

Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico

A. Lorenzi^{1*}, J. A. Chies¹, D. S. Adamatti¹, L. C. P. Silva Filho¹

*Autor de Contacto: alexandre.lorenzi@ufrgs.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127>

Recebido: 03/01/2017 | Aceito: 09/08/2017 | Publicado: 29/09/2017

RESUMO

Ensaio de Velocidade de Propagação de Pulso Ultrassônico (VPU) são cada vez mais usados para detectar falhas em concreto. Este trabalho é parte de um programa experimental amplo que buscou estudar a influência de variáveis-chave na capacidade de detecção usando ensaios de VPU em elementos de escala natural. Para essa investigação foram moldados dois elementos de concreto de larga escala, com vários objetos introduzidos em um deles para simular possíveis falhas de concretagem. Ademais, para verificar a capacidade de identificação de vazios não-aparentes com a técnica de VPU, perfurações graduais em diferentes profundidades foram feitas a partir da face não monitorada. Os resultados confirmam que o ensaio de VPU é uma ferramenta adequada para detecção de falhas no concreto, até certa profundidade.

Palavras chave: concreto; velocidade de propagação do pulso ultrassônico; defeitos estruturais.

Citar como: A. Lorenzi, J. A. Chies, D. S. Adamatti, L. C. P. Silva Filho (2017), “Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 286-301, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127>

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Av. Bento Gonçalves, 9500 – Prédio 43436 – Campus do Vale. Porto Alegre RS, Brasil.

Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, E-mail: alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida. Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na segunda edição do 2018, desde que a informação é recebida antes do encerramento da primeira edição de 2018.

Evaluation of concrete flaw detection capability by means of ultrasonic tests

ABSTRACT

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) tests are being increasingly used to detect flaws in concrete. This work is part of a large experimental program aimed at studying the influence of key technological variables on detection capacity using UPV in real size elements. For this investigation two large concrete elements were cast, with some objects introduced in one to simulate possible concrete flaws due to inadequate casting. Furthermore, to check the capacity of detecting unseen voids with UPV tests, gradual perforations with different depths were made from the unmonitored face. The results confirm that UPV analysis is a very good tool to detect concrete faults, up to some depth.

Keywords: concrete; ultrasonic pulse velocity; structural defects.

Evaluación de la capacidad de detección de fallas en concreto través del ensayo ultrasónico

RESUMEN

Los ensayos de Velocidad de Propagación del Pulso Ultrasónico (VPU) vienen siendo cada vez más empleados para detectar fallas in hormigón. Este trabajo es parte de una amplia investigación experimental que tiene el objetivo de estudiar la influencia de variables tecnológicas claves en la capacidad de detección del UPV in elementos de tamaño real. Para esa pesquisa dos elementos largos de concreto fueran moldeados, con objetos introducidos para simular fallas en el hormigón. Además, para chequear la capacidad de detección de vacíos no visibles de la técnica de VPU, se realizaron perforaciones graduales hasta diferentes profundidades, empezando en la cara no monitoreada. Los resultados confirman que el ensayo de VPU es una herramienta muy buena para detección de fallas, hasta cierta profundidad.

Palabras clave: concreto; velocidad de propagación del pulso ultrasónico; defectos estructurales.

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se consolidando é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das construções. Dentro deste cenário, nota-se um crescente interesse pela utilização de Ensaio Não Destrutivo (END) para auxiliar na inspeção e monitoramento de estruturas de concreto armado. Beutel et al. (2006) enfatizam que o uso de END na engenharia civil depende da confiabilidade de aplicação dos métodos.

Acompanhando a tendência mundial, no Brasil a aplicação de END vem crescendo em vários setores. A expectativa é que na engenharia civil a utilização dos métodos END ainda se incremente significativamente, vindo os mesmos a se consolidarem como ferramentas vitais para auxiliar os profissionais envolvidos na gestão do desempenho dessas obras, em todas as etapas de seu ciclo de vida.

Com ao incremento de métodos e o desenvolvimento de equipamentos portáteis e confiáveis, os END podem assumir relevante papel na detecção e avaliação da severidade de defeitos e anomalias derivados de falhas de projeto, uso de dosagens incorretas, emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desforma, além da utilização incorreta das estruturas de concreto. Isso pode ter importante repercussão na qualidade e na vida útil do estoque de construções, pois esses problemas têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com custos elevados de reparação, como destaca Figueiredo (2005).

Um aspecto relevante é que, de forma geral, a utilização de END ajuda a viabilizar a inspeção detalhada e a avaliação do estado de conservação de construções civis de forma econômica e eficiente. A maioria dos métodos END permite a detecção de anomalias sem ocasionar danos ao material. A partir da sua utilização, consegue-se proceder à inspeção de uma estrutura afetada sem interrupção de serviço, propiciando uma economia em termos de tempo e de custos (Grabowski; Padaratz; Pinto, 2008).

O desafio, todavia, consiste em entender como utilizar adequadamente os END e como melhor interpretar seus resultados, para obter os diagnósticos confiáveis. O emprego de técnicas END para detecção de fissuras, falhas, imperfeições e danos se mostra eficiente em materiais homogêneos, mas quando os mesmos métodos são aplicados ao concreto armado, um material complexo e variável temporalmente e espacialmente, é frequente que se encontrem dificuldades maiores no diagnóstico, pois a heterogeneidade e o caráter dinâmico da composição e estrutura desse material podem ocasionar interferências diversas nos resultados.

Felizmente, o contínuo avanço tecnológico na área tem gerado métodos END cada vez mais robustos e adequados para acompanhar o desenvolvimento de novos materiais. Todavia, para consolidar a confiança nessas abordagens é fundamental desenvolver programas experimentais projetados para avaliar a capacidade de cada método em proporcionar diagnósticos confiáveis, e entender suas limitações em situações de teste, especialmente em condições de campo, onde o controle de diversas variáveis não pode ser efetuado (umidade, rugosidade superficial, presença de armaduras, carbonatação da superfície, variações na resistência do concreto, etc).

Infelizmente, o processo de estudos e de incorporação de novos e mais avançados métodos END na engenharia civil tem tido uma evolução lenta. Como enfatizado por Mehta e Monteiro (2008), o desenvolvimento de métodos de END para o concreto, em comparação com outros materiais estruturais, tem sido lento.

Reconhecendo o potencial dessas técnicas e a demanda por estudos estruturados das mesmas, o Grupo de Pesquisa LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul decidiu, ainda na década de 90, estabelecer uma linha de pesquisa dedicada ao estudo e avaliação de métodos END, que vem gerando vários trabalhos relevantes na área. O método mais estudado no LEME-UFRGS foi o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), um dos mais simples e populares métodos END para avaliação de compacidade e homogeneidade do concreto. Somente para esse método, foram realizadas, nos últimos 25 anos, diversas pesquisas inovadoras sobre diferentes aspectos do ensaio e de suas aplicações, tais como: mapeamento de danos microestruturais após exposição a altas temperaturas (Lima, 2005); investigação da capacidade de detecção de falhas (Chies, 2014); e desenvolvimento de modelos avançados de estimativa de resistência a partir de dados de VPU com emprego de redes neurais (Lorenzi, 2009), entre outras.

Recentes avanços na aquisição de dados computadorizados, no processamento de imagens digitais e no desenvolvimento de teorias complexas para meios heterogêneos têm contribuído para o aprimoramento dos ensaios de VPU, e estudos sobre o uso da chamada tomografia de ultrassom estão em andamento.

Este trabalho faz parte de um programa mais amplo desenhado no LEME com o objetivo de avaliar a capacidade do método de detectar falhas de concretagem em elementos fabricados em laboratório, porém com dimensões e características semelhantes às encontradas em estruturas reais.

A pesquisa busca contribuir para que se conheçam melhor as potencialidades e as limitações dos diagnósticos efetuados com base em leituras feitas com aparelhos de ultrassom portáteis, ao coletar dados sobre quanto algumas variáveis não controláveis em campo interferem nos resultados e, eventualmente, dificultam a detecção de falhas internas do concreto. Esse caráter da diferenciada investigação, em relação a maioria dos estudos, que analisa com corpos de prova de pequena escala em ambiente de laboratório, é um dos principais aspectos que justificaram a realização do estudo.

2. RELEVÂNCIA DO ESTUDO

No presente trabalho se trabalha com um subconjunto de dados de um amplo programa experimental de investigação de uso de UPV para análise de estruturas reais, cujos resultados estão publicados de forma mais completa nos trabalhos de Adamatti (2013) e Chies (2014).

O subconjunto de dados analisado neste artigo foi coletado com o objetivo de avaliar a capacidade de detecção de vazios e falhas ocultos (subsuperficiais), em condições similares às de obras reais. A questão central dessa parte da investigação consistia em averiguar até que profundidade se pode efetuar um adequado diagnóstico sobre a presença de vazios, usando a estratégia de mapeamento superficial com base em leituras indiretas de UPV, frequentemente adotada em casos reais. Para tanto, como descrito no item 4, foram induzidos defeitos e efetuadas perfurações em blocos de tamanho natural de concreto.

O conhecimento de qual é o limite de profundidade crítica para detecção pode ser uma informação fundamental na avaliação de estruturas reais com esse método. Embora haja formulações teóricas sobre qual seria essa profundidade, a coleta de dados em condições semelhantes às encontradas em obras reais, com as perturbações frequentemente encontradas na prática (variações de rugosidade superficial, presença de armaduras, variações no concreto, mudança de operador, entre outras) é fundamental para que avalie a robustez e confiabilidade de eventuais diagnósticos de campo.

Praticamente inexistem estudos com essa abordagem na América Latina. Dessa forma, considera-se que os resultados apresentados representam um aporte importante para usuários e pesquisadores na área.

3. ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ATRAVÉS DOS ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

O método de VPU é baseado na determinação da propagação de um pulso ultrassônico através de um material. O mesmo é um método bastante utilizado para avaliação do concreto, devido à sua eficácia, simplicidade de aplicação e também pelo seu custo.

Através da utilização do ensaio de VPU vislumbra-se a capacidade de detecção de falhas no interior de estruturas de concreto, permitindo efetuar uma varredura completa e adequada do concreto, como indicam, por exemplo, estudos realizados para avaliar a degradação de propriedades mecânicas do concreto e da argamassa (Nogueira, 2009); a influência da presença de armaduras na estimativa da profundidade de fissuras superficiais (Medeiros *et al.*, 2009), e a capacidade de monitoramento de estruturas de concreto armado (Lorenzi *et al.*, 2009).

De acordo com a norma BS 1881-203 - *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete* (BSI, 1996), as medições da velocidade de pulso feita em estruturas de concreto podem ser utilizadas para o controle de qualidade do material.

Em comparação com ensaios mecânicos em amostras de controle, como cubos ou cilindros, as medições de VPU tem a vantagem que elas se relacionam diretamente com a estrutura do concreto ao invés de amostras que nem sempre representam o concreto “*in situ*”.

A VPU deve estar relacionada com os resultados de testes em componentes estruturais e, se uma correlação for estabelecida com a resistência ou outras propriedades necessárias desses componentes, é apropriado fazer uso dela.

Apesar da grande quantidade de estudos sobre o VPU, existe uma dificuldade em relacionar a VPU e a resistência à compressão do concreto. Com vistas a solucionar este problema, Lorenzi (2009) utilizou Redes Neurais Artificiais (RNAs) para correlacionar de forma eficiente a VPU e a resistência do concreto.

Diversos fatores influenciam na propagação do pulso ultrassônico no concreto. A quantidade e a posição da armadura no concreto exercem influência na VPU, pois no aço a velocidade é aproximadamente 40% maior do que no concreto, principalmente quando as barras são orientadas

paralelamente à direção da propagação do pulso. Outros fatores, como a presença de trincas e vazios ao longo do caminho da propagação do pulso, a quantidade e o tipo de agregado e o teor de umidade do concreto, também exercem influência importante nos resultados, como explicado no ACI 228.1R-03 (2003).

Segundo Naik e Malhotra (1991), o perfeito contato entre os transdutores e o concreto do elemento em estudo constitui um ponto crítico desse método. Caso este contato não seja alcançado, cria-se um bolsão de ar entre o transdutor e o elemento, que acarreta um erro na determinação do tempo de percurso da onda. Este erro ocorre devido ao fato de que somente uma parcela insignificante do pulso pode ser transmitida pelo ar. De modo a assegurar o perfeito contato, recomenda-se a utilização de produtos, tais como graxa e gel, que devem ser aplicados em finas camadas.

Os valores da VPU situam-se em uma faixa restrita, tornando-se necessário uma medição rigorosa (acurácia de $\pm 1\%$), tanto do comprimento do percurso quanto do tempo gasto pela onda. Além disso, as medições dos valores de VPU podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: textura da superfície, teor de umidade, temperatura, tamanho das amostras, presença de armaduras e pelo nível de tensão. Ainda segundo essa norma, as correlações entre o valor de VPU e a resistência à compressão são difíceis de serem obtidas, pois elas são influenciadas consideravelmente pelas propriedades e proporções dos materiais constituintes, bem como pela maturidade do concreto, (BS 1881: Part 201, 1986).

Apesar de todas estas dificuldades a utilização do VPU está cada vez mais difundida na área da engenharia civil. O mesmo tem sido utilizado em operações de vistoria e monitoramento de estruturas de concreto, pois 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.

O ensaio de VPU passa a se constituir numa importante ferramenta de análise das características das obras. Através de sua utilização, se consegue correlacionar a velocidade ultrassônica com a homogeneidade do concreto que é objeto de análise. Para tanto é necessário estabelecer modelos estatísticos para cada caso que considerem o efeito das diferentes variáveis que afetam a propagação das ondas ultrassônicas no concreto. Todavia a correlação entre estas grandezas depende de vários fatores e está sujeita a certas limitações. Estas dificuldades são, entretanto, minimizadas quando se acompanhar a mesma estrutura ao longo do tempo. Neste caso, o VPU permite que seja possível avaliar como o processo de cura irá intervir na estrutura.

Outra alternativa é a geração de modelos neurais, conforme Lorenzi (2009), que permitam realizar uma análise não-linear da relação existente entre a resistência do concreto e a VPU, levando em consideração parâmetros como o tipo de cimento, a temperatura de cura, a relação água/cimento (a/c) e a idade do concreto. Através da aplicação das RNAs se espera gerar modelos de relacionamento não lineares que permitam estimar a resistência do concreto a partir do conhecimento destas informações básicas e dos resultados de ensaios de VPU, de modo a produzir métodos numéricos robustos e flexíveis para estimativa da resistência à compressão a partir de dados de VPU.

De acordo com a norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013), existem três possibilidades de acomodação dos transdutores: (a) transmissão direta - é o arranjo mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas através de um material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade e se movimentam de forma face a face, (b) transmissão indireta - utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou do componente a ser inspecionado e (c) transmissão semidireta - arranjo somente utilizado quando não houver a possibilidade de uso do sistema direto ou semidireto. Nesta situação os transdutores são posicionados em duas faces perpendiculares.

A presente pesquisa utilizou-se do modo de transmissão indireta, arranjo este utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou do componente a ser inspecionado, permitindo que o transdutor-receptor possa percorrer a face que será analisada, mantendo-se o transdutor fixo.

Este arranjo não é tão eficiente quanto o sistema direto, na medida em que sofre a interferência de uma grande área do componente ou corpo de prova analisado, chegando a se obter valores de VPUs até 50% inferiores ao obtidos com o modo de transmissão direta. Sempre que possível, deve-se utilizar sistemas de medições diretos e indiretos objetivando obter fatores de correlação do tempo de propagação da onda ultrassônica. Para Ramirez (2015) este método é mais propenso a erros e é menos satisfatório porque a amplitude do sinal recebido é significativamente menor do que o obtido pelo método de transmissão direta. Porém o método direto demanda um número significativamente maior de leituras para a avaliação de uma mesma superfície.

4. CONCEPÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de identificar e quantificar a influência de determinadas variáveis nos resultados de END utilizando VPU, o programa experimental buscou averiguar como se comporta esse método quando se busca realizar diagnósticos sobre defeitos e falhas de concretagem em elementos de concreto em escala natural.

Para viabilizar essa investigação foram gerados dois blocos de concreto de larga dimensão (faces de 1,7m e largura de 0,60m, totalizando 1,734 m³), com e sem presença de armadura, sendo em um deles introduzidas esferas de isopor para simular a presença de falhas de concretagem, em diferentes profundidades.

Os blocos foram mapeados pela face mais rugosa (topo de forma durante a concretagem) e pela face mais lisa (fundo de forma), usando medidas indiretas, com mais de um operador, com e sem uso de gel acoplante, empregando grids de medição com dimensão variável, de forma a simular condições que eventualmente poderiam ser encontradas em estruturas reais sob análise. Como já discutido, o relato detalhado dos ensaios e seus resultados podem ser encontrados em Adamatti (2013) e Chies (2014).

Adicionalmente, em um segundo momento, foi gerada, em um dos blocos, uma perfuração, a partir da face lisa, cuja presença foi monitorada por meio dos ensaios de UPV realizados a partir da face rugosa. A perfuração tinha diâmetro de 5 cm e sua profundidade foi incrementada gradualmente, de forma que a distância do furo para a face de monitoramento fosse diminuindo. A ideia foi verificar a partir de que profundidade a perfuração seria captada nos mapeamentos. Dessa forma se buscou averiguar qual a capacidade potencial de diagnóstico de um defeito não visível em termos de profundidade.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção dos elementos de ensaio foram geradas fôrmas com utilização de compensado plastificado e armação em madeira de eucalipto, buscando se aproximar da forma de confecção de uma estrutura real de concreto. As fôrmas foram montadas de maneira a se obter duas faces quadradas com aresta de 1,70m, com rugosidades distintas, uma lisa (fundo de forma) e outra rugosa (topo da forma – sem contato com o compensado). A Figura 1 mostra uma das fôrmas utilizadas para confecção das paredes.



Figura 1. Fôrmas para concretagem das paredes.

As dimensões globais dos elementos concretados eram de 1,70m x 1,70m x 0,60m. O valor de 1,70m foi escolhido para que se pudesse ter, para o grid de medição maior, uma célula de medição com a dimensão máxima possível que um operador conseguisse efetuar as medidas, sozinho, com um mínimo de conforto ergonômico, e gerar dados razoavelmente utilizáveis.

A partir de experiências anteriores em trabalhos de campo e estudos desenvolvidos pela equipe do LEME/UFRGS, a célula máxima do grid de medição considerada adequada para tanto é constituída de um quadrado com 75cm de aresta. Dessa forma, pretendia-se gerar um quadrante de medição de 1,50m x 1,50m no bloco, abrangendo 4 células.

Para evitar realizar medições próximo às bordas, o que pode gerar efeitos que interferem nos valores de VPU medidos, foram adicionadas faixas de 10 cm no entorno do grid de leitura, totalizando a superfície total de 1,70m x 1,70m definida para o elemento.

As fôrmas foram produzidas com 60cm de profundidade, com o intuito de simular elementos robustos, possibilitando avaliar a capacidade do ensaio de VPU para localizar falhas de concretagem inseridas em diferentes profundidades.

Na confecção das paredes foi utilizado concreto usinado, dosado em central concreteira e transportado por meio de caminhão betoneira até o laboratório, sendo lançado diretamente nas fôrmas. Foi requerida uma resistência característica à compressão aos 28 dias de idade (f_{ck}) de 30 MPa, sendo empregado um traço pré-estabelecido e conhecido pela central dosadora de concreto para esse nível de resistência. Buscou-se ao longo de todo o processo se aproximar dos processos empregados para concretagens de obras reais.

Para representação da existência de falhas de concretagem em uma das formas foram fixadas, com auxílio de fio de nylon, esferas maciças de isopor com diâmetros variando entre 2,5cm e 15cm, em diferentes posições pré-definidas. As esferas de isopor com diâmetro de 2,5cm e 5cm buscaram representar pequenas falhas, como bolhas de ar ou materiais indesejados. Já as esferas de isopor com diâmetro de 10cm e 15cm buscavam representar falhas maiores, derivadas de segregação do concreto, problemas em juntas de concretagem e vazios devido à concentração de armadura.

O posicionamento e a profundidade dos vazios foram pensados de forma com que se pudessem ter combinações iguais para ambas as faces. Com isso possibilitou-se avaliar a capacidade de detecção de vazios com diâmetros de 2,5cm, 5cm e 10 cm a profundidades entre 5cm e 50cm tanto para uma situação com superfície rugosa quanto para lisa (Figura 2).

Devido à dimensão do vazio de 15cm de diâmetro ser relativamente grande em comparação aos demais, seu posicionamento ficou limitado ao centro da parede, a uma profundidade de 30cm de ambas as faces.

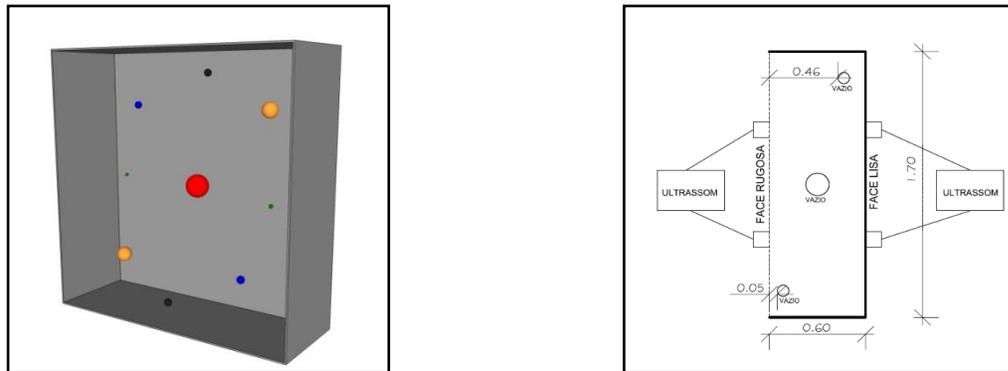


Figura 2. Posicionamento e Profundidade dos vazios.

Para iniciar as leituras de VPU, esperou-se o tempo mínimo de 28 dias da concretagem, de forma a minimizar a influência da variação da resistência do concreto nas leituras.

As variáveis envolvidas nos ensaios de determinação da VPU foram: distância entre os pontos de transmissão e recepção de pulsos ultrassônicos, condições da superfície e profundidade dos vazios, sendo que para estas definições se utilizaram as especificações do equipamento.

Foram identificadas e demarcadas as áreas efetivas de leitura, que correspondem a 1,50 m x 1,50 m dos 1,70 m x 1,70 m totais da parede. Feito isso foram marcados os pontos de posicionamento dos transdutores para a malha de grid 25 cm x 25 cm, e a partir dessa as demais malhas menos refinadas, (50cm x 50cm e 75cm x 75cm).

Concluída esta etapa de marcação dos pontos, o elemento está pronto para ser analisado através das medições de VPU. As leituras ficaram divididas em duas fases, a primeira com um operador com maior tempo de experiência com END com uso de aparelho de ultrassom, onde este realizou medidas tanto na face lisa como rugosa e nos respectivos grids especificados anteriormente.

As Figuras 3 e 4 apresentam a sequência e modo de leitura dentro de um segmento da parede. Com os valores de VPU obtidos, as variações de velocidade foram mapeadas graficamente. Os resultados da primeira etapa possibilitaram bons indicativos de que os parâmetros armadura, rugosidade, tamanho do grid e experiência do operador demonstraram ter maior potencial em relação à qualidade de interpretação e execução do ensaio. Porém, a metodologia aplicada não conseguiu definir com precisão a capacidade de detecção de defeitos a diferentes profundidades.



Figura 3. Sequência de leituras.

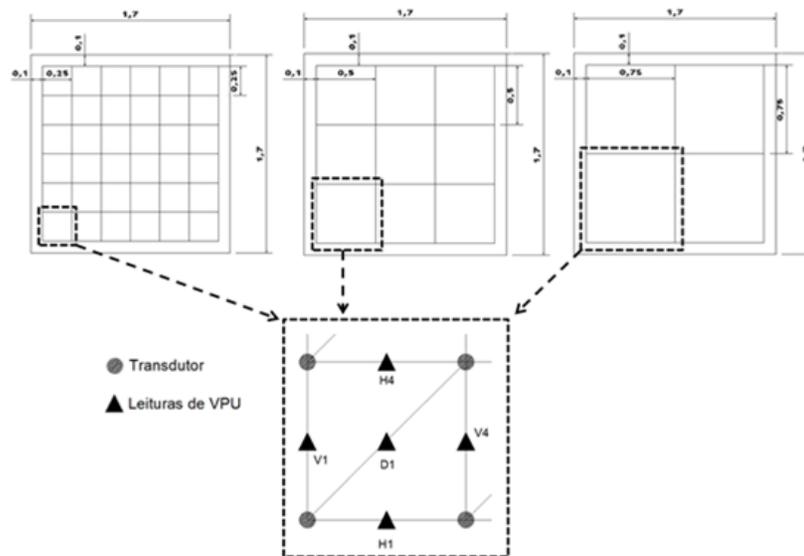


Figura 4. Esquema de Leitura para cada grid

A Figura 5 apresenta a imagem obtida através da combinação de parâmetros que apresentaram maior capacidade de detecção de vazios. A imagem apresentada é resultado da análise de uma parede sem armadura, ensaiada por um operador experiente, em um grid de 25cmx25cm na face lisa do elemento. Como pode ser visualizado na figura, mesmo com a melhor combinação de parâmetros, não se conseguiu localizar com precisão nenhum dos vazios introduzidos artificialmente.

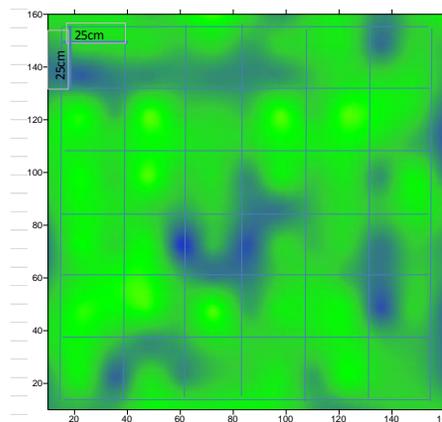


Figura 5. Imagem gerada a partir da combinação de parâmetros para identificar vazios.

Aparentemente, a variabilidade natural das leituras ao longo de uma peça de concreto em escala real teve grandeza similar ou superior aos desvios de leitura causados pela presença dos defeitos induzidos (com as dimensões e materiais utilizados, e posicionados nas profundidades desse teste). Acredita-se que a presença dos defeitos não se mostrou significativa em função da reduzida dimensão dos mesmos em relação ao grid, associada à compacidade do material usado para simular os mesmos (isopor).

Outros ensaios realizados no LEME-UFRGS já haviam dado indicações que, em corpos de prova de larga escala, ao contrário do que muitas vezes se registra em corpos de prova menores, a simulação de defeitos com esferas de isopor não gera tanta perturbação quanto o uso de segmentos de madeira ou de cápsulas de ar (na forma de bolas de ping pong ou similares). Os ensaios desse programa confirmaram essa tendência.

Procedeu-se, então, à segunda investigação, para complementar os resultados até então obtidos. Para a realização desta etapa foi traçada uma estratégia de pesquisa que se baseava em realizar perfurações na face oposta à face em análise, possibilitando a execução de medidas de VPU após sucessivas perfurações. Para isso limitou-se a execução dos ensaios pelo operador que obteve os melhores resultados na etapa anterior, sendo estes realizados na parede sem armadura e leituras executadas na face lisa.

Essa etapa tinha o intuito de identificar com precisão à que profundidade uma falha provocada artificialmente poderia ser localizada através do ensaio. A Figura 6 mostra a sequência de algumas perfurações e leituras sucessivas que foram realizadas. Para esta etapa uma região do bloco sem defeitos artificiais foi escolhida de maneira a não interferir nos resultados.

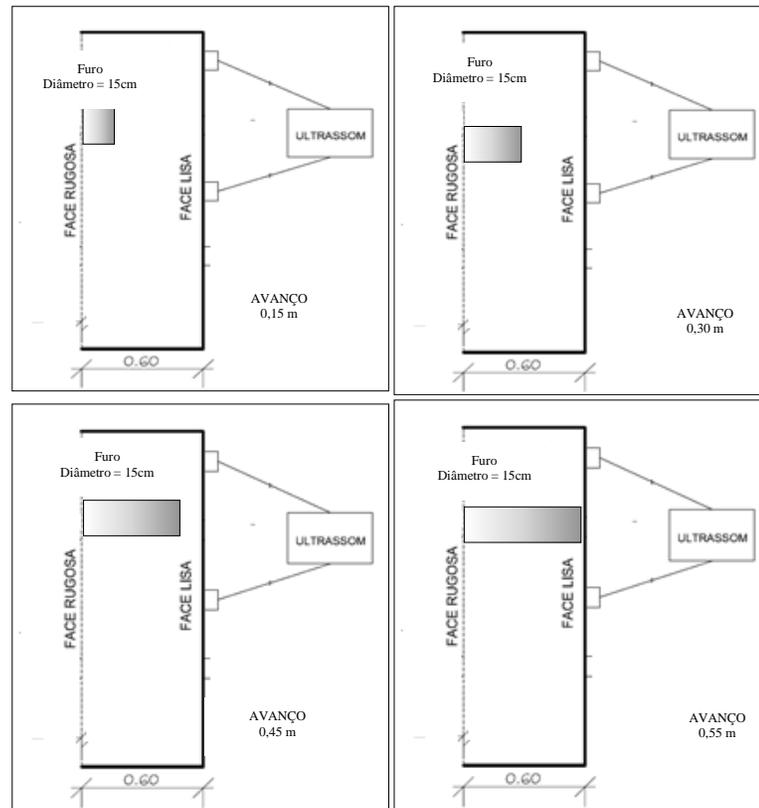


Figura 6. Esquema de avanço das perfurações

Como pode ser observada na Figura 6, a perfuração foi realizada em diversas etapas. Foi executada uma leitura de velocidades momentos antes da primeira perfuração. Com a utilização de uma máquina perfuratriz extratora de concreto com coroa diamantada de diâmetro interno de 150mm, foi perfurado 15cm a partir da face rugosa em direção da face Lisa (face de leitura), onde se removeu o material interno do furo, evitando qualquer interferência que este pudesse causar nos resultados. Após foram feitas leituras de VPU na face oposta.

Este procedimento foi idêntico e rigorosamente respeitado nas profundidades de avanço de 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 50cm, 55cm e 60cm. A Figura 7 ilustra o equipamento de perfuração posicionado e iniciando o trabalho. Após o encerramento das perfurações, novamente foram feitas medidas de VPU, mesmo com o furo já aparente na face de ensaio. Como último procedimento, o furo foi preenchido com argamassa com resistência à compressão de 4 MPa, que corresponde à aproximadamente 10% da resistência à compressão do concreto utilizado, simulando de forma alternativa um vazio de concretagem ou material não resistente aprisionado dentro da estrutura. Assim como realizado nas demais etapas, leituras de VPU foram adquiridas decorridos

28 dias do preenchimento do furo com a argamassa. A Figura 8 mostra uma das leituras adquiridas com 60cm de profundidade.



Figura 7. Etapas de avanço das perfurações



Figura 8. Medições realizadas a 60 cm de profundidade

4. RESULTADOS

Para a realização dos ensaios fez-se uso de algumas escolhas para facilitar a interpretação dos resultados. Além da escolha dos parâmetros de grid 25x25 cm e face lisa, as operações de perfuração foram realizadas na parede sem armadura com o intuito de unir as melhores configurações em um elemento que não tivesse interferências como, por exemplo, da presença de aço. Anteriormente de qualquer perfuração, foi realizada uma leitura de calibração em todo elemento, para comparação com as leituras obtidas após a perfuração.

A Figura 9 mostra a imagem gerada. Após a validação das medições, começou-se a realizar os procedimentos descritos anteriormente com a perfuração de um trecho, medidas de VPU, geração da imagem, nova perfuração e assim sucessivamente até que se atingisse a outra face do elemento.

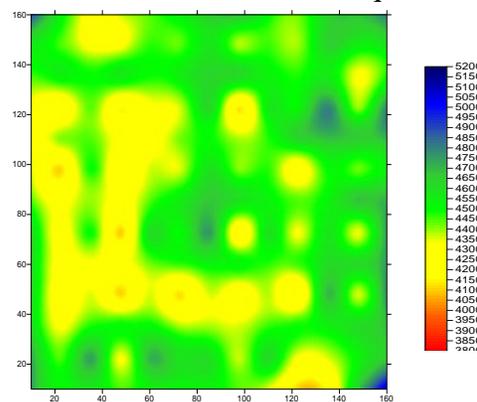


Figura 9. Medições realizadas para calibração

Nesta fase delimitou-se uma área para as medidas de VPU correspondente à $\frac{1}{4}$ da superfície total. Essa decisão deu-se pelo fato de abranger apenas a região de possível interferência que o furo podia causar, possibilitando assim um maior número de leituras sucessivas. A Figura 10 apresenta o trecho de da parede utilizado nas medidas de VPU e respectivo trecho de imagem gerado.

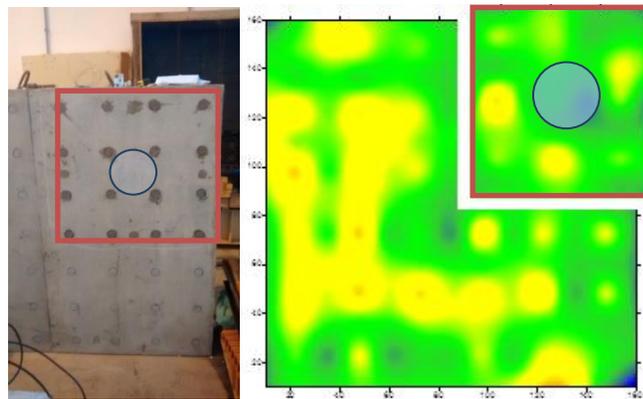


Figura 10. Região delimitada e respectiva imagem gerada.

As imagens apresentadas a partir desse momento são sempre relativas à área delimitada em vermelho. Foram realizados testes iniciais para se decidir qual a região a ser limitada sem que houvesse efeitos danosos à uma correta interpretação. Para uma comparação adotou-se para todas imagens uma velocidade mínima de 3800m/s representando regiões sob suspeita e uma velocidade máxima de 5200 m/s simbolizando regiões homogêneas. As Figuras 11 a 13 mostram a sequência de imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 0 e 35cm. Podemos observar nas imagens que até a profundidade de avanço de 35cm não ocorrem mudanças significativas na região analisada. Podemos concluir que para a situação em estudo, não foi possível detectar sinais da presença do furo. As diferenças observadas são apenas oriundas de pequenas variações e ruído de ensaio.

A Figura 14 mostra a sequência de imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 40 e 50 cm. Tendo como base o resultado obtido nas imagens ficou evidente uma sensível redução nas médias das velocidades, principalmente na região central, exatamente na área onde se encontra o furo. A partir da análise destes resultados consegue-se visualizar indícios da presença do defeito.

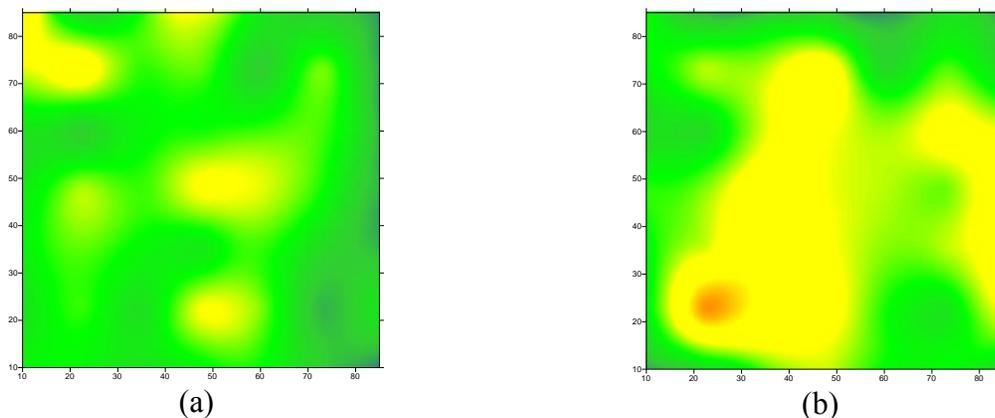


Figura 11. Imagem correspondente à profundidade de: (a) 0,0 m e (b) 0,15 m.

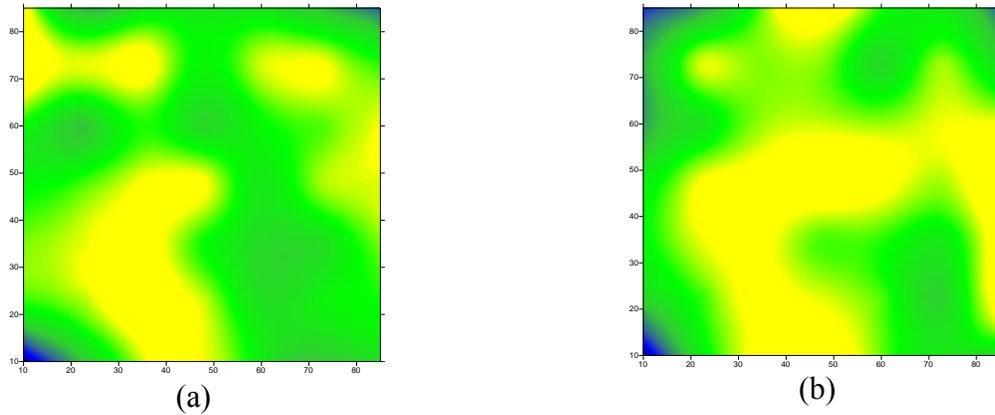


Figura 12. Imagem correspondente à profundidade de: (a) 0,20 m e (b) 0,25 m.

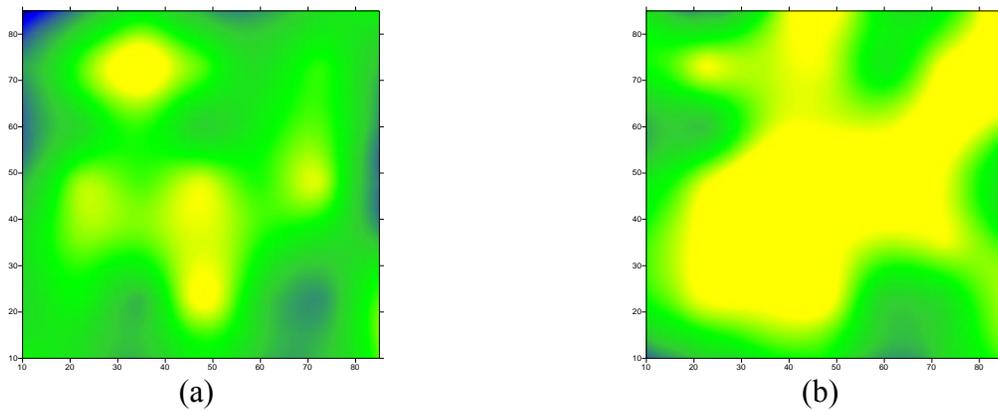


Figura 13. Imagem correspondente à profundidade de: (a) 0,30 m e (b) 0,35 m.

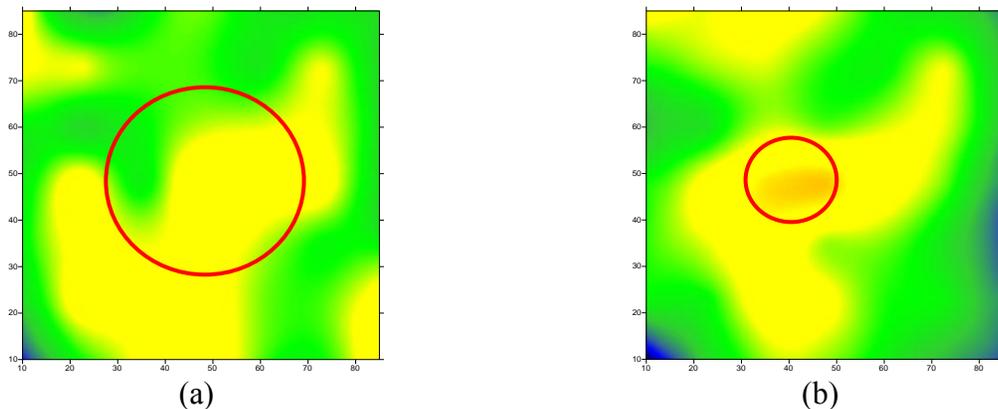


Figura 14. Imagem correspondente à profundidade de: (a) 0,40 m e (b) 0,50 m.

Já na Figura 15 visualizam-se as imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 55 e 60cm. A partir das imagens geradas para os últimos 10cm de avanço, observa-se claramente a presença do furo, o que demonstra a capacidade de detecção de defeitos à uma profundidade de aproximadamente 10cm.

Como se pode verificar, a imagem gerada também conseguiu representar com relativa precisão a dimensão desse vazio. Após encerrada a etapa de perfuração realizou-se novamente uma leitura completa da parede verificando-se assim se o comportamento apresentado nas imagens específicas da região perfurada também seria verificado numa interpolação global do elemento.

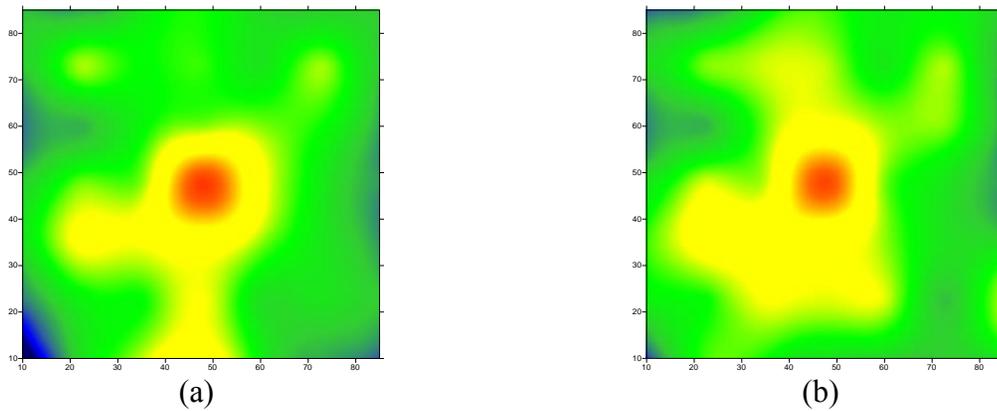


Figura 15. Imagem correspondente à profundidade de: (a) 0,55 m e (b) 0,60 m.

A Figura 16 apresenta o resultado dessa interpolação e geração da respectiva imagem. Analisando a imagem gerada na pode-se observar com facilidade a ligação entre o posicionamento real do furo com a região de velocidades consideravelmente inferiores mostrada na imagem.

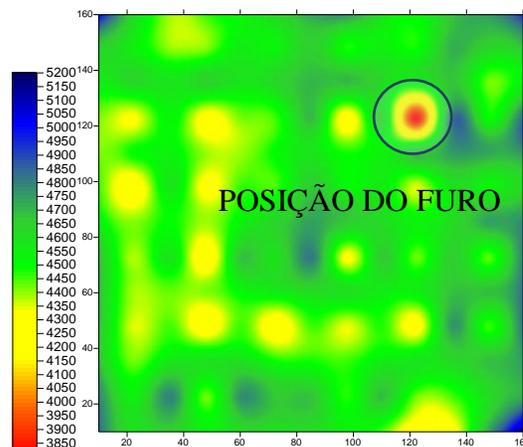


Figura 16. Imagem correspondente à profundidade de 60 cm – face completa.

5. DISCUSSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar as influências dos parâmetros que foram objeto deste estudo acarretam nos resultados do ensaio de VPU. Analisando e comparando os resultados obtidos através dos ensaios realizados, pode-se concluir que a escolha do grid de leitura vai depender do tamanho do elemento e da dimensão do defeito em seu interior.

A escolha criteriosa de parâmetros de ensaio possibilita uma interpretação completa da qualidade de estruturas de concreto. A partir das sucessivas perfurações executadas pode-se concluir que não foi possível a detecção através de ondas de pulso ultrassônico com grid de 25cm para defeitos da ordem de 15cm de diâmetro a profundidades maiores de 30cm.

A experiência do operador mostrou-se a variável mais importante e significativa nas análises, já que a falta de treinamento do mesmo pode acarretar interpretações errôneas, tendo em vista também que o operador é indispensável para a realização dos ensaios.

Defeitos existentes a uma profundidade de 10 à 30cm afetam sensivelmente as médias das velocidades das regiões próximas a ele, podendo levar a uma confusão na localização com regiões sem defeitos. Bem como falhas presentes a profundidades de até 10cm não têm sua localização e dimensão claramente apontadas pelas imagens gráficas fornecidas pelo software.

6. CONCLUSÕES

A utilização de ensaios de VPU cada vez se difunde mais na área da Engenharia Civil. O estudo realizado demonstra como o ensaio de VPU pode ser utilizado para a análise de estruturas, visto que os dados obtidos permitem verificar, por exemplo, a presença de corpos estranhos e vazios. O ensaio de VPU é bastante sensível a variações de homogeneidade e densidade. Uma vantagem importante dos ensaios de VPU é que podem ser aplicados, sem causar danos, a estruturas em uso, aspecto extremamente importante para os diagnósticos e a definição de estratégias de intervenção. A aplicação do ensaio de VPU está em fase de popularização de sua utilização em estruturas de concreto por apresentar diversas vantagens para a avaliação das estruturas, porém necessitando de um conhecimento em seu uso e operação proporcional à essa utilização pelo meio técnico.

O estudo indica que ensaios de VPU são sensíveis a variações de homogeneidade e densidade, podendo, portanto, fornecer dados importantes para a tomada de decisão a respeito das condições de estruturas de concreto. Ou seja, pode-se concluir que, mediante a execução de ensaios de VPU é possível contribuir com o controle da qualidade das estruturas de concreto.

A partir dos resultados obtidos nas sucessivas perfurações pode-se concluir que:

- (a) Não foi possível a detecção através de ondas de pulso ultrassônico com grid de 25cm para defeitos da ordem de 15cm de diâmetro a profundidades maiores de 30cm;
- (b) Defeitos existentes a uma profundidade de 10 à 30cm afetam sensivelmente as médias das velocidades das regiões próximas a ele, podendo levar a uma confusão na localização com regiões sem defeitos;
- (c) Falhas presentes a profundidades de até 10cm não têm sua localização e dimensão claramente apontadas pelas imagens gráficas fornecidas pelo software e
- (d) A escolha dos parâmetros de ensaios é fator determinante para que se tenha uma interpretação correta e sem equívocos.

Desta forma, os estudos realizados confirmam a hipótese de que os ensaios de VPU 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. Os ensaios de VPU podem ser útil na tomada de decisão e no estabelecimento de estratégias de intervenção, visto que a falta de informação poderá aumentar o escopo e complexidade das intervenções previstas, aumentando custos ou gerando transtornos adicionais para seus usuários.

7. REFERENCIAS

Adamatti, D. S. (2013), “*Propagação da velocidade de pulso ultrassônico na análise de estruturas de concreto armado: Estudos de parâmetros tecnológicos intervenientes*”, Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

American Concrete Institute (1998), ‘*Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*’, ACI 228, 2R-98. American Concrete Institute, EUA.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), ‘*Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio*’, NBR 8802. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

Beutel, R., Reinhardt, H., Grosse, C. U., Glaubitt, A., Krause, M., Maierhofer, C., Algernon, D., Wiggenhauser, H., Schickert, M. (2006), “*Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods*” in: European NDT Conference (ECNDT 2006), 9, 2006, Berlin: The German Society for Non-Destructive Testing.

- BRITISH STANDARDS INSTITUTION, BSI 1881 - Part 203, *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, (London, UK: BSI, 1986), 20 p.
- Chies, J. A. (2014), “*Ensaaios não destrutivos em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom*”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 133p.
- Figueiredo, E. P. (2005), Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações, in: G. C. Isaia (Editor), “*Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*” (São Paulo, Brasil: IBRACON), cap.33, vol.2, p.985-1015.
- Grabowski, S. L., Padaratz, I. J., Pinto, R.C.A. (2008), “*Avaliação de Placas de Concreto com o Método Não Destrutivo do Eco-impacto*” in 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Salvador: (Brasil), 12p.
- Lima, R. A. (2005), “*Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas*”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 241p.
- Lorenzi, A. (2009), “*Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico*”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 196p.
- Lorenzi, A., Silva Filho, L. C. P., Caetano, L. F., Lorenzi, L. S. (2009), “*Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaios de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico*” in 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), 13p.
- Medeiros, A., Padaratz, I. J., Pinto, R. C. A. (2009), “*Influência da Presença de Armaduras na Estimativa da Profundidade de Fissuras Superficiais em Concreto Armado através do Ultra-som*” in 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), 14p.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*” (São Paulo, Brasil: PINI), 573p.
- Naik, T. R., Malhotra, V. M. (1991), “*The Ultrasonic Pulse Velocity Method*” in: V. M. Malhotra, N. J. Carino (Eds), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, (Boca Raton, Florida, USA: CRC Press), 343 p.
- Nogueira, C. L. (2009), “*Avaliação Ultrassônica de Dano Termo-mecânico em Concreto e Argamassa*” in 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), 10p.
- Ramirez, F. C. (2002), “*Detecção de danos em Estruturas de Concreto por meio de Tomografia Ultrassônica*”, Tesis de Maestria, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 167p.