Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

L. A. REGINATTO
Pesq. Eng.° Civil
LEME/UFRGS
Porto Alegre; Brasil
lukas0910@gmail.com

A. LORENZI
Pesq. Eng.° Civil
LEME/UFRGS
Porto Alegre; Brasil
alexandre.lorenzi@ufrgs.br

R. B. FÁVERO
Pesq. Eng.° Civil
LEME/UFRGS
Porto Alegre; Brasil
favero_rafael@yahoo.com.br

L. C. P. SILVA FILHO
Prof. Eng.° Civil
LEME/UFRGS
Porto Alegre; Brasil
lcarlos66@gmail.com

RESUMO

Muitas estruturas de concreto necessitam ferramentas para proceder a um monitoramento contínuo de suas condições, buscando-se o aumento de sua vida útil. 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. Neste escopo, os ensaios ultrassônicos se tornam uma estratégia de investigação bastante atraente e viável. Diferentes métodos de ensaios ultrassônicos foram desenvolvidos para analisar as estruturas de concreto. Através dos mesmos pode-se contribuir com sucesso no controle da deterioração e qualidade das mesmas. O presente artigo evidencia como a aplicação de ensaios de pulso ultrassônico e tomografia ultrassônica são uteis para uma correta análise de estruturas de concreto. Os estudos de casos apresentados foram desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa LEME-UFRGS.

Palavras Chave: Estruturas de Concreto, Ensaio Ultrassônico

ABSTRACT

Many concrete structures need tools to carry out continuous monitoring of state condition. Constant monitoring of structures is a necessary procedure, since the preventive detection of problems allows the use of simpler and cost-effective methods for evaluation and repair. Ultrasonic tests is a research strategy attractive and viable. Different methods of ultrasonic tests have been develop to analyze the concrete structures. The use these methods can contribute to increase the success in controlling deterioration and quality of concrete structures. This paper shows how the application of ultrasonic pulse testing and ultrasonic tomography are useful tools to proceeds a correct analysis of concrete structures. The case studies presented in this paper were developed by the Research Group LEME-UFRGS.
Keywords: Concrete Structures, Ultrasonic Tests.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a aplicação de Ensaios Não Destrutivos (END) se constitui em uma alternativa interessante para monitorar o estado das mesmas, como a relação que têm com a resistência à compressão que ainda é a propriedade de controle mais utilizada como indicativo da qualidade e homogeneidade do concreto. Dentro deste cenário, nota-se também uma crescente utilização desta técnica no monitoramento e inspeção de estruturas de concreto armado, principalmente pelos bons resultados que vêm apresentando tanto *in situ* como em laboratório.
As propriedades do concreto podem variar consideravelmente, dependendo de uma série de fatores, tais como: da natureza e proporções dos constituintes, dos métodos de construção e das condições de carregamento e do meio

ambiente. Em virtude deste contexto se torna essencial o desenvolvimento de métodos para determinar a qualidade dos elementos de concreto [1].

A utilização dos END é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. A maioria destes métodos permite a detecção de anomalias sem ocasionar danos ao material, e, a partir da sua utilização, consegue-se proceder a inspeção de uma estrutura afetada sem interrupção de serviço, propiciando uma economia em termos de tempo e de custos [2].

Nos dias atuais, diversos 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 [3].

A durabilidade das estruturas de concreto é uma questão fundamental na engenharia civil, uma vez que as estruturas de concreto estão sujeitas a ataques agressivos que podem diminuir a sua durabilidade e consequentemente a sua vida útil.

Medições precisas da durabilidade de estruturas são tarefas difíceis, assim como a interpretação dos dados referentes à estas análises. Apesar disto, a avaliação através de END de materiais cimentícios é uma área fundamental da investigação de problemas, pois permite a obtenção de informações sobre a qualidade e o estado de degradação dos materiais de construção [4].

Determinar as condições do concreto é um ponto fundamental quando se quer reavaliar estruturas existentes, de forma a mensurar alguma perda de desempenho ou diminuição do nível de segurança. A deterioração progressiva induz a custos de manutenção importantes. As utilizações dos END podem atender a vários propósitos [5]:

- Para a detecção de um defeito ou uma variação de propriedades;
- Para proceder a classificação a respeito de uma determinada propriedade, entre as várias áreas em uma estrutura ou entre várias estruturas;
- Para quantificar essas propriedades, comparando-as aos limites permitidos.

Recentemente, as aplicações de END para garantia da qualidade de estruturas de concreto tem obtido consideráveis progressos. Impulsionado pelo avanço tecnológico, e pela transferência de conhecimento, de outras áreas de testes de materiais e da medicina, métodos de investigação cada vez mais versáteis tem surgido com frequência, aumentando o potencial destas técnicas para investigação de estruturas de concreto [6].

O presente trabalho apresenta o resultado de estudos de caso que buscaram avaliar a utilização da tomografia ultrassônica e do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) para detectar defeitos internos em uma série de estruturas de concreto armado. O objetivo do estudo foi determinar se existiam falhas ou vazios nas estruturas que comprometessem o adequado funcionamento da estrutura. De forma a atingir esta finalidade, foram utilizados um tomógrafo 3D e um equipamento convencional de ensaio ultrassônico. A Figura 1 ilustra os dois equipamentos utilizados neste estudo.



Figura 1: (a) Tomógrafo 3D e (b) Equipamento de VPU.

2. ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

Dentre os métodos de END disponíveis, o ensaio ultrassônico merece destaque, pois possibilita o exame da homogeneidade do material, facilitando o diagnóstico de defeitos e o controle das condições de conservação de estruturas durante a sua vida útil. O mesmo pode ser particularmente importante no controle tecnológico do concreto, no laboratório ou em obra.

Os ensaios são relativamente fáceis de serem conduzidos, entretanto o mais importante é saber interpretar os resultados. Este ensaio tem por finalidade medir o tempo de duração que um pulso ultrassônico leva para atravessar inteiramente uma seção de concreto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Em artigo publicado em 1963, Jones já afirmava que o principal objetivo do ensaio ultrassônico no concreto, era avaliar a qualidade do mesmo a partir de medições da velocidade do pulso ultrassônico. Segundo o mesmo autor, o desenvolvimento do método começou no Canadá e na Inglaterra, quase ao mesmo tempo, entre as décadas de 40 e 60. A partir dos anos 60, com o surgimento de um equipamento portátil, equipado com bateria, o método deixou de ser usado somente em laboratórios e, aos poucos, foi chegando às construções.

2.1 Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico (VPU)

O método de VPU é baseado na determinação longitudinal das características de propagação de um pulso ultrassônico através de um material, e é o método de ultrassom mais comumente utilizado na avaliação de estruturas de concreto. Este método é bastante utilizado para avaliação do concreto devido à sua eficácia, simplicidade de aplicação e baixo custo.
O princípio do ensaio está baseado no fato de que os sons produzidos em um ambiente qualquer são refletidos ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este, apesar de simples e frequentes, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais.
O ensaio de VPU é caracterizado como um método de END que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais. A VPU em um material sólido irá depender, entre outras coisas, da massa específica e das propriedades elásticas desse material.
Através do ensaio de VPU é possível demonstrar teoricamente que diferenças nos resultados obtidos são proporcionais à estrutura de poros e microfissuras do concreto [7]. Por ser rápido e não destrutivo, o VPU oferece a oportunidade de se estabelecer 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 determinação da VPU especificada em todas as normas relativas a este ensaio, tanto nacionais como internacionais, é baseada no mesmo princípio, descrito acima, o qual é comumente expresso de diferentes maneiras entre as várias normas relativas ao assunto [8].
A norma brasileira NBR 8802 [9] prescreve que o mesmo seja empregado com o objetivo de checar a uniformidade do concreto, detectar eventuais falhas internas de concretagem, monitorar as características do concreto ao longo da vida útil, avaliar a profundidade de fissuras ou outras imperfeições, avaliar o módulo de deformação e, inclusive, estimar a resistência à compressão do concreto.
A norma britânica BSI-1881: Part 203 [10] considera que as principais aplicações deste método são:

a) determinação da uniformidade do concreto;
b) determinação da existência de fissuras;
c) estimativa da resistência à compressão do concreto, utilizando para tal curvas de correlação apropriadas;
d) monitoramento da evolução da resistência;
e) avaliação da deterioração do concreto.

Pode-se, todavia, utilizar o VPU para fins específicos, tais como controlar o tempo de desfôrma, avaliar a presença de falhas de concretagem ou detectar danos causados pelo fogo. A facilidade de manuseio e o custo relativamente baixo do equipamento têm estimulado diversos pesquisadores a buscar novas formas e fins para o uso dos ensaios de VPU [11].
Um fator importante é que o VPU, por ser uma técnica não destrutiva, permite a execução de vários ensaios no mesmo local, visando acompanhar adequadamente as variações associadas com o tempo. Com o aumento das ocorrências de deterioração precoce das estruturas de concreto, torna-se interessante realizar este tipo de monitoramento contínuo das condições das edificações. Através de um constante monitoramento das estruturas podem-se antecipar demandas de manutenção e colaborar para elevar a vida útil das mesmas.

2.2 Ensaio de Tomografia Ultrassônica

A tomografia ultrassônica é um método não destrutivo que possibilita diagnósticos do concreto que podem ser utilizados para melhorar o controle de qualidade do mesmo e auxiliar na tomada de decisão de serviços de reparo ou reabilitação das estruturas de concreto. Contudo, a detecção de falhas através da tomografia requer um esforço significativo e experiência do usuário [12].
O tomógrafo utiliza ondas de cisalhamento e é um sistema capaz de gerar imagens 3D tomográficas de elementos de concreto, o que possibilita a detecção de falhas em estruturas desse material. O sistema é constituído de um console com 40 transdutores em uma matriz de 10 linhas, contendo quatro transdutores cada. Os transdutores são sensores piezoelétricos com uma frequência que pode ser controlada, variando de 25 a 80 kHz. Esses transdutores são retráteis e de ponto de contato seco.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Através da utilização do tomografia é possível proceder a um controle de qualidade das estruturas de concreto armado com a finalidade de determinar a sua integridade e a presença de defeitos na estrutura, tais como: fissuras, heterogeneidades, falhas de concretagem, entre outros. Também é possível medir a espessura do objeto que está sendo examinado.
A utilização de transdutores de ponto de contato seco permite que, mesmo com frequências de transmissão relativamente baixas (55 kHz), as ondas geradas pelo equipamento possam penetrar maiores profundidades [13].

3. APLICAÇÃO PRÁTICA

A aplicação prática da tomografia ultrassônica foi realizada em quatro estudos de caso distintos realizados pela equipe do LEME/UFRGS. O primeiro caso consistiu na aplicação da tomografia em um deck de ponte. O segundo caso mostra a aplicação da técnica em uma laje constituída por elementos alveolares pré-fabricados. O terceiro e quarto casos ilustram a aplicação da VPU em estruturas de concreto armado com o objetivo de detectar diferencas na homogeneidade do concreto.

3.1 Estudo de Caso 1

Neste estudo utilizou-se a técnica de Tomografia Ultrassônica. O mesmo foi realizado para avaliar um tabuleiro da ponte localizada no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para este propósito, foram determinadas uma série de regiões na ponte, a partir de uma Inspeção Visual. A Figura 2 ilustra a realização dos ensaios na ponte.

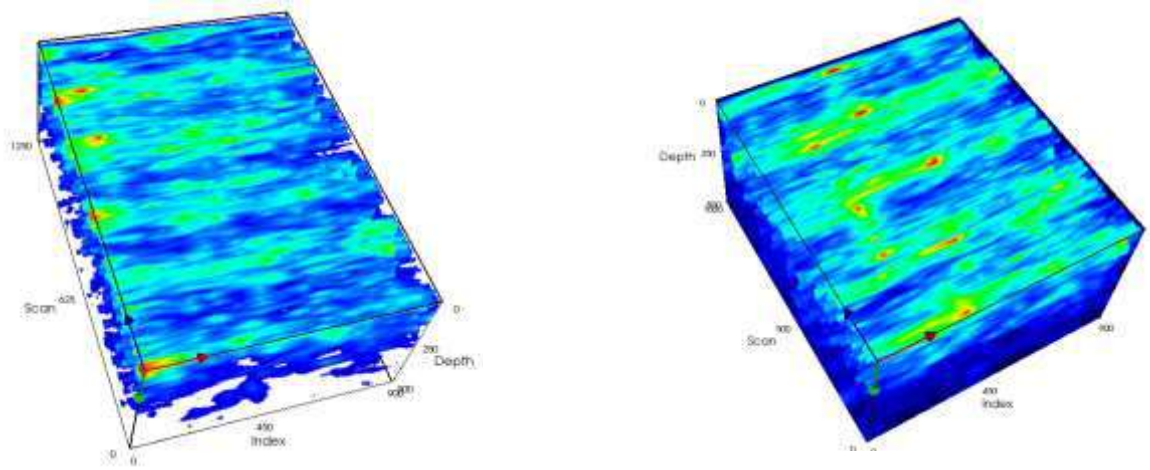


(a) (b)

Figura 2: (a) e (b) Avaliação do tabuleiro da ponte através da Tomografia Ultrassônica.

Através da tomografia ultrassônica foi possível detectar defeitos internos na ponte. Para estes ensaios realizados neste estudo de caso foi utilizado um grid de leitura de 10 x 25 cm com uma frequência de 50kHz e uma velocidade de pulso de 3050 m/s.
Após a aquisição dos dados em todas as linhas de varredura, os resultados foram inseridos no software gerando uma imagem 3D das interfaces de elementos refletidos. Com as imagens geradas pelo software é possível visualizar as diferentes interfaces presentes no tabuleiro da ponte.
A Figura 3 mostra os resultados dos ensaios realizados. Em todas as imagens, é possível ver diferenças na homogeneidade do concreto do tabuleiro da ponte. Todas as figuras apresentam o mesmo padrão de imagens. A cor azul representa a homogeneidade no elemento estrutural de concreto, não apresentando falhas ou defeitos na leitura. No entanto, como pode ser visto nas imagens, as regiões superficiais são representados com pequenos defeitos de superfície (indicados pelos círculos vermelhos). Este fato ocorre devido à interrupção do impulso de ultrassons, que representa regiões com falhas.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

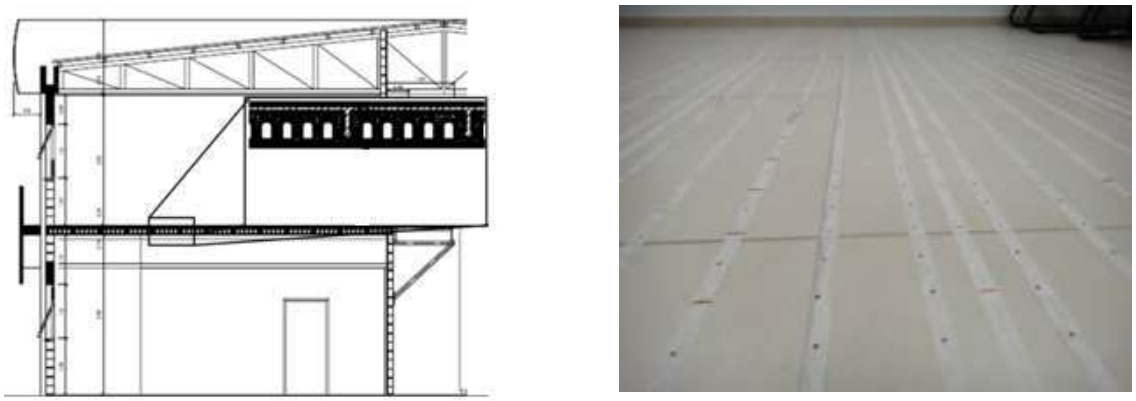


(a) (b)

Figura 3: (a) e (b) Avaliação do tabuleiro da ponte através da Tomografia Ultrassônica.

3.2 Estudo de Caso 2

Este estudo de caso baseia-se na aplicação da tomografia MIRA para detectar a localização dos alvéolos de lajes pré-fabricadas utilizadas na estrutura de um edifício. A Figura 4(a) apresenta um corte esquemático das lajes analisadas e a Figura 4(b) demonstra o local e o posicionamento do *grid* onde foi realizada a leitura. Neste este estudo de caso foi utilizada uma frequência de 70 kHz e velocidade de pulso de 3040 m/s.



(a) (b)

Figura 4 – (a) corte esquemático das lajes e (b) demarcação do *grid* de leitura no piso.

Neste estudo, o objetivo foi analisar os níveis de detalhes captados pela tomografia 3D através da variação do *grid* utilizado. Dessa forma, foi utilizado um *grid* mais refinado, de 5 x 10 cm, que permite grande sobreposição de leituras para a interpolação dos dados. De forma complementar, também foram efetuadas leituras com um *grid* maior do que o recomendado.

A Figura 5 apresenta a vista superior da tomografia da laje obtida com o *grid* de 5 x 10 cm, onde se pode observar nitidamente a localização dos alvéolos.

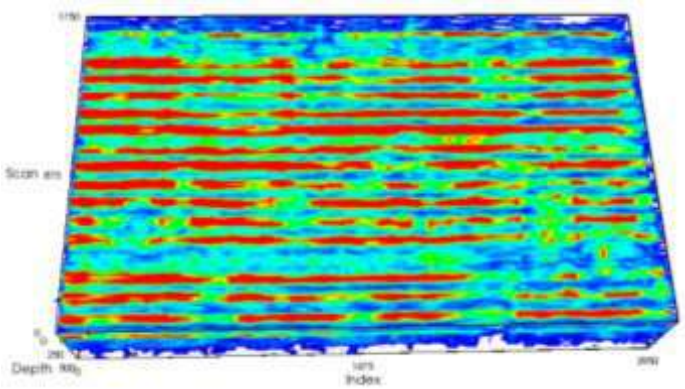


Figura 5 – Resultados da tomografia ultrassônica com *grid* de 5x10 cm.

Na Figura 6 observa-se um corte transversal da laje. A imagem permite observar os alvéolos, seu espaçamento, formas e distância até a parte superior.

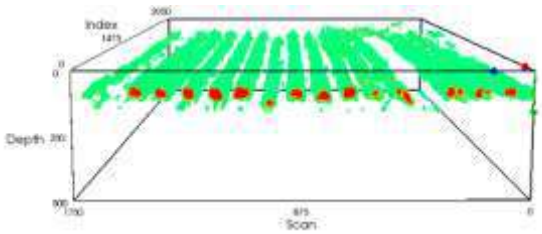


Figura 6 – Identificação dos alvéolos em corte, utilizando o *grid* de 5 x 10 cm.

3.3 Estudo de Caso 3

O presente estudo de caso apresenta os resultados dos ensaios de VPU realizados em uma série de elementos de concreto. As estruturas examinadas fazem parte de um conjunto de elementos estruturais nos quais o controle tecnológico, realizado através de corpos de prova moldados de concreto in loco, indicou que não foi atingida a resistência de projeto especificada. Este indicativo levantou dúvidas sobre a efetiva condição, em termos de resistência, dos referidos elementos, o que conduziu à realização do presente estudo.
O objetivo principal foi para mapear a homogeneidade do concreto dos elementos de interesse, coletando dados que permitissem avaliar comparativamente as características dos mesmos com a de outros elementos onde os corpos de prova de controle haviam produzido resultados satisfatórios.
As Figuras 7 e 8 apresentam as imagens geradas com as leituras de VPU de blocos de fundação. As velocidades registradas variaram entre 2400 e 2800 m/s. Em geral o concreto apresenta uma qualidade regular, com registros de zonas mais compactas na parte inferior e zonas menos compactas na parte superior dos blocos, como esperado.
As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através da utilização de um software de geração de curvas de nível, facilitando a visualização das variações na homogeneidade, compacidade e integridade de cada elemento.

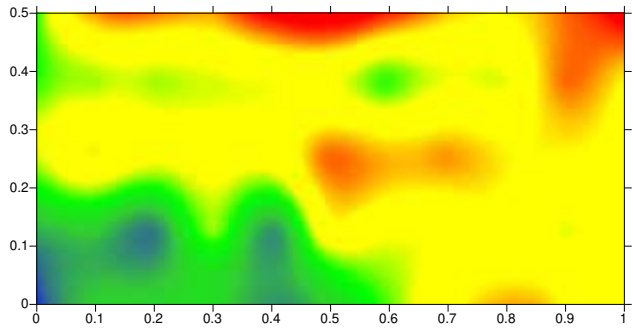


Figura 7 – Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

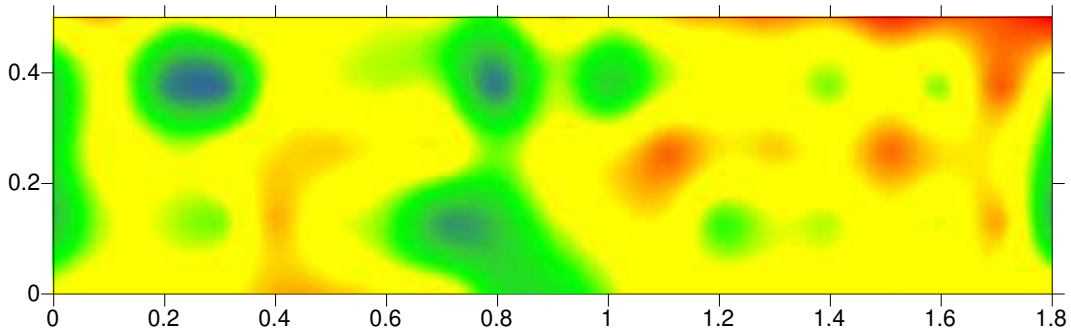


Figura 8 – Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.

3.4 Estudo de Caso 4

O presente estudo de caso tem por objetivo analisar a homogeneidade do concreto empregado em uma estrutura da utilização dos resultados dos ensaios de VPU realizados em elementos de concreto. As estruturas examinadas fazem parte de um conjunto de elementos estruturais nos quais o controle tecnológico apresentou indicativos de danos pontuais na estrutura.

O objetivo principal deste estudo consistiu em verificar a homogeneidade do concreto através do mapeamento da distribuição da VPU ao longo das faces da estrutura analisada, de forma a identificar as zonas de baixa velocidade, nas quais é provável a existência de vazios e falhas de concretagem decorrentes de problemas de trabalhabilidade e/ou de adensamento do concreto.

Analisando-se graficamente os resultados obtidos a partir das leituras de VPU pode-se observar o mapeamento das velocidades nos dois lados da estrutura A. Através da analise dos resultados obtidos, constatou-se que a condição geral da estrutura é boa, sendo registradas poucas regiões com valores de VPU menores que 2500 m/s. Todavia observam-se regiões na estrutura na qual são observados valores baixos de VPU. Estes valores indicam regiões que necessitam ser reparadas. A Figura 9 mostra a distribuição de velocidades nas duas faces da estrutura de concreto analisada.

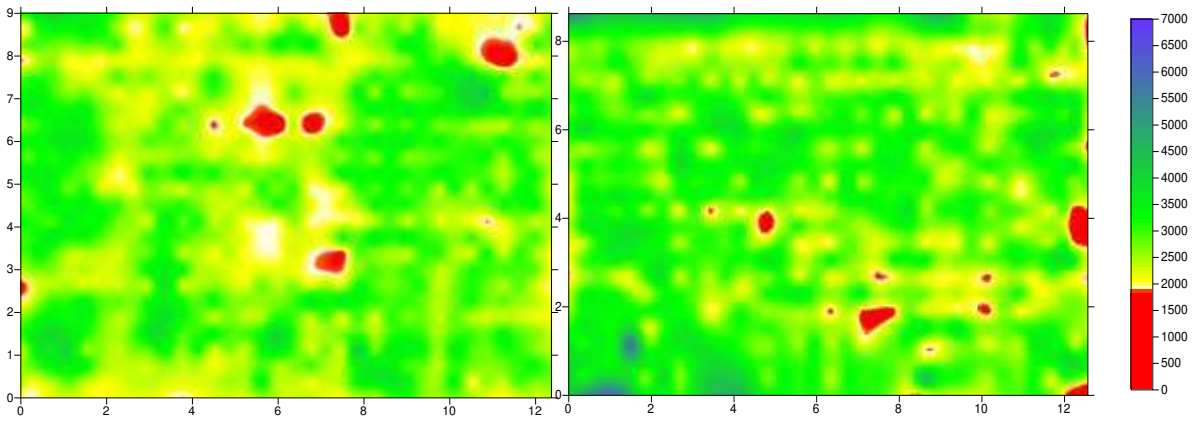


Figura 9 – Mapeamento da VPU na estrutura A.

4. CONCLUSÕES

Muitos esforços estão se fazendo nas pesquisas em relação aos END, devido a necessidade de obter-se 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.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

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 auxilia na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção das estruturas.

O presente artigo ilustra a aplicação de ensaios de VPU e tomografia ultrassônica para avaliar o estado de conservação, detectar a existência de vazios e demais elementos presentes em estruturas de concreto. Os ensaios de VPU já se mostraram comprovadamente úteis para analisar diferenças de homogeneidade e para detectar padrões de microfissuração em estruturas de concreto deterioradas. Ja a tomografia ultrassônica começa a ganhar importância nesse meio, e sua aplicação é uma técnica muito promissora dentro da área de END. Trata-se de uma ferramenta ideal para criar uma representação tridimensional de defeitos internos que podem estar presentes em um elemento em particular e possibilita uma análise bastante completa das imagens geradas, vindo a ser bastante útil na avaliação de elementos delicados.

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.

5. REFERÊNCIAS

[1] Lorenzi, A., Campagnolo, J. L., Silva Filho, L. C. P., "Application of artificial neural network for interpreting ultrasonic readings of concrete", *Int. J. Materials and Product Technology*, 2006, 26, 57-70.

[2] Grabowski, S. L.; Padaratz, I. J.; Pinto, R. C. A., "Avaliação de Placas de Concreto com o Método Não Destrutivo do Eco-impacto", 50° Congressso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008. 12p.

[3] Shah, S., Popovics, J. S., Subramaniam, K. V., "New Directions in Concrete Health Monitoring Technology", *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(7), 754-760.

[4] Molero Armenta, M. A. *et al*, "Ultrasonic characterization of cementitious materials using frequency–dependent velocity and attenuation", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, 2009. 6p.

[5] Breysse, D., *et al*, "How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT measurements", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, 2009. 6p.

[6] Wiggenhauser, H., "Advanced NDT Methods for Quality Assurance of Concrete Structures", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, 2009. 6p.

[7] Ercolani, G. D.; Ortega, N. F.; Señas, L., "Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría em el diagnóstico de Estructuras de Hormigón Afectadas por Elevadas Temperaturas", Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007, 10p.

[8] Komlos, K.; Popovics, S.; Nürnbergerová, T.; Babál, B.; Popovics, J. S., "Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards", *Cement and Concrete Composites*, 1996, n.º18, pp.357-364.

[9] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 1994b.

[10] British Standards Institution, BSI 1881 - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London: 1986. 20 p.

[11] Lorenzi, A., "Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico", Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[12] Hoegh, K.; Khazanovich, L., "Correlation Analysis of 2D Tomographic Images for Flaw Detection in Pavements", *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, 2012, n.º 40, pp. 247-255.

[13] Nesvijsky, E. G., "On the Problem of Application of the Conic and Exponential Wave Guiding Extensions for Ultrasonic Transducers for Materials Testing", *NASTA Technical Bulletin*, 1997, n.º 3, pp. 49-56.