

Analysis of reinforced concrete structures through the ultrasonic pulse velocity: technological parameters involved

Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes

D.S. ADAMATI ^a
deisesadamatti@hotmail.com

A. LORENZI ^a
alexandre.lorenzi@ufrgs.br

J. A. CHIES ^a
josuechies@gmail.com

L.C.P. SILVA FILHO ^a
lcarlos66@gmail.com

Abstract

Application of Nondestructive Testing (NDT) is an interesting strategy to monitor reinforced concrete structures conditions, especially when occur problems like admixture errors, mixing problems, conveying or placing of concrete . Among the NDT methods applicable to concrete, the Ultrasonic Pulse Velocity has been used in various fields of civil engineering due to the ease of operation, low cost, test velocity and that using this test normally do not need repair the surface analyzed. This work aims to study the influence that certain technological variables have on the results obtained through the UPV. Two concrete elements were cast at the laboratory. One element with reinforcement and another without reinforcement. Inside these elements were introduced objects to reproduce possible concrete damages. To facilitate the analysis the results are represent through several images generated by an image software and an statistical analysis software. This study confirm that the correct choice of test parameters is crucial to have a right interpretation.

Keywords: nondestructive testing, ultrasonic pulse velocity, reinforced concrete structures.

Resumo

A aplicação de Ensaios Não Destrutivos (END) é uma estratégia interessante para monitorar o estado de conservação das estruturas de concreto armado, principalmente quando ocorrem erros de dosagem, problemas na mistura, transporte ou lançamento do concreto. Dentre os métodos de END, aplicáveis ao concreto, o método de ensaio da Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico (VPU) vem sendo utilizado comumente em diversas áreas da Engenharia Civil, devido à facilidade da operação, ao seu baixo custo, à rapidez na execução dos testes e à ausência de danos ao material analisado. Este trabalho visa estudar a influência que determinadas variáveis tecnológicas exercem sobre os resultados obtidos através dos ensaios de VPU. Foram moldados em laboratório dois elementos de concreto, com dimensões próximas a estruturas reais. Um elemento com armadura nas duas faces e outro sem armadura, nos quais foram introduzidos objetos para reproduzir possíveis falhas de concretagem. De modo a facilitar a análise dos dados, os resultados são apresentados por meio de imagens geradas através de programas computacionais e análises estatísticas. Através deste estudo verificou-se que a escolha dos parâmetros de ensaios é fator crucial para que se tenha uma interpretação correta dos resultados.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, velocidade de propagação do pulso ultrassônico, estruturas de concreto armado.

^a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologias de Materiais (PPGEM), Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), Porto Alegre, RS, Brasil.

1. Introdução

A utilização de materiais de construção se confunde com a própria história da civilização, porque foi necessário ao homem servir-se deles para sobreviver e satisfazer suas necessidades de abrigo e conforto [1]. Muitas das construções em concreto armado que formam a infraestrutura civil estão se aproximando do final de sua vida útil de projeto. Conseqüentemente, existe uma preocupação crescente sobre seu estado de deterioração e segurança [2]. No atual cenário, em que as exigências de qualidade estão se firmando, é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. A aplicação de (END) é uma estratégia interessante para monitorar o estado dessas estruturas, principalmente quando ocorrem falhas, erros de dosagem, mistura, transporte e lançamento do concreto.

Dentre os END mundialmente utilizados, o método de VPU foi desenvolvido tendo como objetivo principal a obtenção de curvas de correlação entre a VPU no concreto e a sua resistência à compressão. Todavia a técnica de mapeamento de VPU tem sido amplamente utilizada, devido à sua facilidade de execução, rapidez e excelente capacidade de detecção de falhas, fatores que permitem efetuar uma varredura completa e adequada do concreto. Desta forma, diversas pesquisas relacionadas ao concreto utilizam os ensaios de VPU para avaliação, por exemplo, da degradação das propriedades mecânicas do concreto e da argamassa [3], da influência da presença de armaduras na estimativa da profundidade de fissuras superficiais [4], para monitoramento de estruturas de concreto armado [5], para avaliação da resistência à compressão [6] e para avaliar a resistência do concreto através de Rede Neurais Artificiais[2].

Apesar dos diversos estudos realizados sobre os ensaios de VPU, ainda existe uma série de dúvidas sobre a acurácia dos resultados do ensaios em inspeção em campo. Este trabalho busca a elucidação de dúvidas existentes quanto ao uso e operação do equipamento de ultrassom em situações de campo, apesar de muitas pesquisas desenvolvidas em laboratório, com corpos-de-prova, demonstrarem uma boa capacidade de detecção de falhas de concretagem e estimativa de resistência à compressão do concreto. Este fato ocorre, porque algumas variáveis irão interferir nos resultados, de maneira distinta, principalmente quando utilizadas em elementos com dimensões próximas às reais.

O objetivo desta investigação consiste em apresentar o resultado de uma pesquisa experimental que visa estudar a influência que as variáveis tecnológicas exercem sobre os resultados obtidos por meio de ensaios de VPU. O presente trabalho está focado em descobrir quais as limitações das leituras de VPU e qual o grau de interferência das mesmas nos resultados, quando em condições reais. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram moldados em laboratório dois elementos de concreto denominados parede 1 e parede 2, com dimensões próximas a estruturas reais. Têm-se um elemento sem armadura (parede 1) e outro com armadura nas duas faces (parede 2), nos quais foram introduzidos objetos para reproduzir possíveis falhas de concretagem.

A normatização vigente e os artigos publicados não expressam de forma clara e objetiva a capacidade de detecção de falhas e a posterior interpretação dos resultados obtidos nas leituras com o

aparelho de ultrassom, tanto *in situ* quanto em ambiente de laboratório. Sendo assim, torna-se necessário a realização de experimentos que possam gerar fatores de correlação para viabilizar e potencializar a confiança dos resultados de testes de VPU. Desta forma, busca-se com este estudo mitigar questões relativas as diferentes variáveis tecnológicas, proporcionando uma melhor compreensão dos resultados obtidos através dos ensaios de VPU em estruturas de concreto.

2. Ensaios não destrutivos

Ensaio considerado não destrutivo são aqueles que não causam nenhum dano ao elemento ensaiado ou deixam pequenos danos para serem reparados após o ensaio, não provocando, assim, perda da capacidade resistente do elemento. No caso de estruturas novas, esses ensaios podem ser empregados para monitoramento da evolução da resistência e para esclarecer dúvidas sobre a qualidade do concreto. Em estruturas já existentes, visam a avaliar a integridade da estrutura. Segundo Evangelista [7], existem algumas propriedades do concreto que podem ser avaliadas com o uso de END, dentre elas podemos citar: massa específica, módulo de elasticidade e resistência à compressão. Também pode ser investigada a dureza superficial, a absorção, a permeabilidade, as condições de umidade, a localização das armaduras, a existência de vazios e a fissuração.

O documento TCS-17, da Agência Internacional de Energia Atômica [8], aponta várias situações específicas associadas à construção civil, nas quais a utilização de métodos de END pode ser considerado atraente:

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

Kumar e Santhanam [9] afirmam que, hoje, o objetivo principal do emprego de técnicas de END na construção civil está associado, na maioria das vezes, à localização e à avaliação da importância de falhas e defeitos em estruturas de concreto endurecido. Já Valluzzi et al. [10], consideram a aplicação desses métodos muito útil para programas de diagnóstico mais complexos, pois

isso possibilita a identificação de regiões onde a presença de deficiências é mais provável. Breysse et al. [11] também lembram que alguma perda de desempenho ou deterioração do nível de segurança do material induz custos de manutenção importantes. Segundo Lorenzi [5], vários destes métodos de ensaio são eficientes e precisos, dentre os quais o ensaio de VPU alia flexibilidade, baixo custo, grande capacidade de detecção e boa capacidade de fornecimento de informações sobre o concreto, sendo um método bastante utilizado para a análise de estruturas de concreto.

2.1 Fatores intervenientes na propagação da velocidade do pulso ultrassônico

A norma brasileira NBR 8802 [12], prescreve que vários fatores influenciam nos resultados de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, destacando os principais:

O tamanho e a forma do elemento não afetam a velocidade de propagação. No entanto, a equação utilizada para calcular a velocidade do ultrassom em materiais sólidos é válida somente para dimensões infinitas. Esta condição, na prática, fica atendida se a dimensão lateral do elemento em estudo for, pelo menos, igual ao comprimento de onda do pulso transmitido. Valores inferiores a esse comprimento reduzirão a precisão dos resultados.

As velocidades de pulso geralmente não são afetadas pelo comprimento do percurso da onda, desde que não seja excessivamente pequeno. Neste caso, a natureza heterogênea do concreto se torna importante. Limitações físicas no equipamento medidor de tempo podem também introduzir erros, em que pequenos comprimentos de percurso são envolvidos. Em estudos anteriores, concluiu-se que a velocidade medida diminui com o aumento do comprimento do percurso da onda.

Várias Normas técnicas indicam cuidados especiais com a superfície do concreto, a fim de conservá-la lisa e limpa, objetivando-se conseguir o acoplamento perfeito dos transdutores no concreto. Seguindo a NBR 8802 [12] apresenta procedimentos para o caso da necessidade de regularização da superfície por processo mecânico ou com o emprego de pasta de cimento, gesso ou resina epóxi, em espessura mínima possível.

Segundo Lorenzi et al. [5], devem ser evitadas superfícies muito rugosas ou que tenham recebido algum acabamento, pois as propriedades do concreto na camada principal não são necessariamente as mesmas do seu interior. Para superfícies curvas, Chung e Law [13], indicam o emprego de transdutores de ponto de contato seco.

Estudos realizados por Hamassaki [14], Carcaño e Pereyra [15], indicam que a variação do tipo de agregado afeta a velocidade do pulso para concretos com resistência à compressão semelhante. Em estudos com o emprego de brita calcária, Carcaño e Pereyra [16], apuraram que as medidas de valores de VPU para um mesmo nível de resistência à compressão do concreto foram maiores para os agregados que apresentaram melhores propriedades físicas em termos de densidade, absorção e resistência ao desgaste. Nos estudos realizados sobre a influência da dimensão máxima do agregado graúdo na VPU, Evangelista [7], constatou que, em uma série de diâmetro máximo (Dmáx.) de 19 mm, as VPU foram de 2,5% a 11% maiores do que para a série com Dmáx. = 9,5 mm, na qual foi mantida a proporção desses agregados nas séries dos

concretos, a fim de evitar qualquer interferência advinda da variação da quantidade do agregado.

Rodrigues e Figueiredo [16] também constataram esse efeito em seus estudos com corpos-de-prova cilíndricos de concreto (15 cm x 30 cm), nos quais foram produzidos dois concretos semelhantes, utilizando agregado graúdo com densidades diversas. Concluíram que os concretos moldados com agregado de maior densidade apresentaram maiores valores de VPU do que aqueles moldados com agregado graúdo de menor densidade. Elvery e Ibrahim [17] afirmam que a correlação entre a resistência à compressão e VPU sofre influência expressiva pelas variações na quantidade de agregados no concreto, devido ao módulo de elasticidade do agregado ser superior ao da pasta de cimento. Com aumento do volume de agregado no concreto, mantendo-se os demais parâmetros constantes, a velocidade do pulso tende a ser maior.

De acordo com Evangelista [7], alguns estudos indicam que, nas primeiras 24 horas, a VPU no concreto é influenciada pelo tipo de cimento. No entanto, em seu estudo com concretos com cimento Portland comum (CP III) e o de alta resistência inicial (CP V), não se observou grande diferença entre os valores da velocidade do pulso nos ensaios com idade igual ou superior a três dias.

Segundo Costa [18], existem alguns fatores que podem interferir no resultado final do ensaio, dentre eles a natureza do material acoplante. Deve-se entender como acoplante o material que se aplica às superfícies dos transdutores antes de colocá-los em contato com o concreto avaliado. A sua função é promover a homogeneização da superfície de concreto, que receberá os transdutores e evitará a penetração de ar durante o ensaio.

Pelo fato de o aparelho de ultrassom não ter sua utilização automatizada, dependendo da sensibilidade humana, a NM 58:1996 [19] salienta que o ensaio deve ser realizado por pessoal experiente na aplicação desta técnica. O plano de trabalho, a análise e a interpretação dos resultados devem ser realizados por profissional responsável e qualificado.

No caso do concreto não apresentar armaduras, fissuras ou vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho. Se existem armaduras localizadas paralelamente ao caminho das ondas, dependendo da proximidade dos transdutores, as ondas podem transitar parte através do concreto e parte através do aço [7].

Segundo Naik et al. [20], no concreto armado a velocidade do pulso próxima das armaduras é superior àquela do concreto simples de mesma composição, atingindo um valor em torno de 40% a 70% maior, chegando à ordem de 5900 m/s no aço, para um meio sólido e infinito. Medeiros [21], afirma que barras de aço paralelas à direção das leituras com o ultrassom pelo modo de transmissão indireto podem influenciar nos resultados dos ensaios de VPU. A presença de falhas, fissuras ou vazios no interior do concreto ocasionam a obstrução da trajetória de propagação da onda incidente, deslocando-a através da periferia do defeito, resultando em maior tempo de propagação. Esse efeito pode ser usado para localização de defeitos maiores que 100 mm de diâmetro ou profundidade, já que defeitos menores geralmente não ocasionam efeitos significativos sobre o tempo de propagação[22].

Segundo Evangelista [7], há um comprimento mínimo para propagação das ondas a fim de evitar que os transdutores fiquem muito próximos, pois, neste último caso, os resultados seriam significativamente influenciados pela heterogeneidade do concreto. Para a

análise das estruturas de concreto, são apropriados transdutores com frequências entre 20 e 150 kHz, sendo o mais utilizado o de 54kHz, disponível comercialmente em diversos países. A escolha da frequência do transdutor decorre do tamanho do elemento estrutural a ser investigado. Contudo, a ligação entre o concreto e o transdutor é um ponto crítico do método, bem como a interpretação dos resultados, que pode se tornar uma tarefa difícil.

3. Materiais e métodos

Com o objetivo de identificar e quantificar a influência de determinadas variáveis nos resultados de VPU, o programa experimental buscou averiguar como se comportam esses ensaios em dois elementos confeccionados em concreto (denominados de paredes 1 e 2), no interior dos quais foram introduzidos vazios (falhas de concretagem) de forma artificial (Figura 1). O desenvolvimento da pesquisa se deu nas dependências do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LEME/UFRGS), envolvendo a utilização de um conjunto amostral moldado e avaliado pela equipe técnica do laboratório. Para a confecção desses elementos, foram utilizados materiais com características específicas, descritas abaixo.

3.1 Formas

Para confecção dos elementos, foram feitas formas com a utilização de compensado plastificado, de maneira a representar uma estrutura real. Decidiu-se por produzir as formas na horizontal, facilitando a concretagem dos elementos. Na superfície em contato com o compensado, obteve-se uma face bastante lisa, simulando superfícies como: cortinas, fundo de lajes, pilares e vigas. Na outra face, que foi desempenada, obteve-se uma superfície mais rugosa, que simula blocos de fundação, pisos e qualquer superfície que não apresente um acabamento ideal para leituras com ultrassom. As figuras 2(a) e (b) ilustram, respectivamente, as formas sem armadura e com armadura, utilizadas para confecção das paredes.



Figura 1
Posição dos elementos de isopor

As dimensões foram definidas em 1,70 m x 1,70 m x 0,60 m, assim possibilitando diferentes distâncias entre transdutores, desde leituras pequenas até a distância máxima possível para um operador conseguir trabalhar de forma ergonomicamente correta.

As formas tem uma profundidade de 60 cm, com o intuito de simular elementos robustos, possibilitando avaliar a capacidade do aparelho de ultrassom de interceptar falhas de concretagem em diferentes profundidades.



Figura 2
(a) Parede sem armadura (b) parede com armadura

3.2 Concreto

Para a confecção das paredes, utilizou-se concreto dosado em central concreteira, transportado através de caminhão betoneira. A resistência característica à compressão (F_{ck}) foi definida em 30 MPa, por ser uma resistência bastante usual em grande parte das obras.

3.3 Armadura

A maior parte das estruturas de concreto possuem armaduras. Assim, com o intuito de avaliar a influência das mesmas sobre as leituras de VPU, foram utilizadas duas malhas de aço com densidade de armadura relativamente alta, composta por barras de aço estrutural do tipo CA-50 com diâmetros de 12,5 mm, e espaçamento de 15 cm.

3.4 Vazios

A presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar. A interpretação é baseada no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos pode ser correlacionado com a densidade do material.

Para representação da existência de vazios e falhas de concretagem, foram utilizadas esferas de isopor com dimensões que variaram entre 5, 10 e 15 cm, em diferentes posições no interior das paredes. O uso do isopor justifica-se devido à sua densidade, que é bastante inferior à do concreto, não permitindo a penetração de pasta de cimento em seu interior. Todas as esferas de isopor foram fixadas por meio de fio de nylon, para que cada uma permanecesse no local estabelecido, evitando a interferência de uma sobre a outra.

3.5 Concretagem dos elementos

Para a concretagem, foi utilizado um vibrador tipo agulha. O tempo de lançamento do concreto foi de 2 horas. Foram tomados os devidos cuidados para evitar o deslocamento dos vazios (esferas de

isopor). Nas figuras 3(a) e (b), apresentam-se, respectivamente, a concretagem do elemento sem armadura e a concretagem do elemento com armadura.

No momento da concretagem, as condições de temperatura e umidade eram de 13°C e 70% de umidade. Após o lançamento total do concreto, os elementos permaneceram armazenados no interior do laboratório, em local coberto, bem ventilado e sem exposição à ação direta de intempéries.

3.6 Variáveis tecnológicas de influência nos ensaios

Diversas são as variáveis que exercem influência nos resultados dos END para o concreto na determinação da VPU. Para esta pesquisa, as variáveis tecnológicas escolhidas são as seguintes:

3.6.1 Distância entre os transdutores

Nos ensaios de determinação da VPU, serão realizadas medições com a variação da distância entre os transdutores (grid). Considerando as distâncias entre os diversos pontos de medição nos ensaios, realizados com o emprego do método de leitura indireto, buscou-se identificar se existe uma correlação entre o refinamento da malha e a capacidade de detecção de vazios através do método de VPU. Para isso, foram utilizadas, distâncias de 25, 50 e 75 cm.

3.6.2 Presença da armadura

Buscou-se verificar a influência da presença da armadura nestes ensaios e quantificá-la.

3.6.3 Operadores

Devido ao fato de a NBR 8802 [11] indicar que o acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores devem ser considerados satisfatórios, analisou-se a influência de operar o aparelho de ultrassom com dois operadores, com o objetivo de identificar



Figura 3

(a) concretagem das formas sem armadura e (b) concretagem das formas com armadura

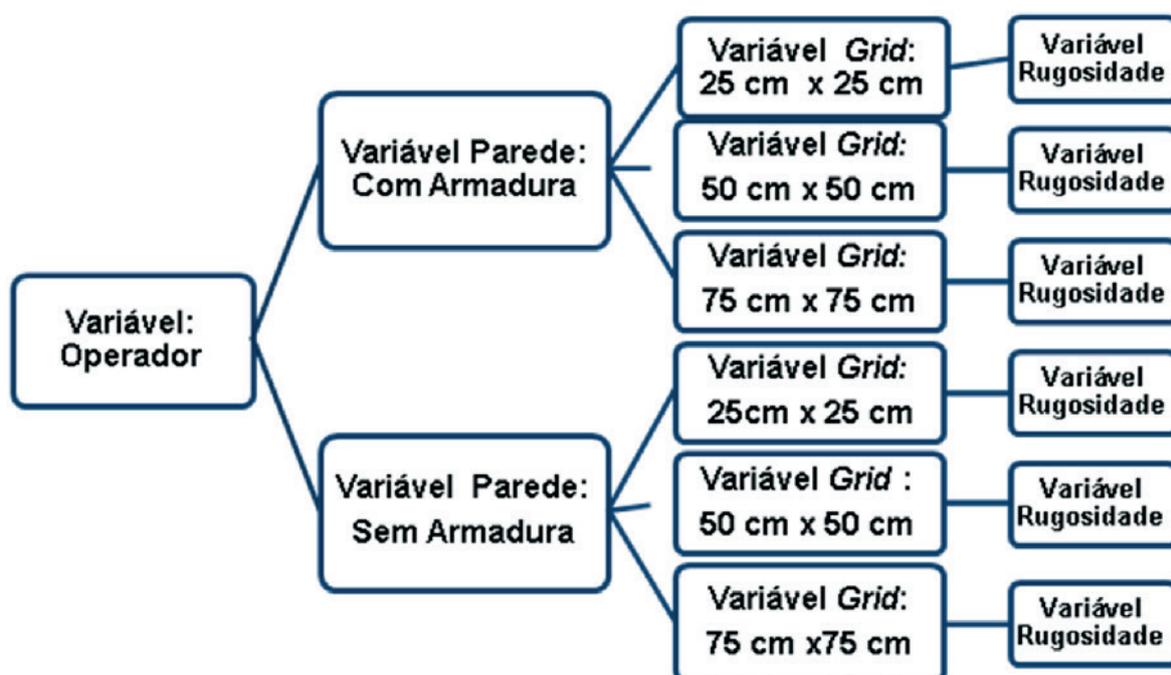


Figura 4
Processo de leituras

se há diferença entre as pressões aplicadas por cada operador, visto que ensaios de VPU ainda dependem da operação humana, não sendo ensaios automatizados. Estruturas de grande porte demandam diversos operadores executando medições simultaneamente, já que existe grande número de pontos necessários, o que justifica esta análise.

3.6.4 Condições da superfície a ser ensaiada

Executou-se os blocos formando uma superfície lisa e outra rugosa, para analisarmos qual a influência desta variável em ambas as paredes.

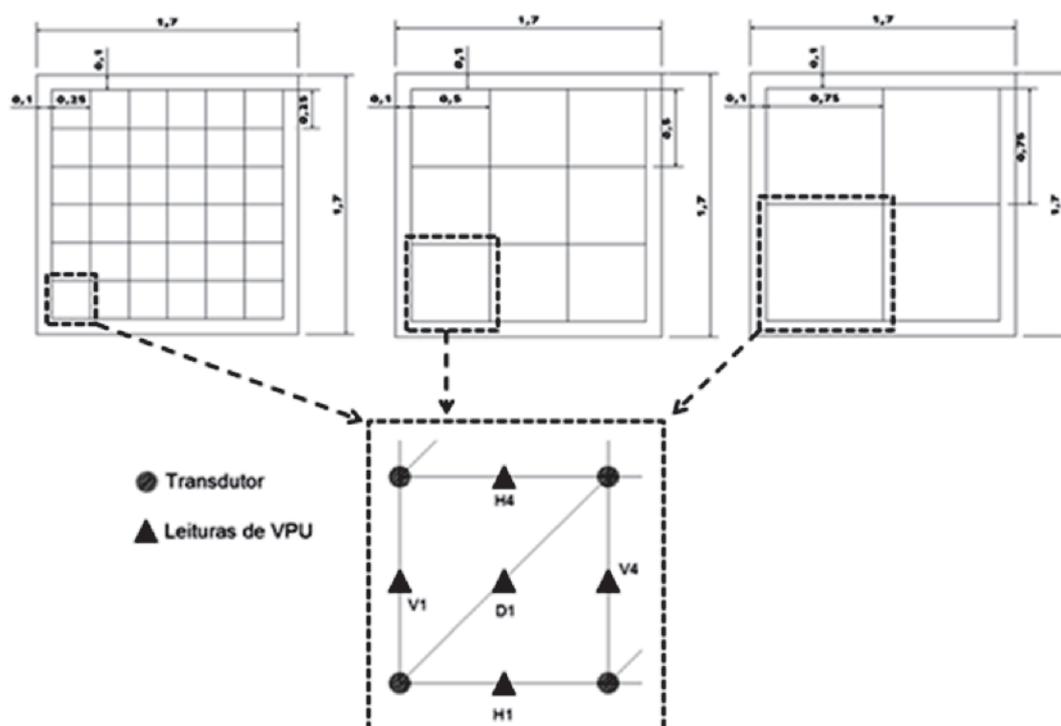


Figura 5
Procedimento de leituras

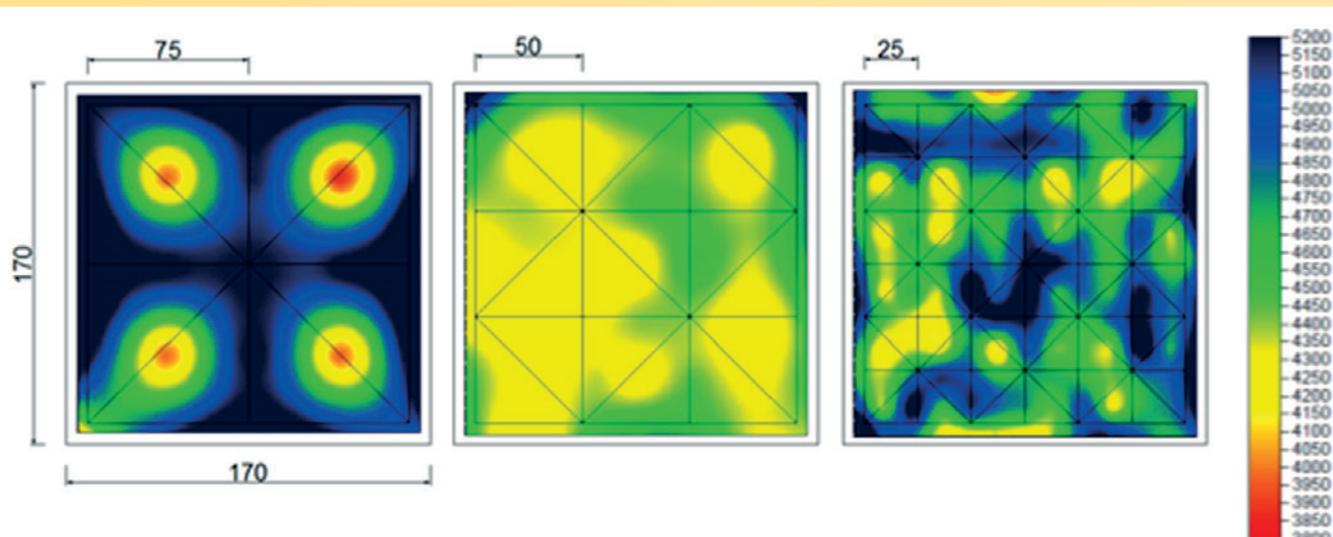


Figura 6
(a) Grid 75 x 75 cm (b) Grid 50 x 50 cm e (c) Grid 25 x 25 cm

3.7 Processos de leituras

Para iniciar as leituras de VPU, foi esperado o tempo mínimo de 28 dias a partir da concretagem, de forma a minimizar a influência da variação da resistência do concreto nas medidas de VPU. Foram feitas leituras indiretas conforme orientações da NBR 8802 [12]. Para o acoplamento dos transdutores, utilizou-se gel. Na Figura 4, são apresentadas as combinações das leituras realizadas. De acordo com o processo de leituras apresentado, foram mapeadas as duas paredes, com leituras horizontais, verticais e diagonais em torno de cada ponto. Essas leituras foram agrupadas, gerando o que se denominou quadrantes de leitura. No momento da execução dos ensaios, utilizaram-se pontos pré-de-

terminados, para localizar de maneira precisa, em um mapa, o tempo que a onda leva para percorrer o caminho entre o transdutor-emissor e o transdutor-receptor de acordo com sua respectiva coordenada na estrutura analisada. A Figura 5 representa como se obtém um conjunto de leituras posicionadas a partir de um grid selecionado. Com os valores de VPU obtidos, as variações de velocidade foram mapeadas graficamente através de programa computacional gerador de imagens. Posteriormente, foram realizadas análises estatísticas, para a validação do método.

4. Análise dos resultados

Serão apresentadas as análises dos resultados obtidos com os

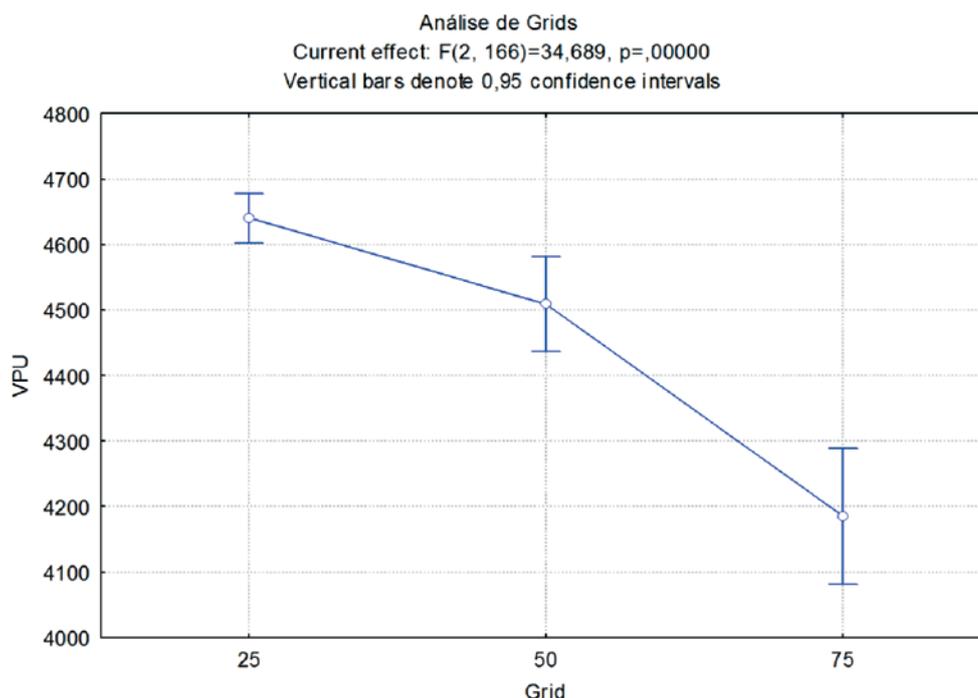


Figura 7
Influência de diferentes grids

ensaios. Inicialmente, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de controle. Em seguida, são destacados os resultados referentes às questões sobre as variáveis tecnológicas, que se dividem em efeitos do tamanho do grid, da presença de armadura, do operador e da rugosidade superficial. Na parte final, é apresentada as interferências que a presença de falhas no concreto, possivelmente gerou nos resultados.

4.1 Resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de controle

Para o controle do concreto utilizado na confecção das paredes, foram ensaiados 6 corpos-de-prova de 10x20 cm para cada bloco. O resultado da resistência à compressão atingiu valor médio de 50 Mpa, com um coeficiente de variação de 5%. Como pode ser observado, o concreto obteve resistência superior ao f_{ck} especificado, que era de 30 MPa. Entretanto, os resultados obtidos, mesmo diferentes da especificação, não inviabilizaram a pesquisa.

4.2 Análise do efeito das variáveis tecnológicas estudadas

As leituras de VPU foram iniciadas aos 28 dias a contar da concretagem e duraram cerca de uma semana. Inicialmente, foram efetuadas várias tomadas de dados, para que se pudesse avaliar o efeito de cada uma das variáveis tecnológicas selecionadas para o estudo. Nas figuras 6, 8, 10, 12 e 14 é possível visualizar claramente as regiões mais quentes (em vermelho), que indicam valores inferiores de VPU, e as regiões mais frias (em azul), que indicam zonas de VPU com valores mais elevados.

De forma a possibilitar a comparação entre os dois elementos de concreto utilizados nesta pesquisa, as variáveis foram analisadas a partir dos resultados obtidos pelo operador com experiência (presença de armadura, rugosidade e presença de falhas). Excetua-se neste caso a variável operador, que foi realizada por dois operadores diferentes, um com experiência no ensaio e outro em fase de treinamento.

4.2.1 Tamanho do grid de leitura

Como discutido no item 3, foram utilizados três espaçamentos de malha, visando a determinar mudanças no tipo de resposta obtido por meio do mapeamento dos dados em relação à identificação de defeitos. Nas figuras 6 (a), (b) e (c), podem-se verificar, respectivamente, as imagens geradas nos grid de 75 cm, 50 cm e 25 cm, que foram realizadas na parede sem armadura e com a face lisa.

No grid de 25 cm obtém-se um total de 120 leituras, no grid de 50 cm, 33 leituras, e no grid de 75 cm, 20 leituras, todas indiretas. Como se pode observar, a imagem gerada com grid de leitura de 25 cm possibilitou melhor representação das diferentes regiões, obteve-se regiões mais definidas quando comparadas com as imagens obtidas com leituras de 50 cm e 75 cm. Desta forma, para as análises dos efeitos das diferentes variáveis utilizou-se o grid de leitura de 25 cm.

Os valores da VPU obtidas ficaram compreendidas entre 4300 e 4800 m/s, que correspondem a concretos de excelente qualidade. De maneira geral, a escolha do grid influencia significativamente a interpretação de possíveis regiões comprometidas em um maciço de concreto. Porém, essa interpretação e a escolha do grid são fortemente ligadas à magnitude do problema a ser localizado. Grids mais refinados têm a capacidade de detecção de defeitos mais sensíveis. No entanto, quando o diagnóstico de uma estrutura é a busca de extensões mais significativas, grids menos refinados já são suficientes e facilitam tanto a execução dos ensaios quanto as suas análises. Para evidenciar as diferenças entre grids apresentados pela figura 6, foi realizada uma análise estatística por variância (ANOVA), com o intuito de comparar as VPU obtidas para os diferentes grids propostos. A Figura 7 apresenta graficamente os resultados obtidos.

Podemos observar que a análise nos dá uma probabilidade próxima de zero (com nível de significância de 95%), mostrando que são significativas as diferenças de VPU, quando se altera a distância entre os transdutores. Com o aumento do grid, apresenta-se uma tendência de redução da VPU, independente da presença ou não de armadura. Esse resultado destaca a importância da

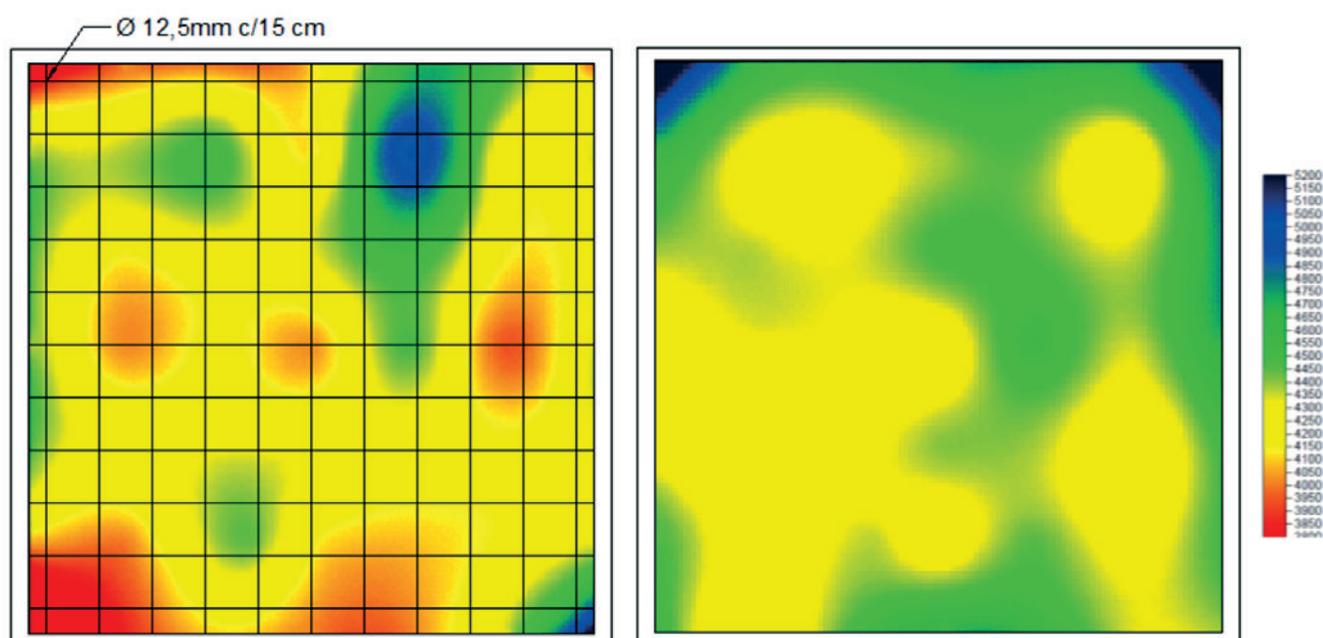


Figura 8

(a) Imagens geradas na parede com armadura (b) Imagens geradas na parede sem armadura

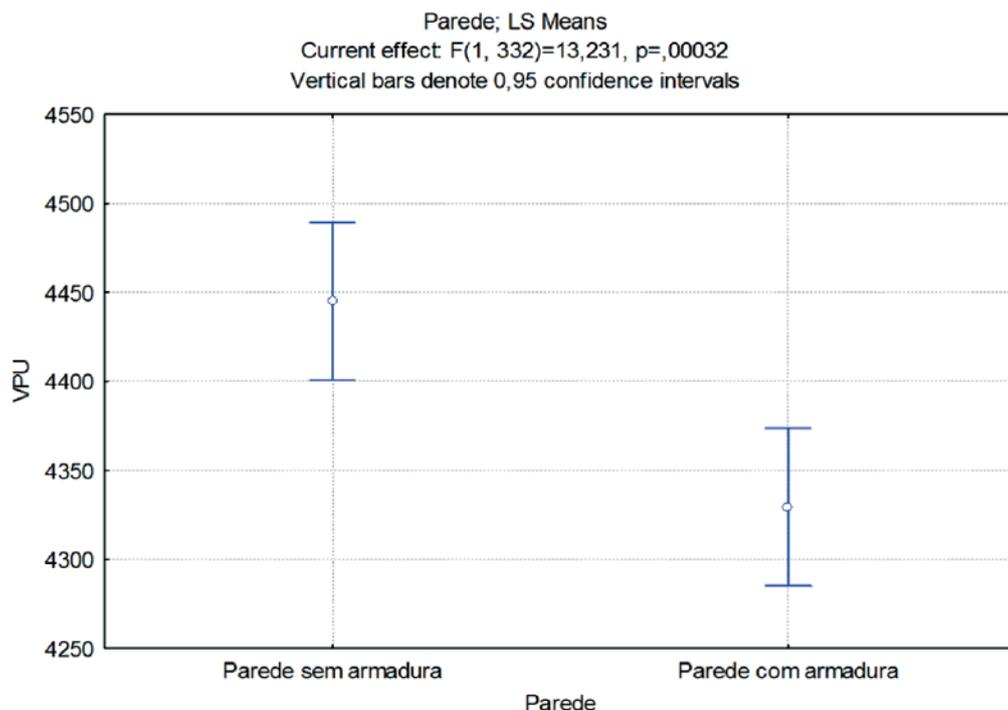


Figura 9
Influência da presença de armadura

manutenção de uma mesma distância entre transdutores, quando estiver sendo realizado um levantamento da homogeneidade de uma estrutura de concreto. A mescla de distâncias dentro de uma mesma estrutura não é indicada, já que pode colocar em risco as análises, podendo gerar interpretações erradas, oriundas da redução da velocidade com o aumento da distância, e não de uma região suspeita necessariamente.

4.2.2 Presença de armadura

Apesar de diversos autores já terem estudado a influência da pre-

sença da armadura na VPU, este trabalho tem como diferencial apresentar elementos em tamanho e taxa bastante próximas das utilizadas diariamente nos canteiros de obra.

As figuras 8(a) e (b) apresentam, respectivamente, as imagens geradas de paredes com armadura e de paredes sem presença de armadura.

Analisando visualmente as imagens, percebem-se algumas diferenças de coloração. Essas diferenças, apesar de representarem apenas uma redução sensível, são significativas na média das velocidades obtidas na parede com presença de armadura.

Esse comportamento não é apenas contrário ao que outros

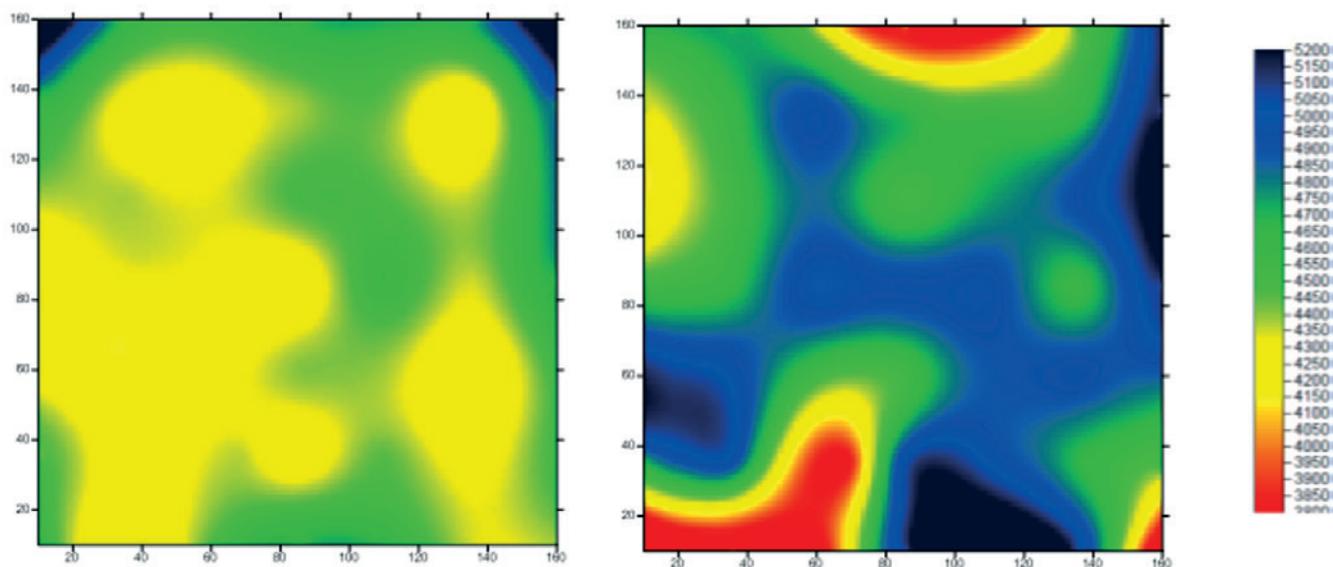


Figura 10
(a) Imagens geradas da parede, com operador com experiência (B) imagens geradas da parede com operador em fase de treinamento

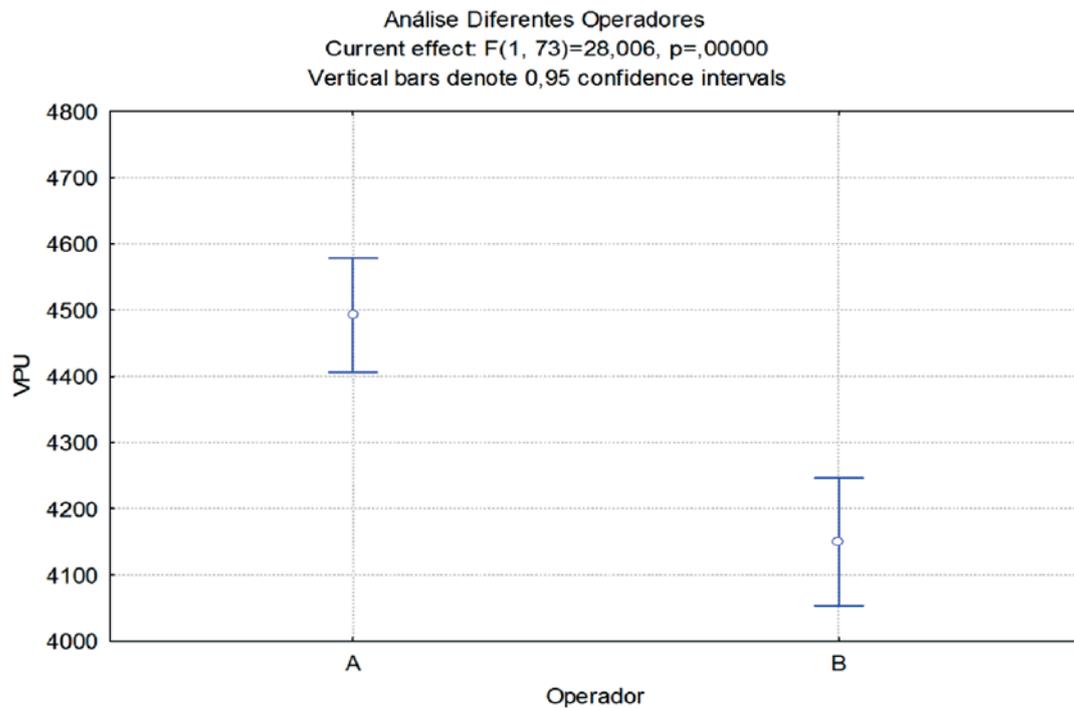


Figura 11
Influência de diferentes operadores

autores afirmam, mas também é contrário à hipótese inicial da presente investigação. Já em relação à homogeneidade das paredes, a presença de armadura não prejudicou a interpretação das imagens, visto que o mapeamento de regiões com diferentes velocidades foi semelhante nas duas configurações propostas. A Figura 9 apresenta a análise estatística que avalia a significância da presença de armadura na análise da VPU.

Podemos observar, a partir do gráfico acima, uma leve tendência de as velocidades na parede sem armadura serem maiores do que na parede com presença de armadura. Logo, quando todos

dados foram submetidos a uma análise estatística, a presença de armadura utilizada acarretou alterações significativas nas VPU, reduziram-se as VPU com nível de 95% de significância.

4.2.3 Operador

Foram realizadas, também, comparações relativas ao uso do aparelho de ultrassom por diferentes operadores. Esse fator é relevante, pois as análises de campo demandam, muitas vezes, diversos operadores trabalhando simultaneamente. A Figura 10

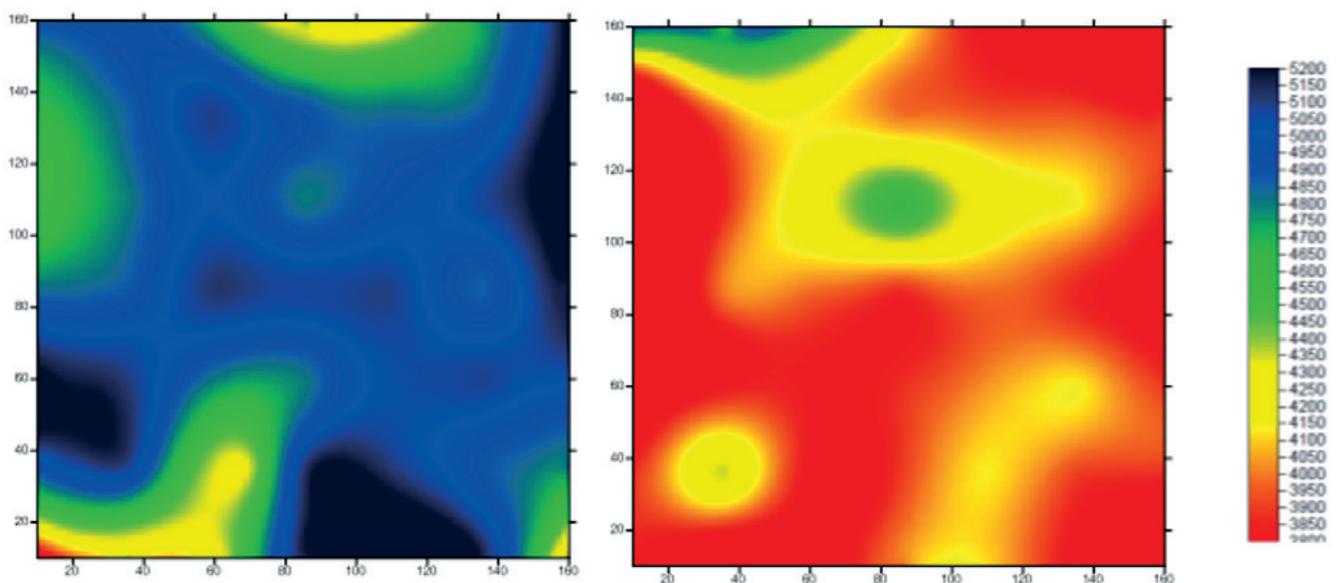


Figura 12
(a) Imagens geradas da parede com superfície lisa (b) Imagens geradas da parede com superfície rugosa

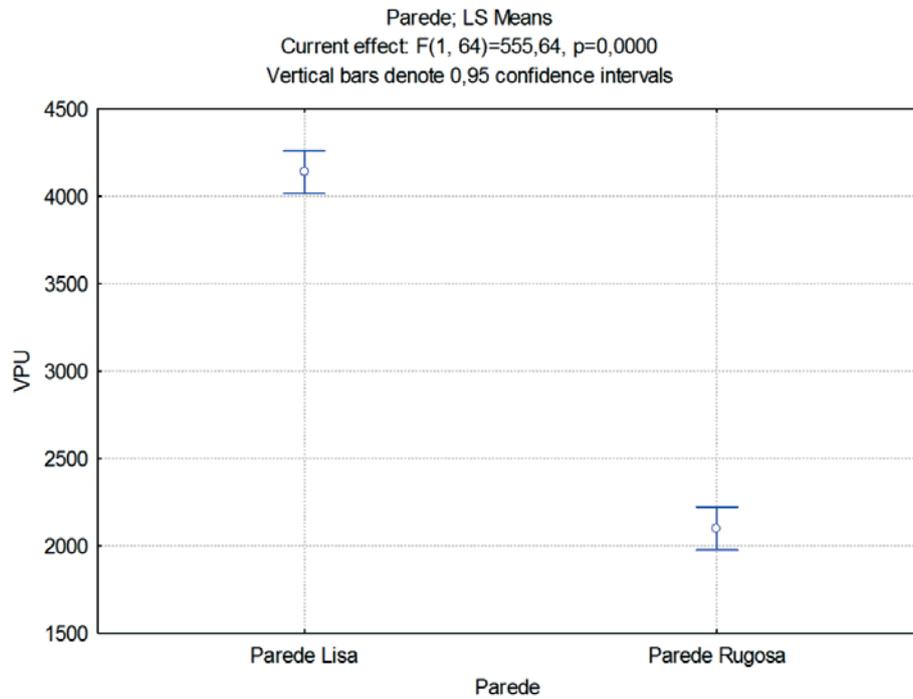


Figura 13
Influência de diferentes superfícies

apresenta duas imagens geradas a partir de velocidades de dois operadores, um com experiência em trabalhos anteriores e outro em fase de treinamento, Figura 9(a) e (b). Ambas as leituras foram realizadas na parede sem presença de armadura.

Analisando a Figura 9, podemos observar que, quando as leituras são feitas pelo operador com experiência, a imagem se mostra bem mais regular, tanto nas cores como na média das velocidades. Já no caso do operador sem experiência, foram geradas ve-

locidades mais baixas e regiões que poderiam ser interpretadas como tendo problemas existentes no interior do concreto. Para comprovar esse efeito, a Figura 10 apresenta a análise estatística feita a partir de todas as velocidades obtidas por cada um dos operadores na análise da mesma parede.

A análise da Figura 11 comprova exatamente o que já havia sido verificado nas interpretações das imagens geradas pelo programa computacional, nas quais o operador sem experiência obteve ve-

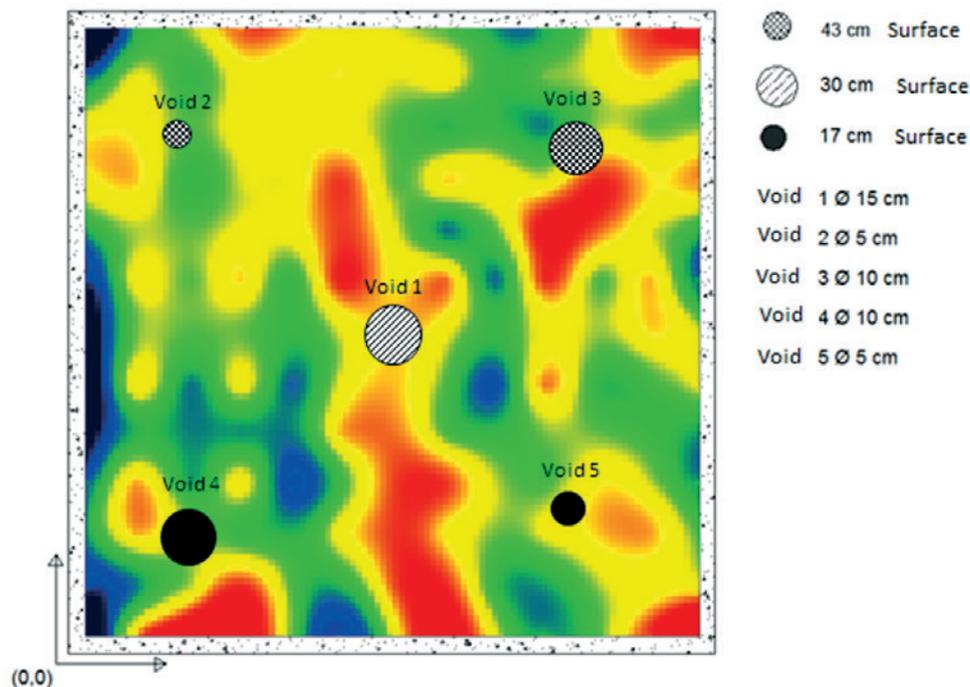


Figura 14
Imagem gerada através de uma combinação de parâmetros para identificação de vazios

locidades significativamente inferiores às do operador com experiência, gerando diferenças em média de 300 m/s. A partir disso, conclui-se que é de suma importância, para futuros trabalhos de inspeção em campo, o treinamento da equipe que irá executar esses trabalhos. Esse treinamento não deve se limitar somente à equipe que executará o ensaio, mas deve contemplar, também, a equipe que interpretará os resultados. Como se pode observar, a falta de treinamento de um profissional pode comprometer a análise de uma estrutura, ou parte dela, condenando-a, mesmo que esta, na realidade, esteja em perfeitas condições.

4.2.4 Rugosidade superficial

Outro parâmetro de ensaio estudado foi a rugosidade da superfície disponível para as leituras de VPU. Foram estudadas duas rugosidades distintas, uma bastante propícia para o ensaio, sendo ela a lisa, e a outra com rugosidade bastante acentuada, porém, mais encontrada em situações de inspeções in situ. As figuras 12(a) e (b) mostram a influência das superfícies lisa e rugosa, respectivamente.

Podemos observar que as leituras executadas por um mesmo operador, na mesma estrutura, porém com rugosidades superficiais distintas, são significativamente diferentes. Com a imagem gerada a partir das velocidades obtidas na superfície rugosa, pode-se concluir que essa configuração inviabiliza qualquer interpretação, devido a todo ruído causado por essas irregularidades na propagação da VPU. A Figura 13 apresenta graficamente a comprovação desse efeito.

Podemos concluir, a partir do gráfico apresentado, que a rugosidade na superfície do concreto influencia significativamente os valores de VPU, causando a redução dos mesmos. Visto isso, conclui-se que, nas situações em que leituras são feitas nestas condições, é imprescindível a regularização da estrutura analisada, através de meios de desgaste mecânico, principalmente nos pontos onde os transdutores entrarão em contato com a superfície.

4.3 Identificação de possíveis falhas

Com relação à localização de vazios no interior do concreto, dentre as diversas variáveis estudadas, a Figura 14 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 25 cm e face lisa.

Fica evidenciado que existe uma região com velocidades abaixo da média geral, exatamente no centro da parede, onde foi introduzido um vazio de tamanho considerável, se comparado às dimensões do elemento analisado, representado na Figura 14 pelo vazio 1. Devido ao tamanho do vazio (15 cm), regiões abaixo e acima dele tiveram as leituras de VPU afetadas, como é possível observar.

A vantagem da utilização de um grid mais refinado é exatamente a possibilidade da localização mais aproximada dos defeitos. Defeitos menores também podem ser localizados através dessa configuração, porém não com a mesma exatidão que ocorre com o vazio 1, localizado no centro. Este é o caso dos vazios 3 e 4, nos quais a imagem apresenta regiões com velocidades médias inferiores, mesmo que as esferas de isopor tenham sido deslocadas da posição original durante a concretagem. Já o vazio 5 foi

identificado com precisão, embora a imagem apresente de forma pouco clara essa diferença de velocidades. O vazio 2 foi o único defeito que o método não conseguiu detectar, provavelmente pela combinação entre o tamanho reduzido e a profundidade em que ele se encontrava. Apesar de algumas incertezas, a análise através da geração de imagens indica algumas tendências semelhantes às que teriam sido produzidas durante a investigação de uma estrutura real.

Dessa forma, tem-se a garantia de que, com o auxílio da ferramenta adequada para realizar a análise, consegue-se visualizar regiões do concreto nas quais há diferenças na homogeneidade. Contudo, deve-se levar em conta o tamanho da superfície de concreto que será analisada, para determinar o tamanho da malha de ensaio ao tamanho da superfície e à magnitude das heterogeneidades a serem localizadas. Com esta investigação, torna-se viável inferir a capacidade de detecção de heterogeneidades no concreto de estruturas reais, através da utilização de VPU, combinado com a geração de imagens de um software apropriado, confirmando, assim, o potencial de utilização da VPU nos casos de inspeção de estruturas.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar as influências que diversos parâmetros acarretam nos resultados do ensaio de VPU. Nestes ensaios, foram verificadas variáveis operacionais como: diferenças de grids, operadores com níveis de experiência diferenciados, superfícies distintas, e a presença ou não de armadura. 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 significância da dimensão do defeito em seu interior. Na situação em análise, o tamanho do grid teve influência significativa nas leituras, sendo que o grid mais refinado (25 cm) apresentou os melhores resultados com relação às velocidades médias e à interpretação das imagens.
- Constatou-se que a presença de armadura alterou significativamente as velocidades médias obtidas, reduzindo a velocidade, estando em desacordo com o que já fora publicado por muitos autores.
- 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.

A escolha criteriosa de parâmetros de ensaio possibilita uma interpretação completa da qualidade de estruturas de concreto. Para a localização de vazios, a composição dos parâmetros parede sem armadura, face lisa, grid 25 cm e operador com experiência foi a que apresentou de maneira mais clara e objetiva as regiões que, de fato, continham defeitos no interior.

O ensaio de VPU apresenta diversas vantagens para a avaliação de estruturas. Todavia, a escolha dos parâmetros de ensaios é fator determinante para que se tenha uma interpretação correta e sem equívocos. É importante ressaltar que todas as conclusões obtidas nesse trabalho dizem respeito exclusivamente ao elemento estudado.

Fisicamente, sabe-se que deve haver uma relação entre compacidade e resistência à compressão. Todavia, a natureza complexa e heterogênea do concreto torna a modelagem desta relação uma tarefa árdua. Um grande número de variáveis, potencialmente, afeta a correlação de resultados de compacidade, obtidos via pulso ultrassônico, e de resistência à compressão do concreto. A análise dos dados obtidos por VPU permite que se obtenham parâmetros para avaliar as características das estruturas de concreto. O ponto crucial para que se possa utilizar o VPU para a análise de estruturas de concreto é a interpretação dos resultados obtidos.

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. A utilização do VPU pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção. De forma geral, os estudos de caso reforçam a idéia de que a utilização de VPU são ferramentas úteis para a análise de estruturas. 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.

O estudo em questão indica que ensaios de VPU são ferramentas sensíveis a variações de homogeneidade e densidade, podendo, portanto, fornecer dados importantes para a tomada de decisão a respeito das estruturas de concreto. Mediante a execução de ensaios de VPU é possível contribuir com o controle da qualidade das estruturas de concreto. Desta forma pode-se inferir que a aplicação de VPU é muito útil para estudos de mapeamento de variações de homogeneidade de uma estrutura. 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.

6. Referências bibliográficas

- [1] ISAIA, G.C., O Concreto: da Era Clássica à Contemporânea. In: ISAIA, G. C. (Editor), Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.1, vol.1, p.1-44.
- [2] 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, Porto Alegre, 2009, Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 196p.
- [3] NOGUEIRA, C. L., Ensaios Não Destrutivos: Novas Ferramentas para Inspeção de Obras Públicas. In: VI SINAOP – VI SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA EM OBRAS PÚBLICAS. Anais... ,Florianópolis: 2001.
- [4] MEDEIROS, A., PADARATZ, I.J., PINTO, R.C.A., Influência da Presença de Armaduras na Estimativa da Profundidade de Fissuras Superficiais em Concreto Armado através do Ultra-som. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais..., São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 14p. 1 CD-ROM.
- [5] LORENZI, A., SILVA FILHO, L.C.P., CAETANO, L.F., LORENZI, L.S., Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaios de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais..., São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 13p. 1 CD-ROM.
- [6] BARBOSA, M.T.G., MENDES, L.O., COURA, C.G., Resistência à Compressão do Concreto x Velocidade de Propagação de Pulso Ultrassônico – Estudo de Caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 16p. 1 CD-ROM.
- [7] EVANGELISTA, A. C. J., Avaliação da Resistência do Concreto usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos. 2002. 219p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA-TCS-17: Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures. Viena: 2002, 231 p.
- [9] KUMAR, S. A., SANTHANAM, M., Detection of Concrete Damage Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: NATIONAL SEMINAR ON NON-DESTRUCTIVE EVALUATION, 2006, Hyderabad. Proceedings.... Hyderabad: Indian Society for Non-Destructive Testing. Disponível em: <<http://www.ndt.net>> . Acesso em: 18/07/2007.
- [10] VALLUZZI, M. R., DA PORTO, F., CASARIN, F., MONTEFORTE, N., MODENA, C., A Contribution to the Characterization of Masonry Typologies by using Sonic Waves Investigations. In: NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDTCE'09), 2009, Nantes. Proceedings.... Paris: Confédération Française por lês Essais Non Destructifs, 2009. 6p.
- [11] BREYSSE, D., SOUTSOS, M., FELICETTI, R, KRAUSE, M., LATASTE, J., MOCZKO, A., How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT measurements. In: NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDTCE 2009), 2009, Nantes. Proceedings.... Paris: Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, 2009. Disponível em: <<http://www.ndt.net>>. Acesso em: 18 ago. 2013.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 2013.
- [13] CHUNG, H. W., LAW, K.S., Diagnosing in situ Concrete by Ultrasonic Pulse Technique. Concrete International. [s.l.], n. 05, p.42-49, 1983.
- [14] HAMASSAKI, L. T., Utilização do ultra-som em concreto. 1986. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- [15] CARCAÑO, R. S; PEREYRA, J.B. The influence of the physical properties of aggregates on the ultrasound pulse the-

- nique in predicting the compressive strength of concrete. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 26, No. 1, 2003.
- [16] RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E. I. P. Módulo de deformação do concreto pelo método ultrassônico; Estudo da Correlação. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2004. Anais..., IBRACON, Florianópolis, 2004, pp. II 1309-1324.
- [17] ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. Magazine of Concrete Research, Dec., 1976, pp 181-190.
- [18] COSTA, M. R., A importância do material acoplante no ensaio de ultrassonografia. 2013. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/191/a-importancia-do-material-acoplante-no-ensaio-de-ultrassonografia--286986-1.aspx>. Acesso em: 15/06/ 2013.
- [19] COMITÉ MERCOSUL DE NORMALIZACION, NM 58: Hormigón endurecido – Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos. São Paulo: 1996.
- [20] NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S., The Ultrasonic Pulse Velocity Method, CRC handbook on nondestructive testing of concrete, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, pp 169-189, 2004.
- [21] MEDEIROS, A. Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.
- [22] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI 1881 - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London: 1986. 20 p.