além disso, foram identificadas seis barras de aço longitudinais; no entanto, não foi possível estimar o diâmetro dessas barras devido à proximidade entre elas.

Verificou-se a baixa precisão do pacômetro para estimativa do diâmetro em zonas de alta taxa de armação. Como pontes são estruturas de grande porte, o que geralmente implica na utilização de seções transversais com alta densidade de armação, tal limitação se torna especialmente crítica. Assim, esse equipamento apresenta limitações na identificação de armaduras que podem comprometer a sua utilização para esse tipo de estrutura.

4.2. Avanço da frente da carbonatação

O avanço da frente de carbonatação nas pontes, obtido por meio da medição da espessura da camada carbonatada utilizando-se fenolftaleína, conforme ilustrado pela Figura 3. Verificou-se o

avanço da frente de carbonatação em 2,5 cm para as pontes localizadas em Piranga e Coimbra. Já para a ponte de Teixeiras, observou-se o avanço de 3,0 cm para os testemunhos extraídos em uma extremidade da ponte e 5,0 cm na outra extremidade.

Quando se compara os resultados obtidos para as pontes de Coimbra e Piranga, que apresentam resistências médias próximas, e levando-se em consideração a diferença de idade entre elas, fica claro que o avanço da frente de carbonatação na ponte de Piranga se dá de maneira mais rápida. Isso pode estar relacionado aos defeitos superficiais verificados durante a inspeção. Tais defeitos são provenientes de falhas de execução dos processos de lançamento e adensamento do concreto, resultando em uma superfície porosa e com muitos nichos de concretagem, o que teria contribuído para a aceleração do processo de carbonatação.

Por outro lado, quando se compara as pontes de Coimbra e Teixeiras, que possuem idades próximas, a maior espessura de camada carbonatada de Teixeiras se dá pela pior qualidade do concreto utilizado nesta estrutura. A diferença de resistência observada entre os dois lados da ponte também se reflete no avanço da frente de carbonatação, que é maior para um extremo da ponte. Uma vez que o avanço da frente de carbonatação atingiu 3,0 cm em um lado e já ultrapassou esse valor na outra extremidade, pode-se concluir que todo o cobrimento de concreto já foi comprometido, o que torna as barras existentes mais susceptíveis à corrosão.

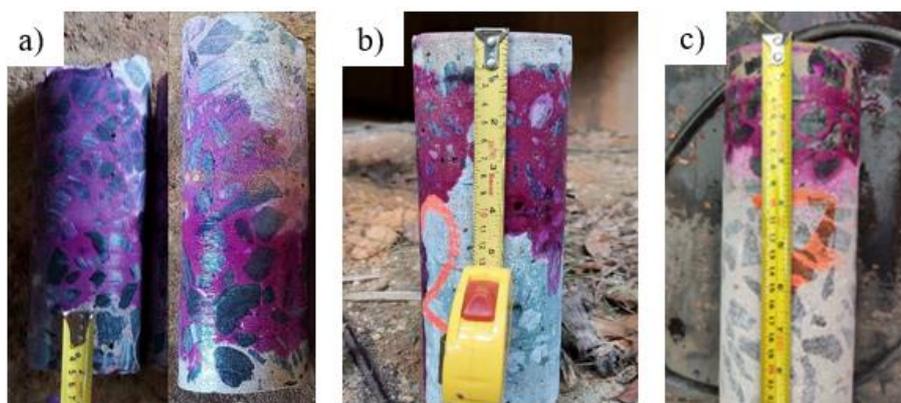


Figura 3. Exemplos da utilização de fenolftaleína para medida da carbonatação

4.3. Índice esclerométrico

Os resultados médios obtidos para o ensaio com o esclerômetro, para as três OAE's analisadas, são apresentados na Tabela 3. Nesse caso, não foi possível criar um modelo que correlacione o índice esclerométrico e a resistência do concreto com boa precisão, tanto para cada estrutura individualmente quanto para o conjunto de pontes analisado. Portanto, com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que, assim como verificado por outros autores (BRENCICH *et al.*, 2013; PEREIRA; ROMÃO, 2018; PUCINOTTI, RAFFAELE, 2015), o esclerômetro não representa uma forma precisa de estimar a resistência do concreto.

Portanto, o esclerômetro se mostra como um equipamento vantajoso para avaliar a uniformidade do concreto *in-loco* e para delimitar regiões de uma estrutura em que o concreto seja de má qualidade ou esteja deteriorado. O esclerômetro só deve ser utilizado como ferramenta para estimar a resistência do concreto quando existir uma curva de calibração apropriada, a qual tenha sido obtida a partir de testemunhos extraídos da própria estrutura.

4.4. Velocidade de propagação de pulso ultrassônico indireta

Com base nos resultados obtidos foi determinado um modelo de regressão exponencial para representar a relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência do concreto, apresentado na Figura 4. Conforme adotado por diversos autores (NASH'T *et al.*, 2005; PEREIRA; ROMÃO, 2018; TURGUT, 2004), um modelo exponencial foi considerado o melhor para representar a correlação entre a VPU e a resistência do concreto. O coeficiente de correlação obtido foi igual a

0,884. Na Figura 4, além do modelo desenvolvido, estão representados também o intervalo de confiança (95%) e o intervalo de previsão do modelo criado.

$$f_c = 0,42676e^{0,00135 \cdot V} \quad (1)$$

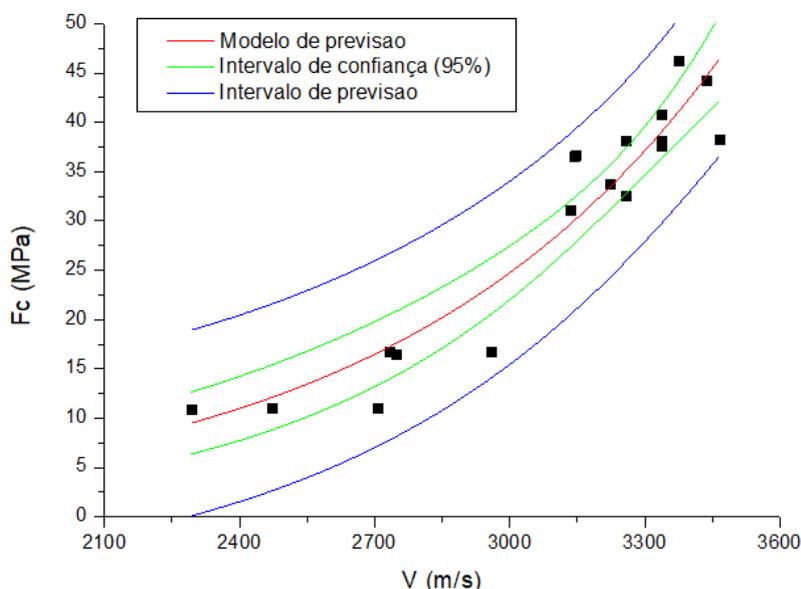


Figura 4. Modelo de estimativa da resistência do concreto.

Com base no modelo desenvolvido, é possível obter faixas de previsão da resistência de acordo com as medidas de velocidade de propagação indireta. Algumas dessas faixas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Faixas de resistência de acordo com a VPU.

Velocidade (m/s)	Limite inferior (MPa)	Previsão (MPa)	Limite superior (MPa)
2400	2,0	12,0	20,0
2700	7,0	17,0	26,0
3000	16,0	25,0	34,0
3300	28,0	36,0	47,0

Portanto, é possível concluir que a utilização do ultrassom fornece informações importantes sobre a qualidade do concreto e permite também a estimativa da resistência dentro dos valores estudados neste trabalho. De modo a aumentar a faixa de aplicação desse modelo, é necessário analisar um número maior de estruturas, buscando novas variações das classes de resistência e da idade do concreto. Ressalta-se no entanto, conforme já destacado anteriormente, que todos os modelos devem ser aplicados apenas para a estrutura que o originou, dessa forma o modelo proposto deve ser aplicado com cuidado, pois pode não ser aplicável à estruturas no geral.

4.5. Metodologia SonReb

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi ajustado um modelo de regressão, definido pela Equação (2). O modelo criado apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,908$ e, com base neste modelo foram obtidos os gráficos de superfície e contorno dados na Figura 5. Assim como o modelo obtido apenas com dados de velocidade de propagação do pulso ultrassônico, este modelo também apresenta boa correlação. A definição de faixas de resistência para o concreto, apesar de preliminar, é uma boa alternativa para a estimativa das propriedades do concreto em estruturas que não se tem essas informações e onde não é possível fazer a extração de corpos de prova.

$$\sqrt{f_c} = -2,85 - 0,0265 \cdot IE + 0,003166 \cdot V \quad (2)$$

Conforme destacado por Masi e Chiauzzi (2013), a idade do concreto provoca efeitos contrários nos dados de velocidade de propagação e índice esclerométrico. Isso pode ser verificado por meio da Figura 5b em que, para uma dada velocidade, à medida que se aumenta o índice esclerométrico, ou seja, conforme o processo de carbonatação avança com a idade do concreto, existe a tendência de redução da resistência. O efeito contrário também pode ser verificado pela Figura 5b em que, para um dado índice esclerométrico, conforme se aumenta a velocidade de propagação, aumenta-se a faixa de resistência do concreto.

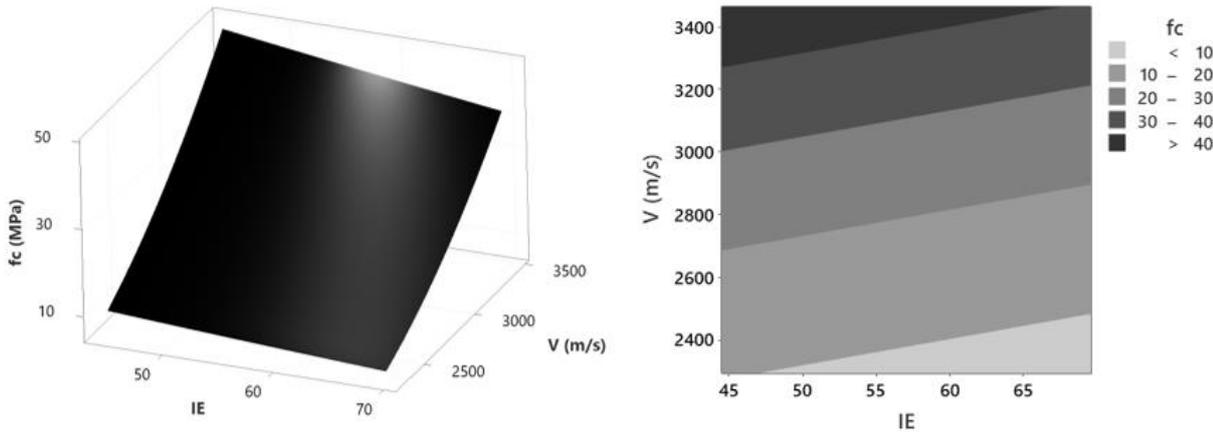


Figura 5. Gráficos de superfície e contorno da resistência do concreto a partir do SonReb

4.6. Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão foi realizado em um pilar e em uma longarina da ponte de Teixeira. O pilar está mostrado na Figura 6, destacando a existência de pontos de deslocamento e exposição de armaduras com claros sinais de corrosão. Os resultados do ensaio de potencial de corrosão são apresentados na Figura 7, onde são destacados as regiões de deslocamento do concreto – traçado preto – e as armaduras expostas – linhas vermelhas – mostrados na Figura 6.



Figura 6. Deslocamento do concreto e armaduras expostas na base do pilar.

Com relação aos pontos de deslocamento e exposição da armadura, percebe-se claramente que estes pontos se mostram como regiões de potenciais altamente negativos e elevados gradientes de potenciais em relação aos demais pontos no seu entorno. Os potenciais obtidos foram mais negativos sobre as armaduras expostas e se tornam menos negativos à medida em que se afasta da armadura corroída. Ainda na região do deslocamento, porém na parte superior, onde o deslocamento é superficial e não atinge a armadura, o potencial de corrosão apesar de menos

negativo, também se mostra como uma região com destacado gradiente em relação aos pontos vizinhos, o que também indica a presença de processo ativo de corrosão.

Com relação à aplicabilidade deste ensaio, pode-se concluir que ele representou bem os pontos de maior vulnerabilidade à corrosão. Destaca-se, novamente, que o critério adotado para a interpretação de seus resultados não deve ser simplesmente numérico, mas levar em consideração os pontos de maior vulnerabilidade da estrutura e os gradientes de potencial observados em cada caso.

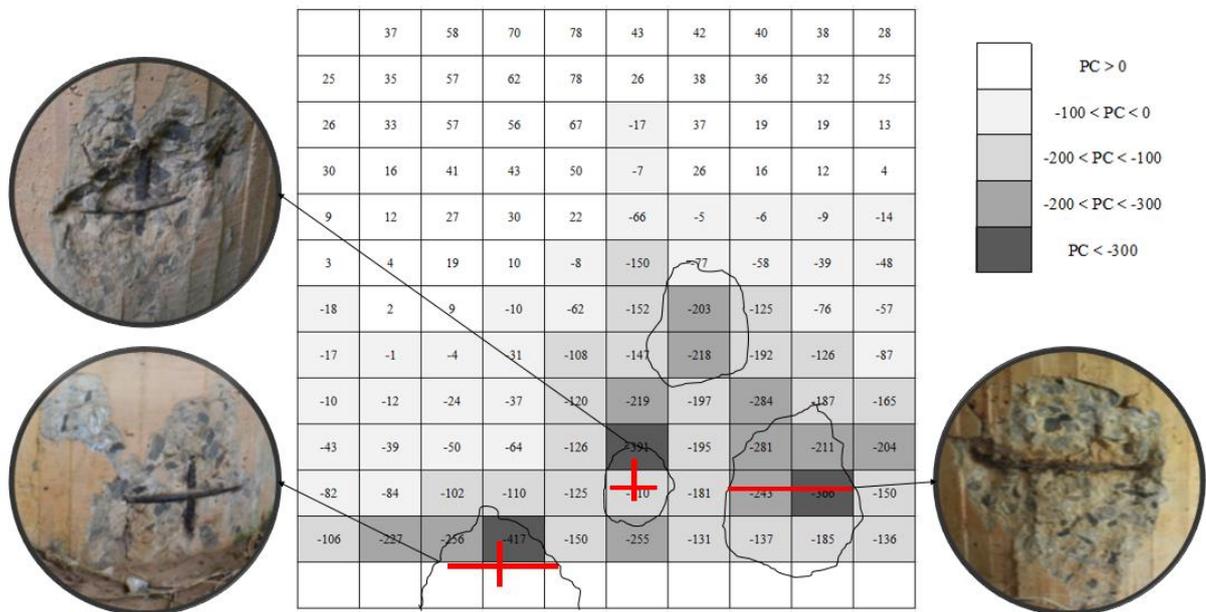


Figura 7. Ensaio de potencial de corrosão no pilar.

5. Conclusão

Neste estudo foi analisada a aplicabilidade de ensaios não-destrutivos para a avaliação da condição estrutural de pontes de concreto armado. Com base nos experimentos realizados, pode-se concluir que:

- O esclerômetro fornece apenas uma medida da dureza superficial do concreto, não sendo indicado para a estimativa de resistência;
- A velocidade de pulso ultrassônico indireta foi correlacionada com a resistência do concreto por meio de um modelo preliminar de regressão;
- Por meio do método SonReb foi possível desenvolver um modelo preliminar que determina faixas de resistência para o concreto combinando resultados obtidos com o ultrassom e o esclerômetro;
- O pacômetro se mostrou eficiente na localização de barras em estruturas que apresentam baixa densidade de armaduras. No entanto, regiões com alta densidade de armadura indicaram uma limitação tanto para identificação das barras quanto para a estimativa do seu diâmetro.
- O ensaio de potencial de corrosão se mostrou capaz de identificar os pontos de maior vulnerabilidade à corrosão e pode ser utilizado como ferramenta auxiliar para detectar a extensão da região em corrosão ativa.

6. Referências

- ABNT. *ABNT NBR 7584 - Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio*. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.
- ACI COMMITTEE 228. *ACI 228.1R-03 In-Place Methods to Estimate Concrete*. p. 44, 2003.
- ALANI, Amir M.; ABOUTALEBI, Morteza; KILIC, Gokhan. Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges. *NDT & E International*, v. 61, p. 80–94, jan. 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869513001333>>.

- ATOYEBI, O. D.; AYANRINDE, O. P.; OLUWAFEMI, J. Atoyebi et al. (2019). *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1378, n. 3, p. 032096, 1 dez. 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1378/3/032096>>.
- BRECCOLOTTI, Marco; BONFIGLI, Massimo Federico; MATERAZZI, Annibale Luigi. Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method. *NDT and E International*, v. 59, p. 96–104, 2013.
- BRENCICH, Antonio et al. Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test. *Civil Engineering and Architecture*, v. 1, n. 3, p. 66–78, out. 2013. Disponível em: <http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=455>.
- BREYSSE, D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 139–163, ago. 2012.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS EN 12504-4 - Testing concrete: part 4: determination of ultrasonic pulse velocity*. [S.l.]: British Standards Institution, 2004.
- COST 345. *Procedures Required for the Assessment of Highway Structures*. . [S.l.: s.n.], 2007. Disponível em: <<http://www.cordis.lu/cost-transport/home.html>>.
- DNIT. *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.
- ESTEVEZ, Ian C.A.; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; MEDEIROS, Marcelo H.F. NDT for bridges durability assessment on urban-industrial environment in Brazil. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, v. 36, n. 5, p. 500–515, 16 out. 2018. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJBPA-04-2018-0032/full/html>>.
- KIM, Jin Keun et al. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 2, p. 139–144, fev. 2009.
- MASI, A.; CHIAUZZI, L. An experimental study on the within-member variability of in situ concrete strength in RC building structures. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 951–961, 2013.
- NASH'T, H et al. *Finding an Unified Relationship between Crushing Strength of Concrete and Non-destructive Tests*. . [S.l.: s.n.], 2005. Disponível em: <www.ndt.net>.
- OMAR, Tarek; NEHDI, Moncef L. Condition assessment of reinforced concrete bridges: Current practice and research challenges. *Infrastructures*, v. 3, n. 3, 14 set. 2018.
- PENNDOT. *Bridge Safety Inspection Manual*. . [S.l.: s.n.], 2021.
- PEREIRA, Nuno; ROMÃO, Xavier. Assessing concrete strength variability in existing structures based on the results of NDTs. *Construction and Building Materials*, v. 173, p. 786–800, 10 jun. 2018.
- PUCINOTTI, R. Assessment of in situ characteristic concrete strength. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 63–73, 2013.
- PUCINOTTI, Raffaele. Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 75, p. 331–341, 30 jan. 2015.
- RENS, Kevin L.; NOGUEIRA, Carnot L.; TRANSUE, David J. Bridge Management and Nondestructive Evaluation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 19, n. 1, p. 3–16, fev. 2005.
- RILEM. RILEM TC 154 - EMC -Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, v. 36, n. August-September, p. 461–471, 2003.
- SANTINI, Silvia; FORTE, Angelo; SGUERRI, Lorena. The structural diagnosis of existing rc buildings: The role of nondestructive tests in the case of low concrete strength. *Infrastructures*, v. 5, n. 11, p. 1–18, 1 nov. 2020.
- TURGUT, P. *Research into the correlation between concrete strength and UPV values*. . [S.l.: s.n.], 2004.
- VASANELLI, Emilia et al. Estimating in situ concrete strength combining direct and indirect measures via cross validation procedure. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 916–924, 1 out. 2017.
- ZOU, Z. H. et al. Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, v. 51, n. 8, p. 588–595, 16 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1478422X.2016.1167304>>.