

## **Monitoramento de estruturas de concreto armado através de ensaios ultrassônicos**

### **Monitoring of reinforced concrete structures through ultrasonic testing**

DOI:10.34117/bjdv7n7-460

Recebimento dos originais: 20/06/2021

Aceitação para publicação: 20/07/2021

#### **Luciani Somensi Lorenzi**

Doutora em Engenharia Civil

Laboratorio de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Avenida Bento Goncalves, 9500 – Campus do Vale, Prédio 43436, Porto Alegre – RS

E-mail: luciani.lorenzi@gmail.com

#### **Lucas Alexandre Reginatto**

Doutor em Engenharia Civil

Laboratorio de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Avenida Bento Goncalves, 9500 – Campus do Vale, Prédio 43436, Porto Alegre – RS

E-mail: lukas0910@gmail.com

#### **Alexandre Lorenzi**

Doutor em Engenharia Civil

Laboratorio de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Avenida Bento Goncalves, 9500 – Campus do Vale, Prédio 43436, Porto Alegre – RS

E-mail: alexandre.lorenzi@ufrgs.br

#### **Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**

PhD em Engenharia Civil

Laboratorio de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Avenida Bento Goncalves, 9500 – Campus do Vale, Prédio 43436, Porto Alegre – RS

E-mail: lcarlos66@gmail.com

#### **RESUMO**

Muitas estruturas de concreto necessitam ferramentas para proceder a um monitoramento contínuo de suas condições, buscando-se o aumento de sua vida útil. O monitoramento constante das estruturas é um procedimento necessário, uma vez que a detecção preventiva dos problemas permite a utilização de métodos mais simples e econômicos para avaliação e reparo. Neste escopo, os ensaios ultrassônicos se tornam uma estratégia de investigação bastante atraente e viável. Devido a sua facilidade de aplicação esse

método é muito útil na investigação do estado de conservação das estruturas de concreto. Através dos mesmos pode-se contribuir com sucesso no controle da deterioração e qualidade das mesmas. Diferentes métodos de ensaios ultrassônicos foram desenvolvidos para analisar as estruturas de concreto. Através dos mesmos pode-se contribuir com sucesso no controle da deterioração e qualidade das mesmas. O presente artigo evidencia como a aplicação de ensaios de pulso ultrassônico são uteis para uma correta análise de estruturas de concreto. Os estudos de casos apresentados foram desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa LEME-UFRGS.

**Palavras-Chave:** Estruturas de Concreto, Ensaio Ultrassônico, Controle de Qualidade.

## ABSTRACT

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

**Keywords:** Concrete Structures, Ultrasonic Tests.

## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a aplicação de Ensaio Não Destrutivos (END) se constitui em uma alternativa interessante para monitorar o estado das mesmas, como a relação que têm com a resistência à compressão que ainda é a propriedade de controle mais utilizada como indicativo da qualidade e homogeneidade do concreto. Dentro deste cenário, nota-se também uma crescente utilização desta técnica no monitoramento e inspeção de estruturas de concreto armado, principalmente pelos bons resultados que vêm apresentando tanto *in situ* como em laboratório.

As propriedades do concreto podem variar consideravelmente, dependendo de uma série de fatores, tais como: da natureza e proporções dos constituintes, dos métodos de construção e das condições de carregamento e do meio ambiente. Em virtude deste contexto se torna essencial o desenvolvimento de métodos para determinar a qualidade dos elementos de concreto (LORENZI; CAMPAGNOLO; SILVA FILHO; 2006).

A utilização dos END é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. A maioria

destes métodos permite a detecção de anomalias sem ocasionar danos ao material, e, a partir da sua utilização, consegue-se proceder a inspeção de uma estrutura afetada sem interrupção de serviço, propiciando uma economia em termos de tempo e de custos (GRABOWSKI; PADARATZ; PINTO; 2008).

Contudo o desempenho das estruturas de concreto está relacionado a inúmeras variáveis decorrentes de sua confecção como a relação água-cimento, o tipo e tamanho do agregado, o teor de umidade, a técnica de moldagem, o tamanho das amostras e o tipo de cimento, que afetam diretamente a resistência à compressão, o que dificulta a identificação de suas propriedades. Diversos fatores como a ocorrência de falhas de projeto; o uso de dosagens incorretas; o emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e descimbramento; além da utilização incorreta das estruturas de concreto, têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com custos elevados de reparação.

No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se firmando, é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. A aplicação de END se constitui em uma estratégia interessante para monitorar o estado das mesmas. A propriedade de controle mais utilizada como indicativa da qualidade do concreto ainda é a resistência à compressão.

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

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

A avaliação de estruturas existentes em concreto armado e posterior planejamento de intervenções requer conhecimentos específicos provindos de diferentes fontes e áreas técnicas, (GAPARETTO; PANTOJA; RAMIRES; 2021). Neste aspecto, determinar as condições do concreto é um ponto fundamental quando se quer reavaliar estruturas existentes, de forma a mensurar alguma perda de desempenho ou diminuição do nível de segurança. A deterioração progressiva induz a custos de manutenção importantes. As utilizações dos END podem atender a vários propósitos, (BREYSSE; LANGET; SBARTAI; LATASTE; BALAYSSAC; 2009).

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

A resistência à compressão é a propriedade de controle mais empregada para analisar a qualidade deste material. Se um concreto não é suficientemente resistente, pode não suportar as cargas de projeto ou a ação dos agentes ambientais, resultando em danos que podem ser caros de corrigir, numa vida de serviço encurtada ou, em casos extremos, no desmoronamento da estrutura edificada, o que pode colocar em risco seus usuários.

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

No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se firmando, é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. A aplicação de END se constitui em uma estratégia interessante para monitorar o estado das mesmas. A propriedade de controle mais utilizada como indicativa da qualidade do concreto ainda é a resistência à compressão.

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

A aplicação do ensaio de VPU pode-se constituir uma estratégia interessante para monitorar o estado de conservação das estruturas de concreto. Para esta finalidade deve-se levar em consideração que a propriedade de controle mais utilizada como indicativa da qualidade do concreto ainda é a resistência à compressão. Considerando que a resistência está fortemente correlacionada com a densidade do material, podem-se utilizar o ensaio de VPU para avaliar a mesma, sem que seja necessário retirar amostras do material.

Esta possibilidade é muito atraente por evitar que a investigação da resistência provoque danos que podem ser caros de corrigir, ou que resultem num reparo cuja interface com o material original vai se constituir numa zona mais vulnerável à deterioração, resultando em danos mal corrigidos podem acarretar numa redução da vida de serviço da estrutura.

Considerando que a resistência está fortemente correlacionada com a densidade do material, pode-se utilizar os ensaios de VPU para avaliar a mesma, sem que seja necessário retirar amostras do material. O presente artigo evidencia como podem ser empregados os ensaios de VPU para controle de estruturas.

O presente trabalho apresenta o resultado de estudos de caso que buscaram avaliar a utilização de ensaios ultrassônicos para detectar defeitos internos em uma série de estruturas de concreto armado. O objetivo do estudo foi determinar se existiam falhas ou vazios nas estruturas que comprometessem o adequado funcionamento da estrutura. De forma a atingir esta finalidade, foi utilizado um equipamento convencional de ensaio ultrassônico.

## **2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

O concreto não pode ser considerado um material eterno, visto que necessita de manutenção para garantir a sua vida útil. A falta de manutenção faz com que as construções apresentem manifestações patológicas de significativa intensidade e incidência, geralmente acompanhadas de elevados custos para a sua reabilitação. Para que seja possível ampliar a vida útil de uma estrutura é iminente a necessidade de qualificar o material a ser empregado, bem como a mão-de-obra utilizada.

Objetivando atender às expectativas de projeto quanto à resistência e vida útil de estruturas de concreto, é interessante dispor de um sistema de acompanhamento para verificar as condições físicas e estimar a homogeneidade e compacidade do concreto. Os Ensaio Não Destrutivos (END) são uma estratégia de investigação atraente neste contexto, pois permitem que seja feita uma análise das condições da estrutura, sem provocar danos à mesma.

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

necessidade de maior conhecimento acerca das propriedades e comportamento dos materiais, (LORENZI; 2009).

O concreto é muito utilizado na construção civil em decorrência da excelente durabilidade. Infelizmente, apesar de o concreto ser muito durável em certas circunstâncias, muitas estruturas fabricadas com o mesmo estão sujeitas a ambientes ou condições deletérias, que rapidamente degradam seu desempenho ou afetam sua integridade, (ANDRADE; 2005). Fatores como a ocorrência de falhas de projeto; o uso de dosagens incorretas; o emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e descimbramento; além da utilização incorreta das estruturas de concreto, têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com custos elevados de reparação, (FIGUEIREDO; 2005).

Estimativas de resistência do concreto através da utilização de métodos de END, aplicados na estrutura real, passam a se constituir em uma possibilidade interessante de controle. Os END podem ser aplicados a cada fase da construção: tanto podem ser examinados os materiais como podem ser usadas as suas técnicas para então monitorar a integridade da estrutura durante a sua vida útil.

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

### **3 ENSAIOS ULTRASSÔNICOS**

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

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

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

O método de VPU é baseado na determinação longitudinal das características de propagação de um pulso ultrassônico através de um material, e é o método de ultrassom mais comumente utilizado na avaliação de estruturas de concreto. Este método é bastante utilizado para avaliação do concreto devido à sua eficácia, simplicidade de aplicação e baixo custo.

O princípio do ensaio está baseado no fato de que os sons produzidos em um ambiente qualquer são refletidos ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este, apesar de simples e frequentes, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais.

O ensaio de VPU é caracterizado como um método de END que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais. A VPU em um material sólido irá depender, entre outras coisas, da massa específica e das propriedades elásticas desse material.

Através do ensaio de VPU é possível demonstrar teoricamente que diferenças nos resultados obtidos são proporcionais à estrutura de poros e microfissuras do concreto, (ERCOLANI; ORTEGA; SEÑAS; 2007). Por ser rápido e não destrutivo, o VPU oferece a oportunidade de se estabelecer um controle total dos elementos que compõem a estrutura, inclusive ao longo do tempo. Os resultados deste tipo de análise podem ser usados para prognóstico da qualidade ou para correção do processo tecnológico. A determinação da VPU especificada em todas as normas relativas a este ensaio, tanto nacionais como internacionais, é baseada no mesmo princípio, descrito acima, o qual é comumente expresso de diferentes maneiras entre as várias normas relativas ao assunto, (KOMLOS; POPOVICS; NÜRNBERGEROVÁ; BABÁL; POPOVICS; 1993).



A norma brasileira NBR 8802 (2019) prescreve que o mesmo seja empregado com o objetivo de checar a uniformidade do concreto, detectar eventuais falhas internas de concretagem, monitorar as características do concreto ao longo da vida útil, avaliar a profundidade de fissuras ou outras imperfeições, avaliar o módulo de deformação e, inclusive, estimar a resistência à compressão do concreto.

A norma britânica BSI-1881: Part 201 (1996) considera que as principais aplicações deste método são:

1. determinação da uniformidade do concreto;
2. determinação da existência de fissuras;
3. estimativa da resistência à compressão do concreto, utilizando para tal curvas de correlação apropriadas;
4. monitoramento da evolução da resistência;
5. avaliação da deterioração do concreto.

Pode-se, todavia, utilizar o VPU para fins específicos, tais como controlar o tempo de desfôrma, avaliar a presença de falhas de concretagem ou detectar danos causados pelo fogo. A facilidade de manuseio e o custo relativamente baixo do equipamento têm estimulado diversos pesquisadores a buscar novas formas e fins para o uso dos ensaios de VPU, (LORENZI; 2009).

Um fator importante é que o VPU, por ser uma técnica não destrutiva, permite a execução de vários ensaios no mesmo local, visando acompanhar adequadamente as variações associadas com o tempo. Com o aumento das ocorrências de deterioração precoce das estruturas de concreto, torna-se interessante realizar este tipo de monitoramento contínuo das condições das edificações. Através de um constante monitoramento das estruturas podem-se antecipar demandas de manutenção e colaborar para elevar a vida útil das mesmas.

#### **4 METODOLOGIA**

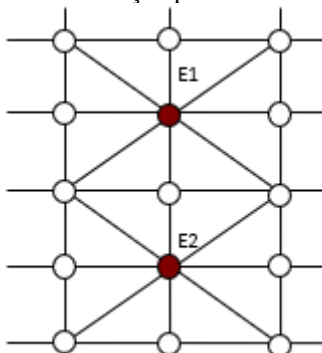
O ensaio de VPU consiste na determinação da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica entre uma dupla de pontos, convenientemente localizados na estrutura sob análise. Este procedimento permite identificar diferenças qualitativas entre as diversas zonas que compõem as estruturas de concreto. Para realização das medições de VPU nas diferentes estruturas foram criados grids nas faces dos elementos de acordo com o tipo de elemento a ser ensaiado. Após a definição do grid de leitura procedeu-se com a operação de marcação do mesmo, na superfície da estrutura.



O esquema de medição do pulso ultrassônico estabeleceu-se da seguinte forma: nos pontos centrais, denominados de E1 e E2, na Figura 1, foi posicionado o transdutor emissor, enquanto que o receptor foi posicionado nos pontos em torno do mesmo, resultando em 8 leituras de tempo de propagação de pulso.

Após esta etapa, foi feito a leitura nos pontos de contorno do grid, somando-se mais oito leituras, conforme pode ser observado na Figura 1. O emissor era então mudado para o ponto E2, onde se repetia este procedimento, e assim sucessivamente até que todas as leituras necessárias para um perfeito mapeamento da região analisada fossem finalizadas. Os resultados das velocidades de propagação de uma onda ultrassônica podem ser interpretados como indicadores de qualidade do concreto. Concretos que apresentam menor compacidade fornecem menores valores de VPU. As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através de um software de geração de curvas de nível, facilitando a visualização da homogeneidade de cada elemento.

Figura 1: Grid de medição para leituras ultrassônicas.



## 5 APLICAÇÃO PRÁTICA

A aplicação prática do VPU foi realizada em quatro estudos de caso distintos realizados pela equipe do LEME/UFRGS. Os casos ilustram a aplicação da VPU em estruturas de concreto armado com o objetivo de detectar diferenças na homogeneidade do concreto. Os estudos de caso evidenciam como podem ser empregados os ensaios de VPU para controle de estruturas de concreto. Os ensaios foram realizados em quatro obras de grande porte e foram empregados para verificar a homogeneidade do concreto de elementos estruturais nos quais havia indicativos do controle de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados.

Buscando prevenir uma intervenção desnecessária na estrutura, e evitar danos com a retirada de testemunhos, sugeriu-se a realização de ENDS que permitissem realizar um

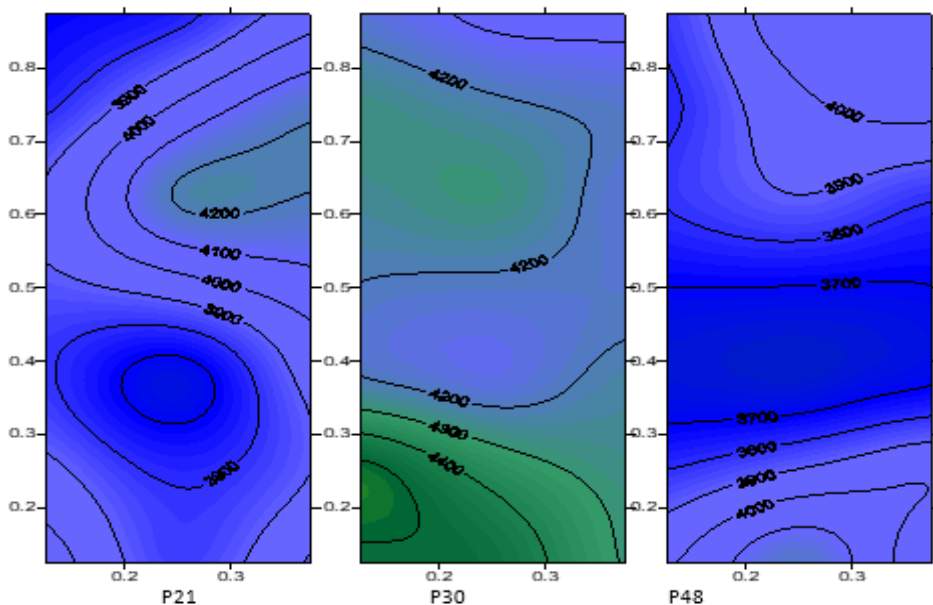
diagnóstico preliminar da condição dos elementos, relativa a outros elementos moldados na mesma época, nos quais o concreto foi aprovado pelo controle tecnológico.

### 5.1 ESTUDO DE CASO 1

Os ensaios foram realizados num conjunto de 18 pilares, divididos em 2 grupos. O primeiro grupo continha 6 pilares de referência (P21; P22; P30; P31; P48 e P50), escolhidos dentre os pilares próximo à região sob suspeita, com resistência especificada igual e idade próxima aos pilares sob análise, que serviram como amostras de controle. O segundo grupo de pilares era composto pelos 12 pilares (P20; P23; P24; P29; P35; P44; P46; P49; P51; P52; P60 e P61), localizados na região onde foi lançado o concreto sob suspeita. Para a análise dos resultados dos ensaios de VPU optou-se por mapear graficamente através de um software de geração de curvas de nível em alguns dos pilares ensaiados as variações da velocidade. Desta forma pode-se ter uma estimativa da homogeneidade e da presença de defeitos em cada pilar.

Como pode-se observar na Figura 2, as velocidades mais elevadas foram registradas no pilar P30, que apresentou os melhores resultados dentre todos os pilares ensaiados. Em algumas zonas do pilar P21, a velocidade também atinge os 4200 m/s, porém se observa que a mesma cai levemente em outras zonas, onde podem ter ocorrido pequenas falhas de concretagem. O pilar P48 apresenta velocidades menores, especialmente na zona central do grid.

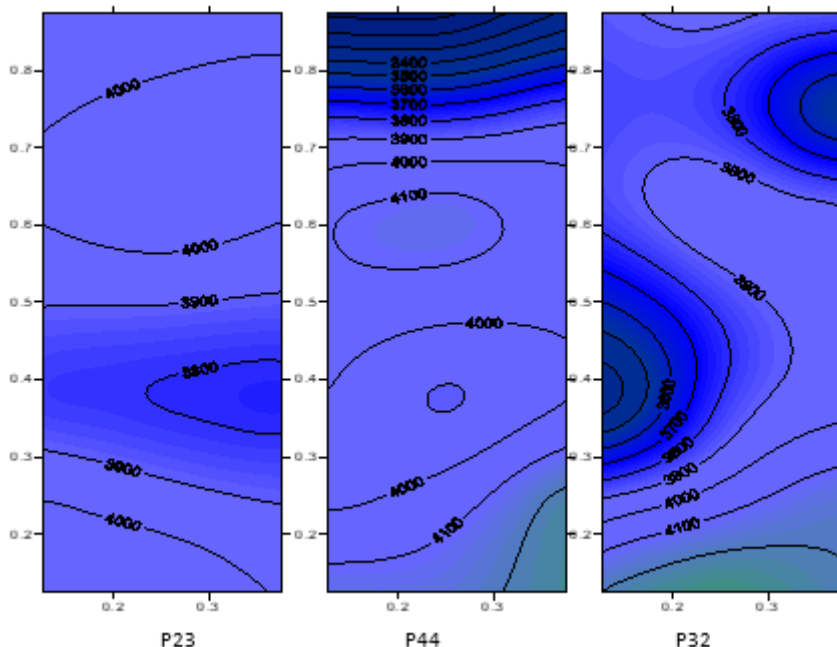
Figura 2: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de VPU para alguns dos pilares de referência



Fonte: Arquivo LEME.

Os pilares sob análise (Figura 3) apresentaram velocidades máximas levemente inferiores às registradas nos pilares de controle P21 e P30, mas compatíveis com as velocidades do pilar de controle P48. Em todos os pilares se observam algumas zonas, distribuídas de forma aleatória, onde a velocidade cai, evidenciando a existência de pequenos defeitos ou variações na compacidade do material, típicas de estruturas confeccionadas com um material heterogêneo como o concreto. Em termos gerais, a maioria dos pilares podem ser considerada como sendo equivalentes, em termos de VPU, destacando-se positivamente os pilares P32 (referência) e P23 (sob análise), e negativamente o pilar P44 (sob análise).

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



Fonte: Arquivo LEME.

## 5.2 ESTUDO DE CASO 2

O presente estudo de caso apresenta os resultados dos ensaios de VPU realizados em uma série de pilares de concreto. Os pilares examinados fazem parte de um conjunto de elementos estruturais nos quais o controle tecnológico, realizado através de corpos de prova moldados de concreto in loco, indicou que não foi atingida a resistência de projeto especificada. Este indicativo levantou dúvidas sobre a efetiva condição, em termos de resistência, dos referidos elementos, o que conduziu à realização do presente estudo.

O objetivo principal foi para mapear a homogeneidade do concreto dos elementos de interesse, coletando dados que permitissem avaliar comparativamente as características dos mesmos com a de outros elementos onde os corpos de prova de

controle haviam produzido resultados satisfatórios. De forma a realizar as medições foram criados grids nas faces dos elementos.

Durante a marcação do grid foi necessário preparar a superfície em alguns locais, para reduzir a rugosidade e permitir um melhor contato entre o transdutor e a superfície do concreto.

Destaca-se que as velocidades começaram a apresentar valores mais baixos nas proximidades das juntas de concretagem. Este fato pode ser explicado, pois há uma tendência de que no final da concretagem de um pilar o concreto esteja mais argamassado e, conseqüentemente, menos resistente. Foi observado que a superfície do pilar, na parte superior, apresentava falhas de concretagem e textura “craquelada”, conforme mostrado nas Figuras 4 e 5.

Uma vez que a VPU está diretamente relacionada à compacidade do material sob análise, a presença de falhas influencia negativamente o resultado final. Entretanto, o novo concreto lançado apresentava superfície mais regular, o que não elevou significativamente os resultados de velocidade, levantando assim, suspeita em relação à qualidade do concreto presente no topo do pilar.

Figura 4: Detalhe da superfície do topo de algum dos pilares analisados



Fonte: Arquivo LEME.

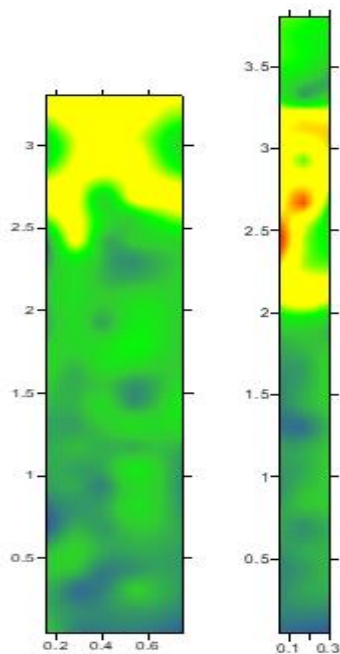
Figura 5: Detalhe da junta de concretagem de algum dos pilares analisados.



Fonte: Arquivo LEME

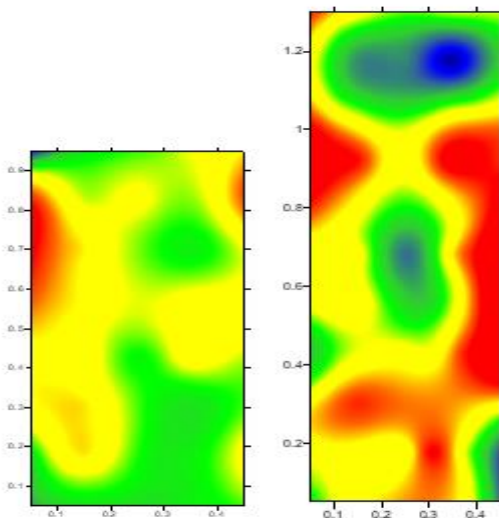
As Figuras 6 a 9 apresentam as imagens geradas com as leituras de VPU de alguns dos pilares analisados. As velocidades registradas variaram entre 2400 e 3200 m/s. Em geral o concreto apresenta uma qualidade regular, com registros de zonas mais compactas na parte inferior e zonas menos compactas na parte superior dos blocos, como esperado. As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através da utilização de um software de geração de curvas de nível, facilitando a visualização das variações na homogeneidade, compactidade e integridade de cada elemento.

Figura 6: Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.



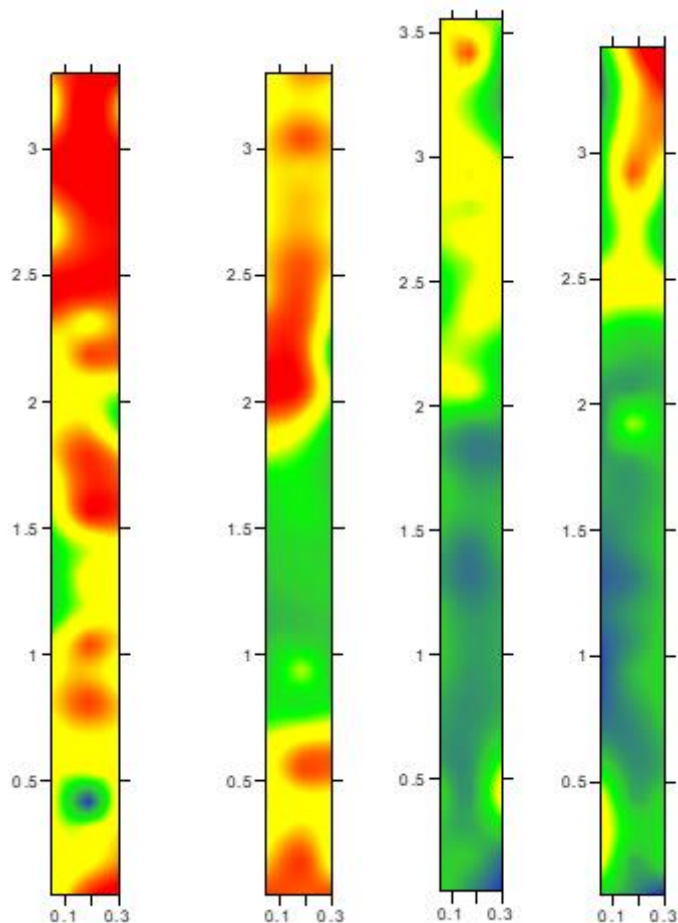
Fonte: Arquivo LEME.

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



Fonte: Arquivo LEME.

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



Fonte: Arquivo LEME.

### 5.3 ESTUDO DE CASO 3

O presente estudo de caso apresenta os resultados dos ensaios de VPU realizados em uma série de elementos de concreto. As estruturas examinadas fazem parte de um conjunto de elementos estruturais nos quais o controle tecnológico, realizado através de corpos de prova moldados de concreto in loco, indicou que não foi atingida a resistência de projeto especificada. Este indicativo levantou dúvidas sobre a efetiva condição, em termos de resistência, dos referidos elementos, o que conduziu à realização do presente estudo.

O objetivo principal foi para mapear a homogeneidade do concreto dos elementos de interesse, coletando dados que permitissem avaliar comparativamente as características dos mesmos com a de outros elementos onde os corpos de prova de controle haviam produzido resultados satisfatórios.

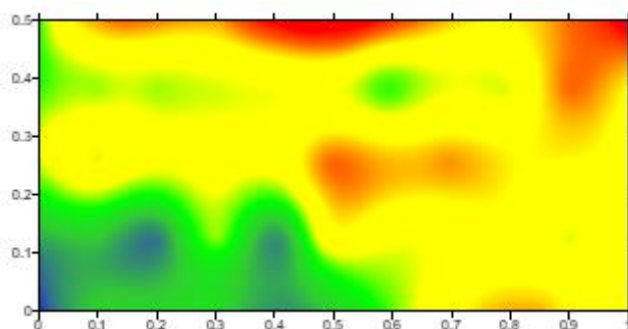
As Figuras 9 e 10 apresentam as imagens geradas com as leituras de VPU de blocos de fundação. As velocidades registradas variaram entre 2400 e 2800 m/s. Em geral



o concreto apresenta uma qualidade regular, com registros de zonas mais compactas na parte inferior e zonas menos compactas na parte superior dos blocos, como esperado.

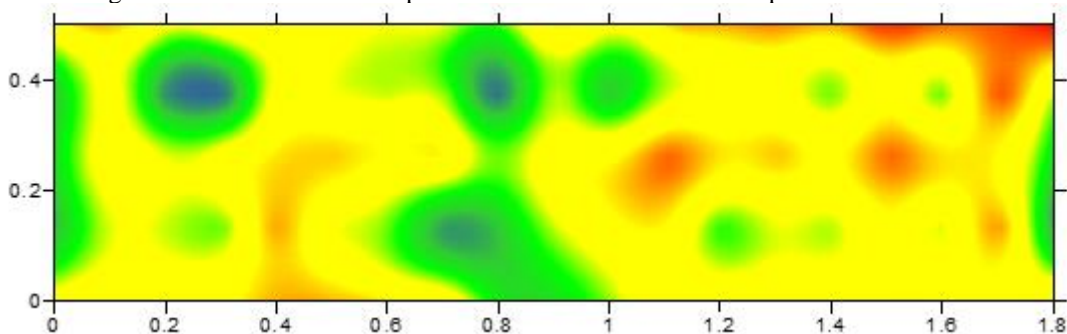
As variações de velocidade foram mapeadas graficamente através da utilização de um software de geração de curvas de nível, facilitando a visualização das variações na homogeneidade, compactidade e integridade de cada elemento.

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



Fonte: Arquivo LEME.

Figura 10 – Resultados do mapeamento dos dados do ensaio de pulso ultrassônico.



Fonte: Arquivo LEME.

#### 5.4 ESTUDO DE CASO 4

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

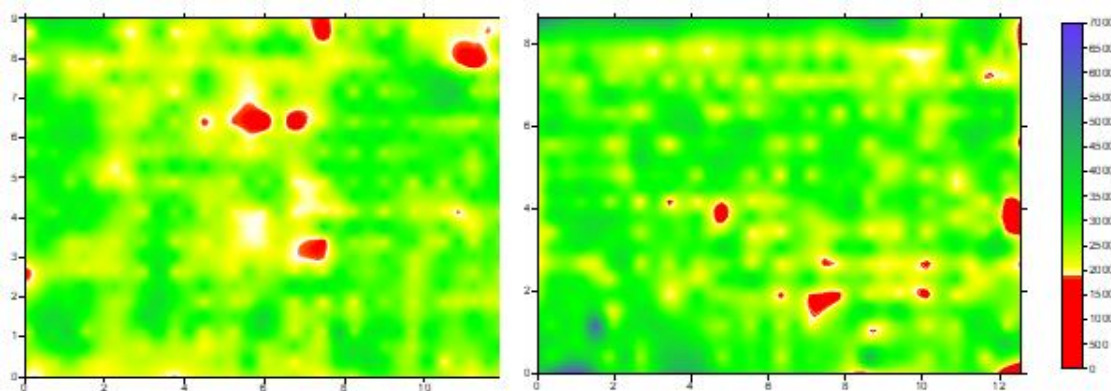
O objetivo principal deste estudo consistiu em verificar a homogeneidade do concreto através do mapeamento da distribuição da VPU ao longo das faces da estrutura analisada, de forma a identificar as zonas de baixa velocidade, nas quais é provável a existência de vazios e falhas de concretagem decorrentes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



Analisando-se graficamente os resultados obtidos a partir das leituras de VPU pode-se observar o mapeamento das velocidades nos dois lados da estrutura A. Através da análise dos resultados obtidos, constatou-se que a condição geral da estrutura é boa, sendo registradas poucas regiões com valores de VPU menores que 2500 m/s.

Todavia observam-se regiões na estrutura na qual são observados valores baixos de VPU. Estes valores indicam regiões que necessitam ser reparadas. A Figura 11 mostra a distribuição de velocidades nas duas faces da estrutura de concreto analisada.

Figura 11 – Mapeamento da VPU na estrutura A.



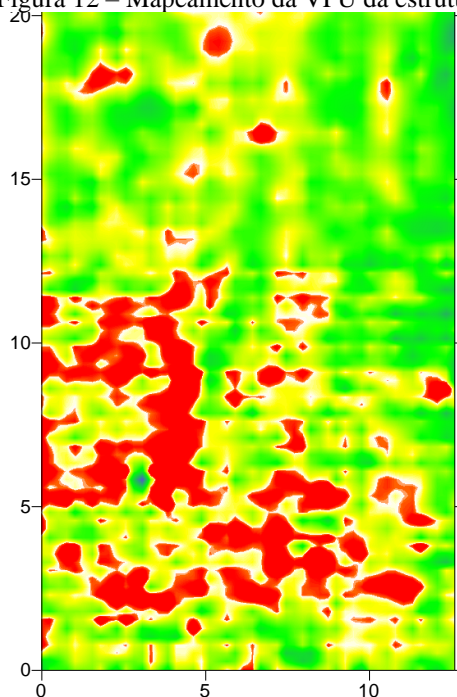
Fonte: Arquivo LEME.

Os resultados obtidos no mapeamento da estrutura B indicam que existe uma grande quantidade de vazios e descontinuidades. O mapeamento da VPU nesta estrutura indicou várias regiões com valores abaixo de 2500 m/s, indicando a necessidade de uma intervenção na estrutura. A Figura 12 mostra a distribuição de velocidades na estrutura B.

Na estrutura B decidiu-se executar a varredura completa de toda a estrutura, devido à existência de registros que indicavam que havia problemas de homogeneidade na mesma. Foram registradas dificuldades de adensamento durante a execução da estrutura B, o que ocasionou diversos defeitos superficiais, que demandaram reparos. Além disso, uma posterior extração de testemunhos indicou a existência de um grande número de vazios.

Na figura 13 são apresentados os resultados do exame visual efetuado em testemunhos extraídos de regiões marcadas por diferentes valores de VPU. A análise dos mesmos permite aperfeiçoar o diagnóstico, definindo qual a faixa de resultados que corresponderia à presença de vazios ou defeitos inaceitáveis na estrutura.

Figura 12 – Mapeamento da VPU da estrutura B.



Fonte: Arquivo LEME.

Figura 13 – Exame visual de testemunhos extraídos da estrutura B.



Fonte: Arquivo LEME.

## 6 CONCLUSÕES

Muitos esforços estão se fazendo nas pesquisas em relação aos END, devido a necessidade de obter-se estruturas de concreto com alto padrão de qualidade e durabilidade. As pesquisas referentes aos ENDs têm buscado entender as capacidades e limitações de ensaio. O uso de END pode auxiliar na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção, como demonstrado nos estudos de caso descrito no presente artigo. O desconhecimento da real situação em que se encontra uma estrutura é um fator complicador nas intervenções em estruturas deterioradas ou sob suspeita.

A falta de informação, numa situação de carácter emergencial, pode fazer com que se tomem decisões conservadoras, aumentando o escopo e complexidade das intervenções previstas, aumentando custos ou gerando transtornos adicionais para seus usuários. O uso de ensaios tipo END auxilia na tomada de decisão e estabelecimento de estratégias de intervenção das estruturas. Os ensaios realizados indicaram que os concretos das regiões sob suspeita apresentavam características inferiores ao concreto de referência, resultantes de variações na resistência à compressão e/ou presença de falhas e defeitos de concretagem. O desconhecimento da real situação em que se encontra uma estrutura é um fator complicador nas intervenções em estruturas deterioradas ou sob suspeita.

De forma geral, os estudos de caso reforçam a idéia de que a utilização de END são ferramentas úteis para a análise de estruturas, visto que os dados obtidos permitem verificar, por exemplo, a presença de corpos estranhos e vazios em elementos de concreto. 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 presente artigo ilustra a aplicação de ensaios de VPU para avaliar o estado de conservação, detectar a existência de vazios e demais elementos presentes em estruturas de concreto. Os ensaios de VPU já se mostraram comprovadamente úteis para analisar diferenças de homogeneidade e para detectar padrões de microfissuração em estruturas de concreto deterioradas. Os estudos de caso apresentados evidenciam claramente a potencialidade de ensaios tipo UPV para checagem das condições de estrutura de concreto. Pode-se concluir que, mediante a execução de VPU é possível contribuir com o controle da deterioração e qualidade das estruturas de concreto, como demonstrado nos estudos de caso descritos no presente artigo.

## REFERÊNCIAS

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 2019.

Breysse, D., Langet, M.; Sbartai, Z. M.; Lataste, J.; Balayssac, J. P.; “How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT measurements”, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, 2009. 6p.

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

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

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

Gaparetto, A.; Pantoja, J. C.; Ramires, F. B.; “Metodologia para inspeção e avaliação da segurança e durabilidade de estruturas de concreto armado”, *Brazilian Journal of Development*, 2021, v.7, n.1, 4942-4960.

Grabowski, S. L.; Padaratz, I. J.; Pinto, R. C. A., “Avaliação de Placas de Concreto com o Método Não Destrutivo do Eco-impacto”, *50º Congresso Brasileiro do Concreto*, Salvador, 2008. 12p.

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

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

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