Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO

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

L. S. LORENZI
Prof. Eng.° Civil
NORIE/UFRGS
Porto Alegre; Brasil
luciani.lorenzi@gmail.br

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

RESUMO

O monitoramento das estruturas de concreto 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 ensaios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) torna-se uma estratégia de investigação bastante atraente e viável. Devido a sua facilidade de aplicação esse método é muito útil na investigação do estado de conservação das estruturas de concreto. Através dos mesmos pode-se contribuir com sucesso no controle da deterioração e qualidade das mesmas. O presente artigo evidencia como podem ser empregados os ensaios de VPU aplicados no controle de pilares de concreto e mostra estudos de casos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa LEME-UFRGS a respeito da aplicação dos mesmos.
Palavras Chave: Concreto, Ensaio Ultrassônico, Controle de Qualidade.

ABSTRACT

Concrete structures monitoring is an essential procedure. This procedure allows detecting pathological problems and using simpler and economical methods for evaluation and repairing. The ultrasonic pulse velocity (UPV) method becomes a very attractive and viable strategy. This method is very useful in the concrete structures condition investigation. The method can contribute to success at quality controlling of concrete structures. This paper shows how we can use the UPV tests to control of concrete columns and shows cases studies developed by the Research Group LEME-UFRGS about application.
Keywords: Concrete, Ultrasonic Tests, Quality Control.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao fato de que o concreto é o material mais utilizado na construção civil justifica-se a realização de estudos sobre os fatores que podem afetar suas propriedades e sobre as formas de medir as mesmas [1]. A resistência à compressão é a propriedade de controle mais empregada para analisar a qualidade deste material. Se um concreto não é suficientemente resistente, pode não suportar as cargas de projeto ou a ação dos agentes ambientais, resultando em danos que podem ser caros de corrigir, numa vida de serviço encurtada ou, em casos extremos, no desmoronamento da estrutura edificada, o que pode colocar em risco seus usuários [2].

Contudo o desempenho das estruturas de concreto está relacionado a inúmeras variáveis decorrentes de sua confecção como a relação água-cimento, o tipo e tamanho do agregado, o teor de umidade, a técnica de moldagem, o tamanho das amostras e o tipo de cimento, que afetam diretamente a resistência à compressão, o que dificulta a identificação de suas propriedades.

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 Ensaios Não Destrutivos (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.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Nesta direção, o método de ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) tem sido cada vez mais utilizado em operações de vistoria e monitoramento de estruturas de concreto, pois o mesmo permite que se meçam e controlem uma série de parâmetros fundamentais para determinar a qualidade do concreto, tanto no laboratório quanto em ensaios de campo. A interpretação dos resultados deste tipo de ensaio, entretanto, necessita ser feita de forma criteriosa e demanda um conhecimento específico dos fatores influentes sobre as leituras.

A aplicação do ensaio de VPU pode-se constituir uma estratégia interessante para monitorar o estado de conservação das estruturas de concreto. Para esta finalidade deve-se levar em consideração que 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 o ensaio de VPU para avaliar a mesma, 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, resultando em danos mal corrigidos podem acarretar numa redução da vida de serviço da estrutura. O presente artigo evidencia como podem ser empregados os ensaios de VPU para controle de estruturas.

2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O concreto não pode ser considerado um material eterno, visto que necessita de manutenção para garantir a sua vida útil. A falta de manutenção faz com que as construções apresentem manifestações patológicas de significativa intensidade e incidência, geralmente acompanhadas de elevados custos para a sua reabilitação. Para que seja possível ampliar a vida útil de uma estrutura é iminente a necessidade de qualificar o material a ser empregado, bem como a mão-de-obra utilizada. Objetivando atender às expectativas de projeto quanto à resistência e vida útil de estruturas de concreto, é interessante dispor de um sistema de acompanhamento para verificar as condições físicas e estimar a homogeneidade e compacidade do concreto. Os ensaios não destrutivos (END) são uma estratégia de investigação atraente neste contexto, pois permitem que seja feita uma análise das condições da estrutura, sem provocar danos à mesma.

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 END pode-se tornar mais complexa, devido à necessidade de maior conhecimento acerca das propriedades e comportamento dos materiais [3].

O concreto é muito utilizado na construção civil em decorrência da excelente durabilidade. 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 [4]. 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 [5].

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.

Alguns dos equipamentos tipo END disponíveis comercialmente permitem verificar o comportamento das estruturas de concreto desde as idades iniciais. É o caso do ensaio ultra-sônico, que permite averiguar as condições iniciais, monitorando a variação de suas características, ao longo do tempo, além de possibilitar a estimativa da resistência. O mesmo, já comumente utilizado na detecção de falhas em materiais homogêneos, vem sendo adaptado para a avaliação do comportamento de materiais compostos, como o concreto, com bons resultados. Já existem exemplos de aplicações em pontes, viadutos, lajes e outras estruturas de concreto. Contudo, para poder ter uma maior confiança nos dados obtidos, é fundamental conhecer a influência de variáveis que afetam as características do concreto, tais como o tipo de agregado graúdo, o regime de cura e a relação água/cimento, entre outras.

3. ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

Dentre os métodos de NDT disponíveis, o VPU 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 [6]. O ensaio por pulso ultra-sônico é um método de avaliação de materiais bastante difundido, especialmente em peças metálicas. No caso do concreto, a NBR 8802 (2013)estabelece procedimentos para a realização deste tipo de ensaio, que normalmente é efetuado com o objetivo de verificar a uniformidade do concreto, detectar eventuais falhas internas de

concretagem, avaliar a profundidade de fissuras ou outras imperfeições, estimar o módulo de deformação e a resistência à compressão e/ou monitorar as variações das características do concreto ao longo do tempo.
A metodologia de aplicação destes ensaios está baseada no monitoramento do tempo de propagação de pulsos por uma seção do objeto moldado. Esta situação é possível graças ao retardo das ondas, fator que ocorre, pela presença de vazios, em função da má condutibilidade do ar. A VPU irá depender da densidade e propriedades elásticas do material em estudo. Como a qualidade de muitos materiais de construção é relacionada com sua rigidez, a medida da VPU pode ser usada tanto para medir a qualidade das estruturas de concreto, como para estimar suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.
Devemos lembrar que existe relação entre a VPU e a densidade do concreto e essa relação oferece justificativa para o uso da VPU para a avaliação do concreto, mas sujeita a certas limitações [7]. O problema é que as mesmas características que afetam a resistência (idade, porosidade, composição e cura), também influenciam a velocidade do ultrassom, pois modificam a estrutura interna do material. Essa correlação não é simples e depende de vários fatores. Concretos de resistência similar podem ter diferentes velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, em função do tipo de agregados utilizados, da idade e da composição do concreto [8]. A Figura 1 ilustra a aplicação do ensaio em um corpo de prova cilíndrico de concreto.



Figura 1: Ensaio Ultrassônico no Concreto.

Estas diferenças criam uma ambiguidade na interpretação dos resultados do ultrassom entre obras diferentes, especialmente porque não se conhece perfeitamente em que proporções cada uma delas atua. Estas dificuldades são, entretanto, minimizadas quando acompanhamos a mesma estrutura ao longo do tempo.
Neste caso, o ultrassom permite avaliar como a mesma se densifica progressivamente e, neste trabalho se argumenta, isto pode, por sua vez, ser utilizado para determinar como o processo de cura está se desenvolvendo. Acredita-se que, ao permitir verificar como esta relação se estabelece, o uso de técnicas de VPU pode conduzir a uma maior segurança quanto às características atuais do concreto e permitir uma melhor programação da construção. Um fator importante, neste caso, é que o ultrassom, por ser uma técnica não destrutiva, permite a execução de ensaios no mesmo local, de modo a permitir acompanhar adequadamente as variações associadas com o tempo.
Os resultados demonstram que é possível entender como variações das condições de ensaio afetam os resultados de ensaios de VPU, o que pode auxiliar a minorar os erros na estimativa da resistência. O estudo indica que o ensaio ultrassônico pode fornecer dados importantes para a tomada de decisão a respeito das condições de estruturas de concreto. Mediante a execução de ensaios ultrassônicos, é possível contribuir com o controle da deterioração e qualidade das estruturas de concreto.

4. METODOLOGIA

O ensaio de VPU consiste na determinação da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica entre uma dupla de pontos, convenientemente localizados na estrutura sob análise. Este procedimento permite identificar diferenças qualitativas entre as diversas zonas que compõem as estruturas de concreto. Para realização das medições de VPU nas diferentes estruturas foram criados grids nas faces dos elementos de acordo com o tipo de elemento a ser ensaiado. Após a definição do grid de leitura procedeu-se com a operação de marcação do mesmo, na superfície da estrutura.
O esquema de medição do pulso ultrassônico estabeleceu-se da seguinte forma: nos pontos centrais, denominados de E1 e E2, na Figura 2, foi posicionado o transdutor emissor, enquanto que o receptor foi posicionado nos pontos em torno do mesmo, resultando em 8 leituras de tempo de propagação de pulso.

Após esta etapa, foi feito a leitura nos pontos de contorno do grid, somando-se mais oito leituras, conforme pode ser observado na Figura 2. O emissor era então mudado para o ponto E2, onde se repetia este procedimento, e assim sucessivamente até que todas as leituras necessárias para um perfeito mapeamento da região analisada fossem finalizadas. Os resultados das velocidades de propagação de uma onda ultrassônica podem ser interpretados como indicadores de qualidade do concreto. Concretos que apresentam menor compacidade fornecem menores valores de VPU. As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através de um software de geração de curvas de nível, facilitando a visualização da homogeneidade de cada elemento.

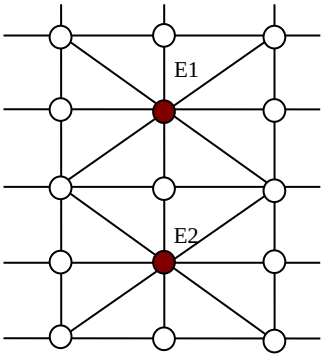

Figura 2: Grid de medição para leituras ultrassônicas.

5. AVALIAÇÃO DE PILARES DE CONCRETO

O presente estudo de caso evidencia como podem ser empregados os ensaios de VPU para controle de pilares de concreto. Os ensaios foram realizados em três obras de grande porte e foram empregados para verificar a homogeneidade do concreto de uma série de pilares nos quais havia indicativos do controle de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados neste sentido.
Buscando prevenir uma intervenção desnecessária na estrutura, e evitar danos com a retirada de testemunhos, sugeriu-se a realização de ENDs 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.

5.1 Estudo de Caso 1

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. Para a análise dos resultados dos ensaios de VPU optou-se por mapear graficamente através de um software de geração de curvas de nível em alguns dos pilares ensaiados as variações da velocidade. Desta forma pode-se ter uma estimativa da homogeneidade e da presença de defeitos em cada pilar.
Como pode-se observar na Figura 3, 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.

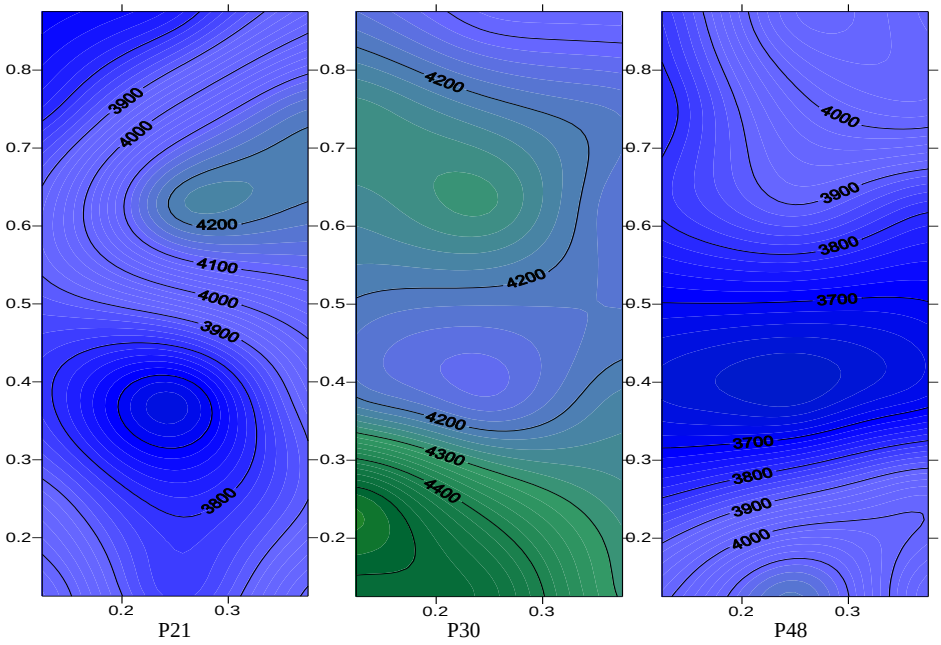

Figura 3: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de VPU para alguns dos pilares de referência.

Os pilares sob análise (Figura 4) apresentaram velocidades máximas levemente inferiores às registradas nos pilares de controle P21 e P30, mas compatíveis com as velocidades do pilar de controle P48. 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 VPU, destacando-se positivamente os pilares P32 (referência) e P23 (sob análise), e negativamente o pilar P44 (sob análise).

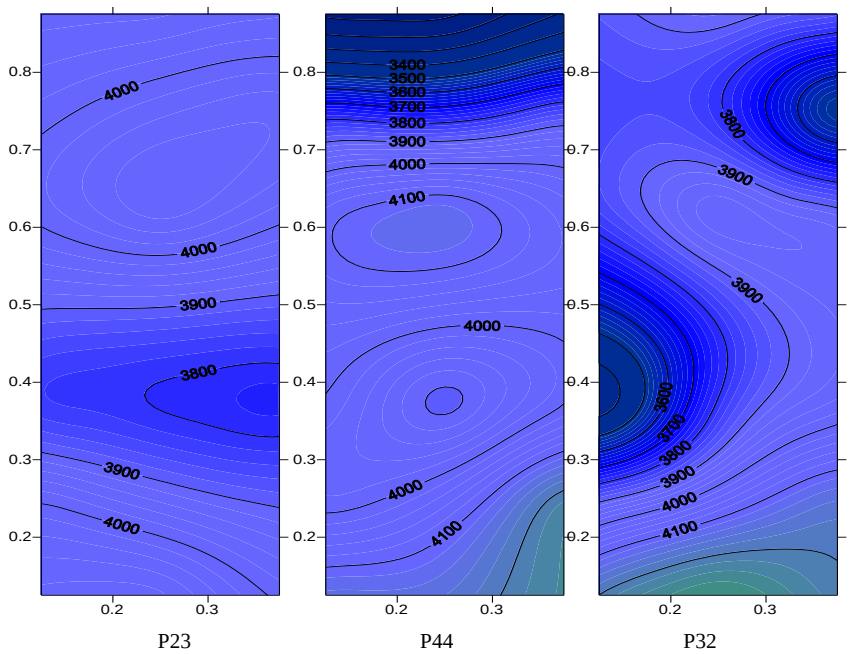

Figura 4: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de VPU para alguns dos pilares sob análise.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

5.2 Estudo de Caso 2

O presente estudo de caso apresenta os resultados dos ensaios de VPU realizados em uma série de pilares de concreto. Os pilares examinados 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. De forma a realizar as medições foram criados grids nas faces dos elementos.
Durante a marcação do grid foi necessário preparar a superfície em alguns locais, para reduzir a rugosidade e permitir um melhor contato entre o transdutor e a superfície do concreto.
Destaca-se que as velocidades começaram a apresentar valores mais baixos nas proximidades das juntas de concretagem. Este fato pode ser explicado, pois há uma tendência de que no final da concretagem de um pilar o concreto esteja mais argamassado e, consequentemente, menos resistente. Foi observado que a superfície do pilar, na parte superior, apresentava falhas de concretagem e textura "craquelada", conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.
Uma vez que a VPU está diretamente relacionada à compacidade do material sob análise, a presença de falhas influencia negativamente o resultado final. Entretanto, o novo concreto lançado apresentava superfície mais regular, o que não elevou significativamente os resultados de velocidade, levantando assim, suspeita em relação à qualidade do concreto presente no topo do pilar.



Figura 5: Detalhe da superfície do topo de algum dos pilares analisados.



Figura 6: Detalhe da junta de concretagem de algum dos pilares analisados.

As Figuras 7 a 9 apresentam as imagens geradas com as leituras de VPU de alguns dos pilares analisados. As velocidades registradas variaram entre 2400 e 3200 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.

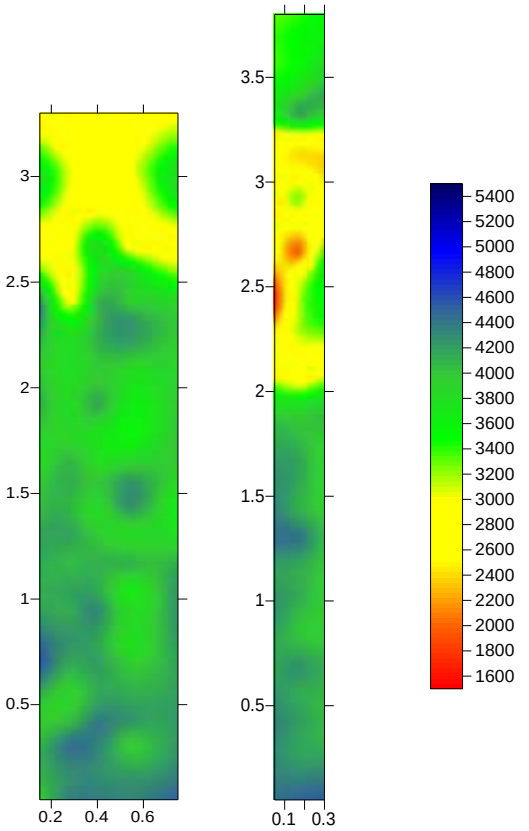

Figura 7: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.

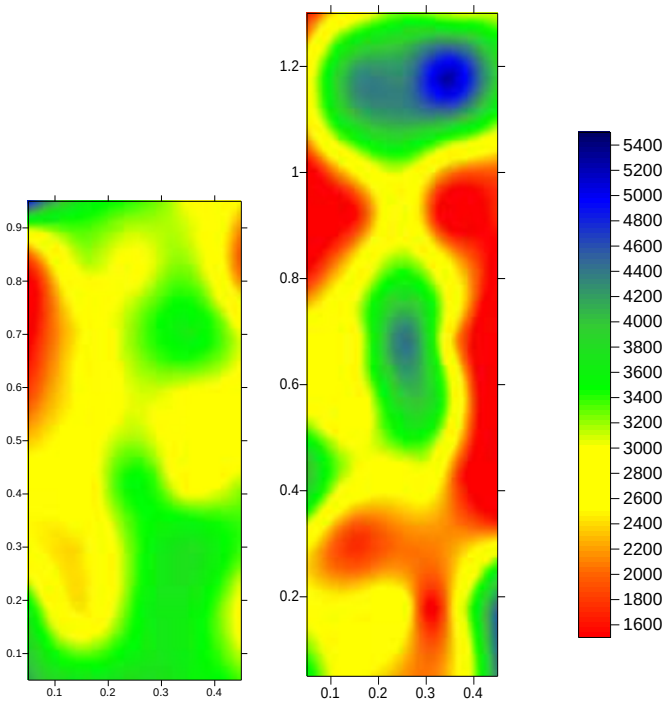

Figura 8: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

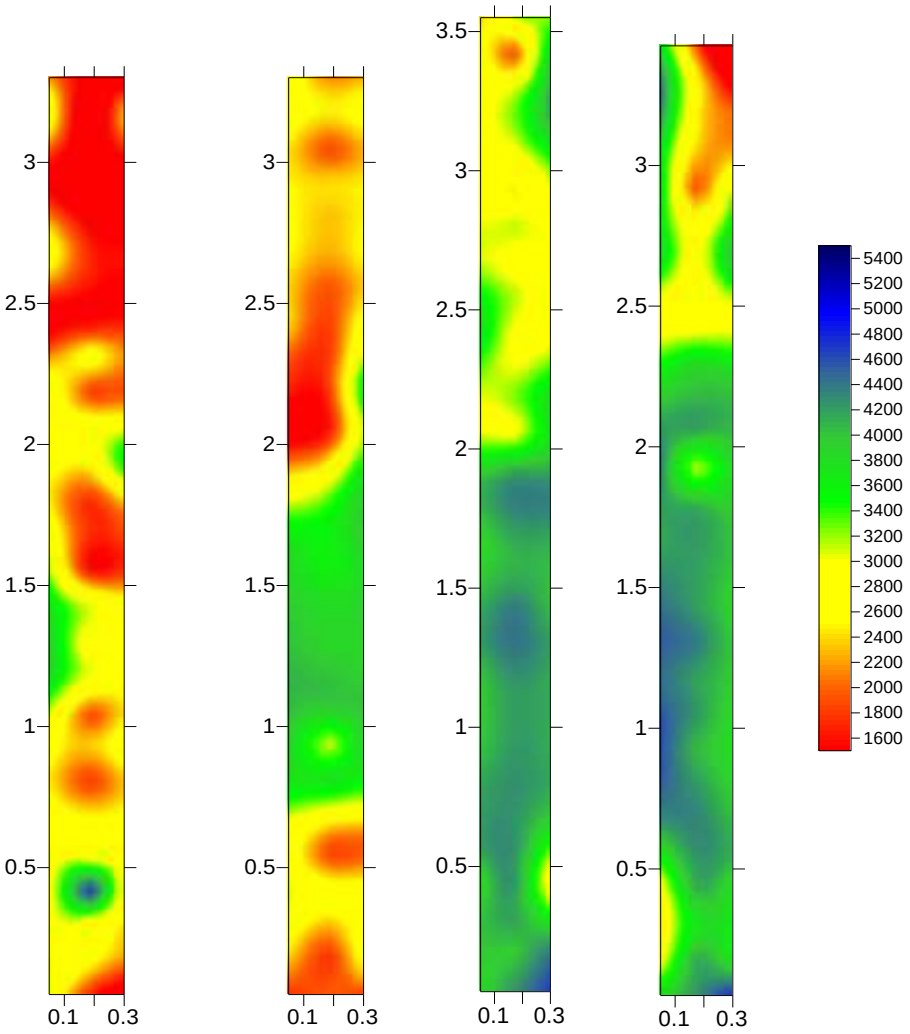

Figura 9: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.

5. CONCLUSÕES

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.

No primeiro caso a investigação evidenciou claramente a potencialidade de ensaios tipo VPU para checagem das condições de estrutura 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.

No segundo caso os resultados do mapeamento das leituras de VPU permitiram identificar que existem diferenças nas características dos concretos empregados. Considerando os resultados obtidos pode-se afirmar que a hipótese de que os concretos de todos os elementos analisados apresentam características similares não pode ser aceita. A partir da análise dos resultados verifica-se que os elementos ensaiados podem ser divididos em grupos com características genéricas distintas, que apresentam boa correspondência com os diferentes lotes de concretagem.

Os ensaios realizados indicaram que os concretos das regiões sob suspeita apresentavam características inferiores ao concreto de referência, resultantes de variações na resistência à compressão e/ou presença de falhas e defeitos de concretagem.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

De forma geral, os estudos de caso reforçam a ideia de que a utilização de VPU 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 ideia 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.

Nos dias atuais as pesquisas referentes aos ENDs têm buscado entender as capacidades e limitações de ensaio. A necessidade de se obter estruturas de concreto com elevado padrão de qualidade e durabilidade torna, cada vez mais, a utilização dos END uma ferramenta que pode auxiliar na tomada de decisão e no estabelecimento de estratégias de intervenção, como demonstrado nos estudos de caso descritos no presente artigo. Pode-se concluir que, mediante a execução de VPU é possível contribuir com o controle da deterioração e qualidade das estruturas de concreto, como demonstrado nos estudos de caso descritos no presente artigo.

6. REFERÊNCIAS

[1] Lorenzi, A., Silva Filho, L.C.P., Campagnolo, J.L., Pasa, V.P., *Estudo das Variações dos Ensaios de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico em Concretos com Diferentes Características*. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ 2005), 8, 2005, Salvador. Anais.... São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos, 2005.

[2] Lorenzi, A., Tisbierek, F.T., Silva Filho, L.C.P., *Interpretação de Ensaios Ultra-Sônicos no Concreto através de Redes Neurais Artificiais*. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ 2007), 9, 2007, Salvador. Anais.... São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos, 2007.

[3] 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) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

[4] Andrade, T., "Tópicos sobre Durabilidade do Concreto". In: ISAIA, G. C. (Editor), Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.25, vol.1, p.753-792.

[5] Figueiredo, E. P., "Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações". In: ISAIA, G. C. (Editor), Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.33, vol.2, p.985-1015.

[6] Lorenzi, A., Silva Filho, L. C. P., Campagnolo, J. L., Lorenzi, L. S., *Prospecção de Resultados de Ensaios Não Destrutivos no Concreto através de Ensaios Ultra-sônicos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC 2008), 50, 2008, Salvador. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

[7] Beutel, R., Reinhardt, H., Grosse, C. U., Glaubitt, A., Krause, M., Maierhofer, C., Algernon, D., Wiggenhauser, H., Schickert, M., *Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods*. In: EUROPEAN NDT CONFERENCE (ECNDT 2006), 9, 2006, Berlin. Proceedings.... Berlin: The German Society for Non-Destructive Testing, 2006. Disponível em: http://www.ndt.net. Acesso em: 18/06/2007.

[8] Cho, Y. S., "Non-destructive Testing of High Strength Concrete using Spectral Analysis of Surface Waves". *NDT&E International*. [s.l.], n. 36, p. 229-235, 2003.