



Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos

L. C. P. da Silva Filho¹, A. Lorenzi¹, J. L. Campagnolo¹, A. J. Strieder², U. C. de M. Quinino³, L. F. Caetano¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Osvaldo Aranha 99. Porto Alegre RS, Brasil.

² Universidade Federal de Pelotas. Praça Domingos Rodrigues, 02. Pelotas RS., Brasil.

³ Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Av. Unisinos 950. São Leopoldo RS., Brasil

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i3.14>

Artículo recibido el 01 de Junio de 2011, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 03 de Septiembre de 2011. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el segundo número de 2012 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primero de 2012

RESUMO

O concreto é parte fundamental dos mais variados projetos de engenharia e, sem dúvida, é o elemento estrutural mais utilizado no mundo. Esse fato conduz à necessidade de ferramentas de controle e análise de seu estado de conservação. Muitas das construções em concreto armado que formam a infra-estrutura civil que dão suporte às mais diversas atividades das sociedades modernas estão se aproximando do final de sua vida útil de projeto. Diante desse contexto, existe uma preocupação crescente com a avaliação do estado de deterioração e segurança das mesmas. O monitoramento constante das estruturas é um procedimento necessário, uma vez que a detecção preventiva dos problemas permite a utilização de métodos mais simples e econômicos para avaliação e reparo. Para tais fins, os métodos de ensaios não destrutivos (END) tornam-se uma estratégia de investigação bastante atraente e viável. Entre eles destacam-se: o ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico, o radar e a esclerometria. Devido à sua facilidade de aplicação e boa capacidade de diagnóstico, esses métodos se tornam alternativas valiosas para investigação do estado de conservação das estruturas de concreto. Diversos exemplos de aplicação evidenciam como a aplicação de END pode contribuir com sucesso no controle da deterioração e na verificação da qualidade de estruturas de concreto. O presente artigo revisa alguns casos reais nos quais atuou o Grupo de Pesquisa LEME-UFRGS, mostrando como foram empregadas técnicas de END.

Palavras-chave: concreto; ensaio não destrutivos.

Autor de contacto: Luis Carlos Pinto da Silva Filho (lcarlos66@gmail.com)

© 2011 Alconpat Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 1, No. 3, Septiembre - Diciembre 2011, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2011.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais de construção se confunde com a própria história da civilização, porque foi necessário ao homem servir-se deles para sobreviver e satisfazer suas necessidades de abrigo e conforto (Isaia, 2005). Muitas das construções em concreto armado que formam a infraestrutura civil estão se aproximando do final de sua vida útil de projeto. Conseqüentemente, existe uma preocupação crescente sobre o estado de deterioração e segurança das mesmas. No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se firmando, é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. A aplicação de END se constitui em uma estratégia interessante para monitorar o estado das mesmas. A propriedade de controle mais utilizada como indicativa da qualidade do concreto ainda é a resistência à compressão.

Nas últimas décadas, a aplicação de END na engenharia civil vem se tornando um tema de interesse em diversos países. No caso da indústria da construção civil, porém, que utiliza vários tipos de materiais (metais, madeira, concreto, alvenaria estrutural e outros compósitos), a utilização dos ENDs pode se tornar mais complexa, devido à necessidade de maior conhecimento acerca das propriedades e comportamento dos materiais.

Beutel et al enfatizam que o uso exitoso de END para engenharia civil depende da confiabilidade inerente associada à aplicação dos métodos, do conhecimento sobre os procedimentos e suas limitações, e do aspecto econômico (Beutel et al., 2006).

Acompanhando a tendência mundial, no Brasil a aplicação de END vem crescendo em vários setores. Acredita-se que a engenharia civil ainda é um campo no qual a utilização dos END vai se desenvolver bastante, vindo a se constituir em uma importante ferramenta para auxiliar os profissionais envolvidos no controle de suas obras.

O concreto é o material mais empregado no mundo, depois da água. Em grande parte isto é decorrente da excelente durabilidade do concreto armado. Infelizmente, apesar de o concreto ser muito durável em certas circunstâncias, muitas estruturas fabricadas com o mesmo estão sujeitas a ambientes ou condições deletérias, que rapidamente degradam seu desempenho ou afetam sua integridade (Andrade, 2005). Fatores como a ocorrência de falhas de projeto; o uso de dosagens incorretas; o emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e descimbramento; além da utilização incorreta das estruturas de concreto, têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com custos elevados de reparação (Figueiredo, 2005).

O uso de métodos de END é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. Dada sua natureza predominantemente não invasiva, os ensaios tipo END se constituem em uma das principais ferramentas de controle da qualidade de materiais e produtos, e já são amplamente utilizados em diversas atividades, tais como na indústria aeroespacial, no ramo automobilístico, no ramo elétrico e na construção naval (Cho, 2003).

Considerando que a resistência está fortemente correlacionada com a densidade do material, podem-se utilizar técnicas de ensaio de ultrassom, de radar e de esclerometria para avaliar a mesma, sem que seja necessário retirar amostras do material. O presente artigo revisa casos práticos de aplicação, evidenciando como podem ser empregados esses ensaios END para análise do estado de conservação de estruturas.

2. REVISÃO DOS PRINCÍPIOS DOS ENSAIOS NÃO DESTRUCTIVOS EMPREGADOS NOS CASOS EM ESTUDO

A aplicação de END se constitui em uma estratégia interessante para monitorar o estado de estruturas de concreto armado. A propriedade de controle mais utilizada como indicativa da qualidade do concreto ainda é a resistência à compressão. Considerando que a resistência está fortemente correlacionada com a densidade do material, podem-se utilizar ensaios de ultrassom, de radar e de esclerometria para produzir, de diferentes formas, estimativas de resistência, sem que seja necessário retirar amostras do material. Esta possibilidade é muito atraente por evitar que a investigação da resistência provoque danos, que podem ser caros de corrigir, ou que resultem num reparo cuja interface com o material original vai se constituir numa zona mais vulnerável à deterioração. Danos mal corrigidos podem acarretar numa redução da vida de serviço da estrutura.

A grande questão consiste em obter uma forma adequada de estimar a resistência de uma estrutura de concreto existente. Como salienta Isaia (Isaia, 2002): *“Toda predição que se pretenda realizar para a vida útil de uma estrutura de concreto deve partir da modelagem matemática dos fenômenos e propriedades envolvidas, da maneira mais precisa possível, para que se possa chegar a um resultado confiável”*. Isto nos leva a refletir sobre a maneira pela qual será possível procedermos a um controle efetivo da resistência nas estruturas de concreto.

Para esta finalidade, normalmente são utilizados corpos-de-prova moldados durante o processo de concretagem das estruturas. Entretanto, as condições de exposição e cura destes geralmente são bastante diferentes daquelas existentes na peça real, o que afeta diretamente a resistência. Diante deste problema, estimativas de resistência do concreto através da utilização de métodos de END, aplicados na estrutura real, passam a se constituir em uma possibilidade interessante de controle. Os END podem ser aplicados a cada fase da construção: tanto podem ser examinados os materiais como podem ser usadas as suas técnicas para então monitorar a integridade da estrutura durante a sua vida útil.

O documento TCS-17, produzido pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), aponta várias situações específicas associadas à construção civil nas quais o emprego de métodos END pode ser considerado atraente:

- controle tecnológico em pré-moldados ou construções in situ;
- aceitação ou rejeição, de materiais fornecidos;
- esclarecimento de dúvidas a respeito da mão de obra envolvida em mistura, lançamento, compactação ou cura do concreto, transporte;
- monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de fôrmas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- determinação da uniformidade do concreto;
- aumento do nível de confiança de um pequeno número de ensaios destrutivos;
- verificar a deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo, ataque do meio ambiente;
- avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- monitoramento de mudanças das propriedades do concreto no decorrer do tempo;
- fornecimento de informações para mudanças de utilização da estrutura.

Verifica-se que a maioria das vezes as aplicações estão associadas à localização e avaliação da importância de falhas e defeitos em estruturas de concreto endurecido. Este é hoje o objetivo principal do emprego de técnicas de END na construção civil.

2.1 Ultra-som

No ensaio de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU), uma onda de som ultra-sônica é projetada num material, sendo medida a velocidade de propagação da mesma, que vai depender da natureza do material, da sua porosidade e da presença de vazios ou de água no sistema de poros, entre outros fatores.

Este ensaio pode ser considerado como um dos mais promissores para a avaliação de estruturas de concreto. Através da sua utilização consegue-se realizar um controle das variações da compacidade da estrutura, que pode ser associada a mudanças das suas propriedades.

Segundo a ASTM E 114-95 (1995), o ensaio pode ser utilizado para controle da qualidade, detecção de defeitos, medição de espessuras ou caracterização dos materiais constituintes do concreto. A presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar. A interpretação está, portanto, baseada no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultra-sônicos pode ser correlacionado com a densidade do material.

Uma das vantagens é que, por ser rápido e não-destrutivo, o ensaios de VPU oferece a oportunidade de fazer um controle total dos elementos que compõem a estrutura, inclusive ao longo do tempo. Os resultados deste tipo de análise podem ser usados para prognóstico da qualidade ou para correção do processo tecnológico. A Figura 1 ilustra a execução do ensaio com um equipamento portátil de ultra-som no tabuleiro de concreto de uma ponte.

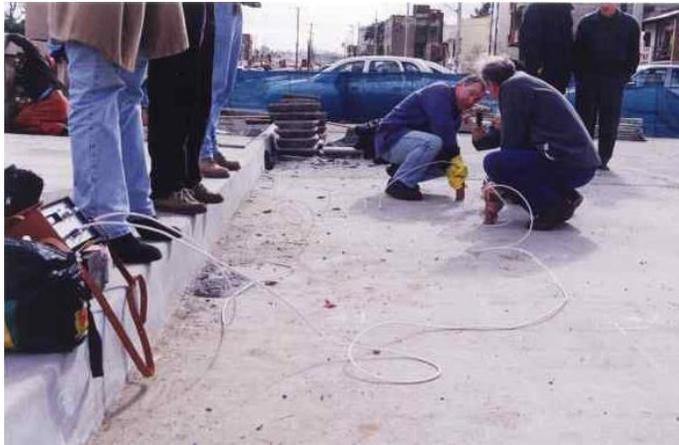


Figura 1. Execução do Ensaio de VPU.

2.2. Radar

As características essenciais do radar são uma antena colocada em uma superfície do material que será analisado, irradiando a energia para cima e para baixo, e uma antena receptora do sinal transmitido pela fonte. A técnica de radar é eficiente para a determinação de discontinuidades que às vezes surgem em lajes de concreto desenvolvendo-se paralelamente às superfícies planas nas lajes. Em investigações através da utilização de radar, pode-se determinar a real profundidade dos vazios que poderiam interferir no concreto, vazios esses ocasionados devido aos movimentos durante o lançamento do mesmo (Maierhofer et al., 2003).

A maioria das aplicações do radar na engenharia civil visa a caracterização geométrica do trecho sob investigação. Mais recentemente, alguns autores começaram a analisar como relacionar os resultados do radar com certas condições inerentes ao concreto, de forma a usar o método para

estimar o risco de patologias. A Figura 2 mostra a realização de um ensaio de radar no tabuleiro de uma ponte de concreto.



Figura 2. Equipamento de radar

2.3. Esclerometria

Esse é um dos mais antigos métodos END, e se baseia no princípio da reflexão, sendo o grau de recuo de uma massa arremessada por uma mola padrão contra a superfície de concreto tomada como um indicativo da resistência da camada superficial de concreto (Malhotra e Carino, 1991). Por ser pontual e de baixa energia, o ensaio é sensível a variações localizadas, tais como a presença de uma partícula grande de agregado logo abaixo do ponto de impacto (IAEA). O ensaio é classificado como um ensaio de dureza e está baseado no princípio de que o rebote de uma massa elástica depende da dureza da superfície contra qual a massa é impactada. A energia absorvida pelo concreto pode ser relacionada com a sua resistência (ACI, 2007), embora essa relação seja afetada por vários parâmetros, tal como a idade do concreto e sua espessura carbonatada.

As correlações entre o índice esclerométrico e as propriedades do concreto são determinadas empiricamente ou experimentalmente, sendo que estimativas da resistência à compressão poderão ser obtidas através de análise de tabelas ou curvas fornecidas pelo fabricante do aparelho (NBR, 1995). A Figura 3 mostra a realização de um ensaio de esclerometria no concreto.



Figura 3. Execução do Ensaio de Esclerometria.

3. DESCRIÇÃO DE ESTUDOS DE CASO DE AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Nesse item se apresentam alguns estudos de caso desenvolvidos usando as técnicas descritas no capítulo 2, as mais empregadas, em campo, para diagnóstico da condição de conservação, com base em análises de homogeneidade, de estruturas de concreto armado.

3.1. Estudo de Caso 1

O primeiro estudo de caso evidencia como ensaios END podem ser combinados para melhorar o diagnóstico. Neste caso foram empregados ensaios de propagação de pulso ultra-sônico e de esclerometria, para análise da condição de conservação de uma obra de grande porte localizada na cidade de Porto Alegre-RS, na qual havia dúvidas de que uma a resistência do concreto de uma série de pilares diferia significativamente do concreto empregado nas demais peças.

Os pilares a serem examinados faziam parte de um conjunto de elementos estruturais que haviam sido concretados em datas nas quais o controle do concreto apontou deficiência de resistência nos corpos de prova representativos do lote. Este indicativo levantou dúvidas sobre a efetiva condição, em termos de resistência, do grupo de elementos.

Buscando prevenir uma intervenção desnecessária na estrutura, e evitar danos com a retirada de testemunhos, sugeriu-se a realização de uma bateria de ensaios não-destrutivos que permitissem realizar um diagnóstico preliminar da condição dos elementos, relativa a outros elementos moldados na mesma época, nos quais o concreto foi aprovado pelo controle tecnológico.

Os ensaios foram realizados num conjunto de 18 pilares, divididos em 2 grupos. O primeiro grupo continha 6 pilares de referência (P21; P22; P30; P31; P48 e P50), escolhidos dentre os pilares próximo à região sob suspeita, com resistência especificada igual e idade próxima aos pilares sob análise, que serviram como amostras de controle. O segundo grupo de pilares era composto pelos 12 pilares (P20; P23; P24; P29; P35; P44; P46; P49; P51; P52; P60 e P61), localizados na região onde foi lançado o concreto sob suspeita.

Ensaio de esclerometria foram realizados com um esclerômetro Schmidt com registrador (modelo RN). Em cada pilar foi definida uma zona de ensaio, constituída de um grid de 9 pontos. As zonas foram posicionadas sempre no centro da face maior do pilar, a uma altura aproximada de 1.40 m. Os impactos foram aplicados sempre com o aparelho perpendicular à superfície, pelo mesmo operador. Os dados coletados foram analisados, de acordo com a norma, para retiradas de valores espúrios.

Além disso, foram realizados ensaios tipo UPV com auxílio de um emissor de ondas portátil, modelo V-METER MK-II. Para realização das medições de UPV foram criados grids nas faces dos pilares, com espaçamento de 25 cm, como mostrado na figura 2.

Foram estabelecidos, no grid, 2 pontos, denominados de E1 e E2, para posicionamento do transdutor emissor. Enquanto o emissor era mantido no ponto E1, o receptor era posicionado nas posições em torno do mesmo, resultando em 8 leituras de tempo de propagação de pulso. O emissor era então mudado para o ponto E2, onde se repetia este procedimento. No total, portanto, foram coletadas 16 leituras por pilar.

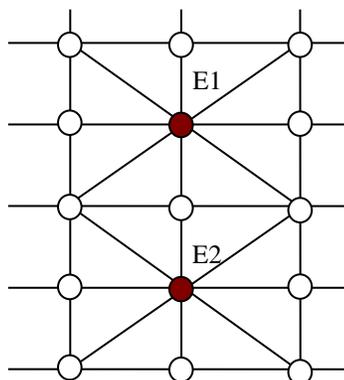


Figura 4. Grid de medição para leituras ultrasônicas.

A partir dos resultados dos ensaios esclerométricos obtidos em cada pilar constatou-se uma boa homogeneidade de valores entre os diversos pilares. Quando são analisados em separado os dados dos pilares de referência e dos pilares sob análise, observa-se que os valores das médias estão bastante próximos. Desta forma, em relação a este ensaio, não é possível rejeitar a hipótese de que os concretos dos dois grupos sejam equivalentes. Ou seja, não se confirma a suspeita de que os pilares sob análise tenham características inferiores, pelo menos em termos de dureza superficial, aos demais.

Uma estimativa de resistência feita a partir destes valores, que deve ser considerada com cautela, dadas as imprecisões nesta operação, indicou que os concretos ensaiados apresentam resistências entre 29 MPa e 33.5 MPa. Ou seja, valores em torno da resistência característica de cálculo empregada, que seria de 30 MPa, desprezada a margem de incerteza.

As figuras 5 e 6 mostram os resultados dos ensaios de UPV em alguns dos pilares ensaiados. As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através de um software de geração de curvas de nível. Desta forma pode-se ter uma estimativa da homogeneidade e da presença de defeitos em cada pilar.

Uma escala de cores foi empregada para ilustrar as variações de velocidade. Como se pode observar na figura 5, as velocidades mais elevadas foram registradas no pilar P30, que apresentou os melhores resultados dentre todos os pilares ensaiados. Em algumas zonas do pilar P21, a velocidade também atinge os 4200 m/s, porém se observa que a mesma cai levemente em outras zonas, onde podem ter ocorrido pequenas falhas de concretagem. O pilar P48 apresenta velocidades menores, especialmente na zona central do grid. Os pilares sob análise, mostrados na figura 5, apresentaram velocidades máximas levemente inferiores às registradas nos pilares de controle P21 e P30, mas compatíveis com as velocidades do pilar de controle P48.

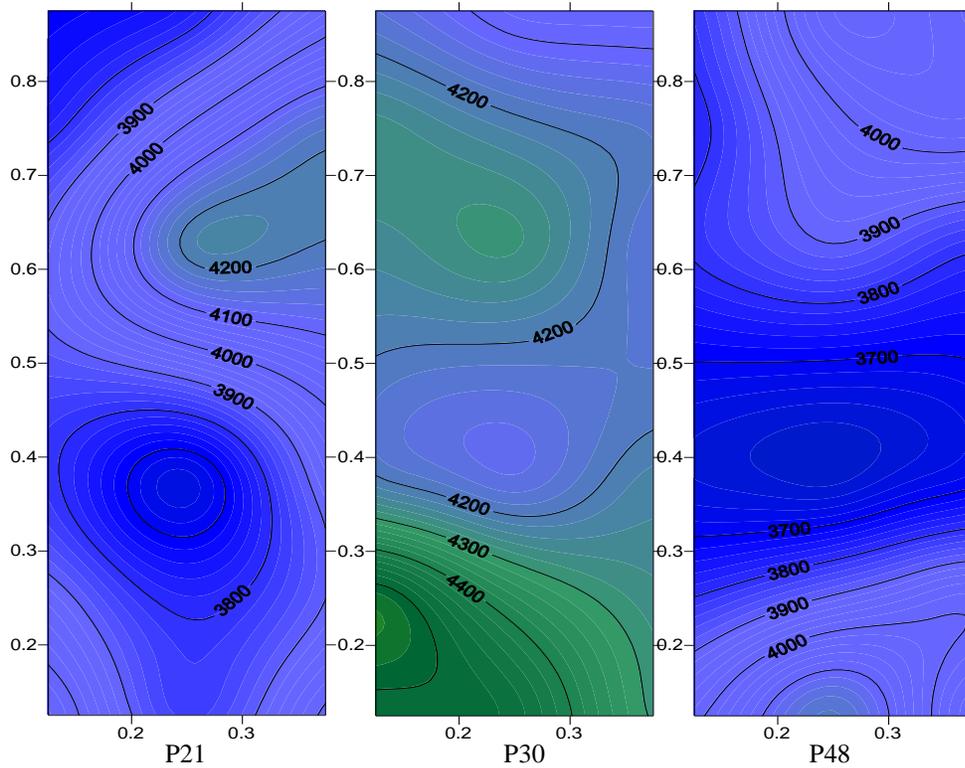


Figura 5. Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de propagação do pulso ultrasônico para alguns dos pilares de referência.

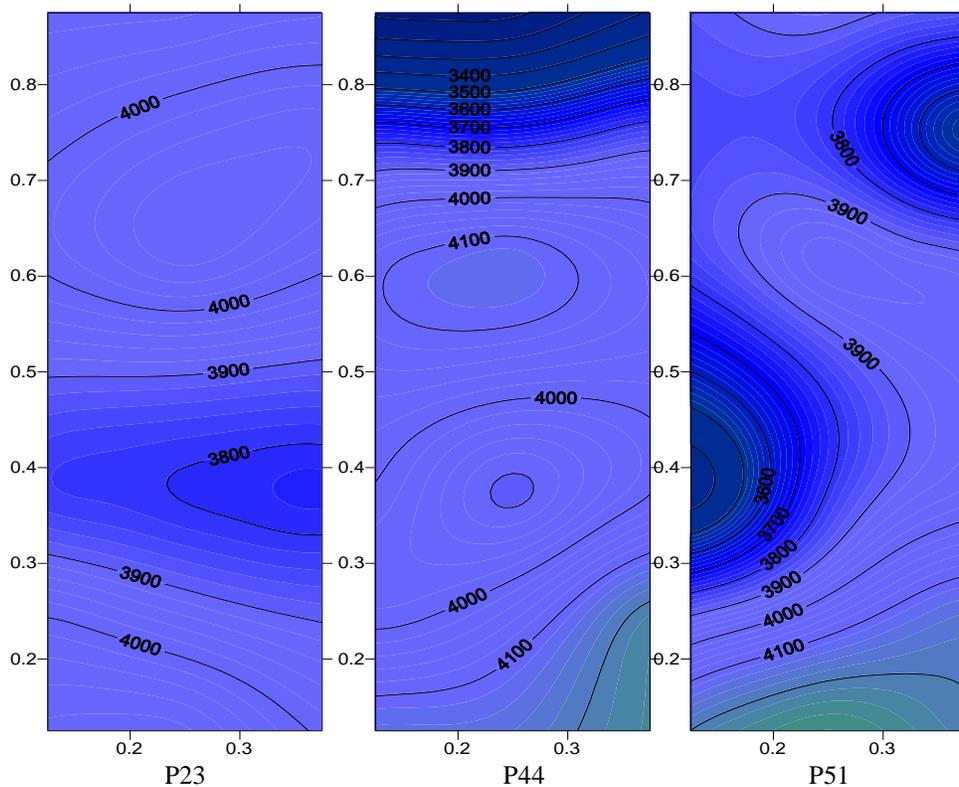


Figura 6. Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de propagação do pulso ultrasônico para alguns dos pilares sob análise.

Em todos os pilares se observam algumas zonas, distribuídas de forma aleatória, onde a velocidade cai, evidenciando a existência de pequenos defeitos ou variações na compacidade do material, típicas de estruturas confeccionadas com um material heterogêneo como o concreto.

Em termos gerais, a maioria dos pilares podem ser considerada como sendo equivalentes, em termos de leituras ultra-sônicas, destacando-se positivamente os pilares P32 (referência) e P23 (sob análise), e negativamente o pilar P44 (sob análise).

O desconhecimento da real situação em que se encontra uma estrutura é um fator complicador nas intervenções em estruturas deterioradas ou sob suspeita. A falta de informação, numa situação de caráter emergencial, pode fazer com que se tomem decisões conservadoras, aumentando o escopo e complexidade das intervenções previstas, aumentando custos ou gerando transtornos adicionais para seus usuários. O uso de ensaios tipo NDT pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção, como demonstrado no estudo de caso descrito no presente trabalho.

A investigação de um conjunto de pilares no qual haviam suspeitas em relação à resistência do concreto evidenciou claramente a potencialidade de ensaios tipo UPV para checagem das condições de estrutura de concreto. Já os dados de esclerometria se mostraram muito sensíveis às condições de superfície do elemento, sugerindo que se deva ter cautela ao empregar dados de dureza superficial como indicativos da resistência de elementos de concreto.

Considerando os resultados obtidos, foi possível concluir que os concretos de todos os pilares analisados apresentavam características similares. Ou seja, os ensaios indicaram que o concreto dos pilares sob análise não se diferenciava substancialmente do concreto dos pilares de controle. Dadas estas observações, recomendou-se que os pilares examinados fossem considerados aceitáveis, desde que a equalização do f_{cj} com o f_{ck} especificado de 30 MPa fosse aceita pelos projetistas e que fossem tomadas providências para que o f_{cj} se eleve, de forma a permitir que o f_{ck} estimado nas próximas amostras supere os 30 MPa.

3.2. Estudo de Caso 2

Este estudo de caso demonstra uma aplicação de dois END no *deck* de uma ponte de concreto com suspeita de conter vazios, numa das vias principais da cidade de Porto Alegre. A estrutura era formada por vigas pré-moldadas, consolidadas in loco pela concretagem da laje superior de suporte ao pavimento.

Os ensaios foram realizados para determinar a possibilidade de existência de falhas de concretagem ou vazios que comprometessem seu adequado funcionamento, devido ao uso de um caminhão com concreto que estava com trabalhabilidade reduzida devido ao atraso na concretagem. A presença dessas falhas na zona de ligação dos elementos pré-moldados com a laje molada in loco poderia acarretar sérios problemas de desempenho estrutural.

O ensaio de VPU foi escolhido porque o mesmo permite detectar mudanças de compacidade no interior do concreto. Adicionalmente, se bastante informação for conhecida sobre o traço de concreto, é possível estimar se a resistência à compressão do material se encontra na faixa especificada. Além disso, nesse caso, se empregou um radar (GPR). Como já referido, essa é uma técnica END bastante poderosa, pois permite uma avaliação mais profunda do interior do material, por meio de pulsos eletromagnéticos que são refletidos ou difratados quando encontram descontinuidades ou vazios. Essencialmente, o método se baseia na existência de constantes dielétricas diferentes entre materiais distintos, como o concreto, o aço e o ar.

Foram realizados ensaios em linhas localizadas sobre as vigas pré-moldadas da ponte, com o objetivo de mapear o concreto nessas regiões e determinar se existiam falhas ou vazios com dimensão suficiente para comprometer o funcionamento adequado da estrutura.

No caso do UPV, para caracterizar a condição da estrutura, uma bateria de medidas semi-diretas foi executada usando uma grade de leituras com 50 cm de largura, que foi criada sobre a estrutura da laje, como visto na figura 4, o que resultou numa grade com 325 pontos. Após a definição da grade de células foram executadas leituras entre um ponto de emissão e os 8 pontos localizados no seu entorno. Os pontos de emissão foram determinados de tal forma que as células de ensaio se sobrepusessem em suas extremidades, garantindo uma análise de toda a estrutura.

No caso do radar foram efetuadas leituras lineares, deslocando o equipamento sobre o eixo das vigas, com emissão de pulsos a cada 1 cm. Foi utilizada no exame uma antena de 1.000 MHz, o que permitiu o reconhecimento de objetos pequenos (barras de aço), mas limitou a penetração a 40 cm, valor suficiente dada a espessura da laje. É interessante destacar que este foi o primeiro ensaio de radar executado no Rio Grande do Sul com esta finalidade. É interessante destacar que este foi o primeiro ensaio de GPR executado no Rio Grande do Sul, e um dos primeiros no Brasil, com esta finalidade.

Verifica-se, através da análise dos resultados obtidos no ensaio qualitativo do concreto via ultrasonografia, que as leituras obtidas indicam a existência de zonas de concreto com características distintas na estrutura examinada. Em alguns trechos foram registradas velocidades de propagação de onda mais elevadas do que em outros, num intervalo que variou de 2000 a 4000 m/s. Observou-se uma certa correspondência entre estas zonas e o esquema de concretagem utilizado, com zonas mais propensas a vazios e falhas de concretagem devido à densidade elevada da ferragem.

Os desvios de compactação existentes, embora indesejáveis sob o ponto de vista técnico, são aceitáveis e comuns em obras desta natureza. Sua intensidade, no presente caso, não justifica a presunção de que os mesmos possam comprometer o desempenho da estrutura como um todo.

A figura 7 mostra as mudanças no sinal do GPR entre duas zonas com concreto com diferente compactação. Esta diferença é resultado de fenômenos distintos na propagação da onda. Quando o concreto for mais compacto, menos heterogeneidade é introduzida na propagação da onda. Quando o material muda, o perfil se altera, isto explica o formato dos radargramas da figura 8(a).

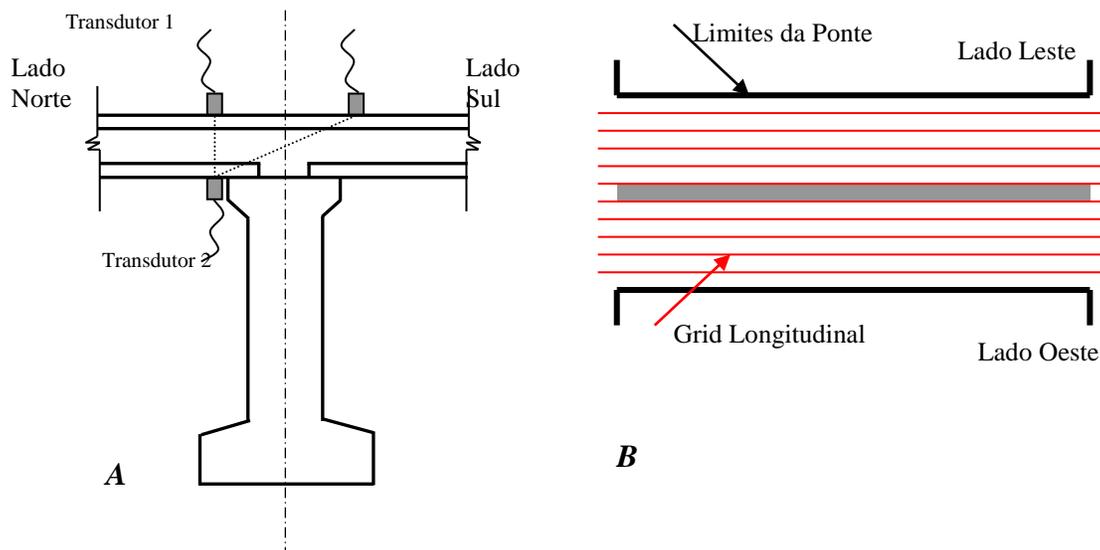


Figura 7. Disposição dos END executados no deck da ponte: a) Posição do equipamento para a segunda bateria de UPV. b) Posicionamento do GPR sobre o deck da ponte.

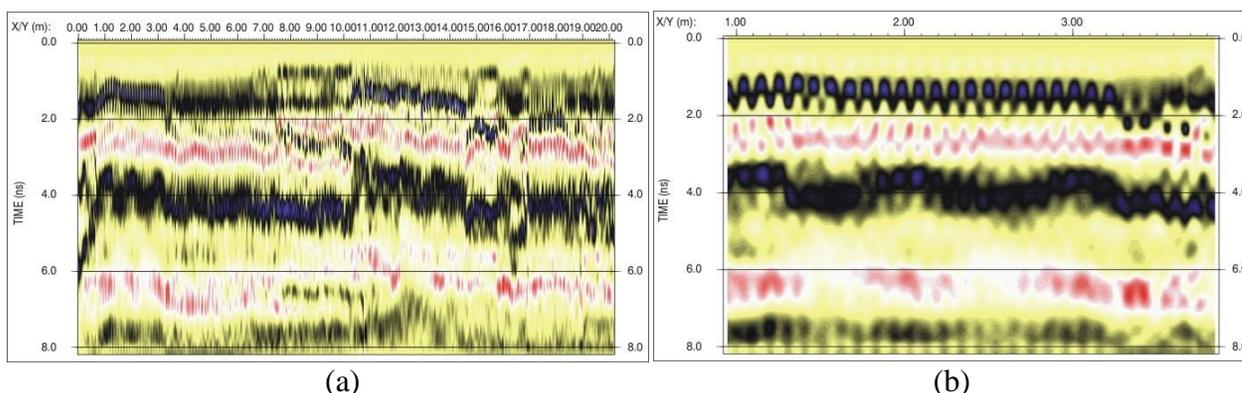


Figura 8. Perfis de GPR: a) Vista geral de um dos perfis de GPR ilustrando as diferenças na compacidade do concreto. b) Vista de um perfil mostrando a ferragem da ponte.

Constatou-se que era possível distinguir objetos com diâmetros mais baixos do que a definição prevista para a antena de 1000 megahertz. Em uma análise global as medidas de VPU feitas utilizando a grade inteira identificam as regiões com suspeitas onde os problemas da integridade puderam existir. Os resultados de GPR confirmaram, em geral, os resultados obtidos no exame de VPU, mas permitiram um diagnóstico mais preciso.

Concluiu-se, analisando os resultados de ultra-sonografia em conjunto com os resultados do radar, que a probabilidade de existência de vazios de grande porte, que comprometessem a capacidade estrutural do tabuleiro, era muito pequena. Recomendou-se, portanto, que a obra fosse considerada adequada para os fins propostos. Para averiguar a eficácia desse diagnóstico decidiu-se efetuar extrações de amostras em uma das raras zonas em que haveria possibilidade de existência de pequenos vazios. Examinando os corpos extraídos verificou-se que os vazios detectados eram de fato de pequena dimensão, como mostrado na figura 9. Dessa forma confirmou-se a decisão de que não seria necessário intervir para reparar os elementos da ponte.



Figura 9. Detalhe dos vazios observados no corpo de prova extraído.

A análise conjunta com VPU e do GPR provêm informações sobre o concreto, indicando a posição de falhas e de vazios, com uma estimativa de seu tamanho. Os graus de compacidade que foram encontrados, mesmo indesejáveis sob um ponto de vista técnico, são aceitáveis e comuns

na manufatura do concreto. Entretanto, os testes provaram, com um grau de confiança razoável, que a probabilidade da existência de falhas principais era quase nenhuma, evitando a necessidade de demolir uma parte da estrutura. A aplicação aqui descrita, pioneira no Rio Grande do Sul, devido ao uso de GPR evidência o potencial de utilizar medidas de radar conjuntamente com medidas de UPV, para o diagnóstico estrutural. Uma pesquisa adicional se faz necessária para compreender como alguns fatores afetam as medidas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Impulsionadas pela necessidade de se obter estruturas de concreto com alto padrão de qualidade e durabilidade, as pesquisas referentes aos ENDS têm buscado entender as capacidades e limitações de ensaio. O uso de END pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção, como demonstrado nos estudos de caso descrito no presente artigo.

O desconhecimento da real situação em que se encontra uma estrutura é um fator complicador nas intervenções em estruturas deterioradas ou sob suspeita. A falta de informação, numa situação de caráter emergencial, pode fazer com que se tomem decisões conservadoras, aumentando o escopo e complexidade das intervenções previstas, aumentando custos ou gerando transtornos adicionais para seus usuários. O uso de ensaios tipo END pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção.

De forma geral, os estudos de caso reforçam a idéia de que a utilização de END são ferramentas úteis para a análise de estruturas, visto que os dados obtidos permitem verificar, por exemplo, a presença de corpos estranhos e vazios na viga de teste. Confirma-se assim a idéia de que os mesmos têm grande potencial de utilização nos casos de inspeção de estruturas. Seu emprego permite obter indicações importantes para a caracterização do concreto, bem como dados sobre a homogeneidade e a qualidade da estrutura.

Pode-se concluir que, mediante a execução de END é possível contribuir com o controle da deterioração e qualidade das estruturas de concreto. O uso de ensaios tipo END pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção, como demonstrado nos estudos de caso descrito no presente artigo.

5. REFERÊNCIAS

American Concrete Institute (2007), *ACI 228.1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, in: MCP 2007 – ACI Manual of Concrete Practice, ACI Committee 228, Detroit, USA, p. 44.

Andrade T. (2005), *Tópicos sobre Durabilidade do Concreto*, in: G. C. Isaia (Editor), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, São Paulo, Brasil: IBRACON, cap.25, vol.1, pp.753-792.

Annual Book of ASTM Standards (1995), *ASTM E 114-95, Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method*, Vol. 03.03 Nondestructive Testing, West Conshohocken, USA: ASTM, 920 pp. 12-15.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995), *NBR 7584: Concreto Endurecido – Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão: Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, Brasil.

Beutel R., Reinhardt H., Grosse C. U., Glaubitt A., Krause M., Maierhofer C., Algernon D., Wigggenhauser H., Schickert M. (2006), *Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods*, in: European NDT Conference, 9: Disponível em: <http://www.ndt.net>, Berlin Germany.

Cho Y. S. (2003), *Non-destructive Testing of High Strength Concrete using Spectral Analysis of Surface Waves*, NDT&E International 36, pp. 229-235.

- Figueiredo E. P. (2005), *Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações*, in *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, São Paulo, Brasil: IBRACON, Editor: G. C. Isaia, cap.33, vol.2, pp.985-1015.
- International Atomic Energy Agency (2002), IAEA-TCS-17: *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*, Viena, Austria, p. 231.
- Isaia G. C. (2002), *Sustentabilidade do Concreto ou das Estruturas de Concreto? Uma Questão de Durabilidade*, in *Congresso Brasileiro do Concreto*, 44, arquivo V024, São Paulo: SP, Brasil
- Isaia G. C. (2005), *O Concreto: da Era Clássica à Contemporânea*, in *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, São Paulo, Brasil: IBRACON, Editor: G. C. Isaia, cap.1, vol.1, pp.1-44.
- Maierhofer C., et al. (2003), *Non-destructive characterization of mortar layers for concrete repair using radar and ultrasonics*, in: *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Frankfurt, Alemanha.
- Malhotra V. M., Carino N. J. (1991), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, p. 343.