

## CONAEND&IEV2020 - 511

### ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO ULTRASSOM NA COMPOSIÇÃO E PRESENÇA DE DEFEITOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Nascimento, TEG.<sup>1</sup>, Prata, ALC<sup>1</sup>, Santos, I S<sup>1</sup>, Silva, LA<sup>1</sup>, Sandes, RPIL<sup>2</sup>, Alvelos, DL<sup>3</sup>,  
Oliveira, MMB<sup>3</sup>, Martins, COD<sup>4</sup>

*Copyright 2020, ABENDI, PROMAI.*

*Trabalho apresentado durante o XXXVIII – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção.*

*22ª IEV – Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales.*

*As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).*

#### SINOPSE

---

Entre os parâmetros inseridos no projeto de dosagem do concreto, a relação água/cimento possui elevada importância, visto que está relacionada à incidência de poros, o que afeta fortemente a resistência final do material. Os agregados também desempenham papel importante nas propriedades mecânicas do concreto em função de influenciarem na compactação e nas características da zona interfacial, exigindo boa aderência com a pasta de cimento. Sendo assim, o presente trabalho objetivou analisar a sensibilidade da técnica ultrassônica na variação da composição do concreto em relação aos parâmetros de dosagem, como relação água/cimento e proporção de agregados. No estudo foram analisadas a velocidade do pulso ultrassônico (VPU), atenuação sônica e as formas de onda do sinal de resposta e os resultados demonstraram a necessidade de aprofundamento matemático no estudo do sinal ultrassônico para a melhoria da sensibilidade.

---

1 Mestranda, Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Sergipe.

2 Graduando, Engenharia Eletrônica – Universidade Federal de Sergipe.

3 Graduado, Engenheiro Civil – Instituto Federal de Sergipe.

4 PhD, Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Sergipe.

## 1. INTRODUÇÃO

---

O concreto é constituído de fase aglomerante, composto por cimento Portland e água, por onde estão espalhados os agregados graúdos e miúdos (de acordo com a ABNT NBR 7211 (1) a divisão entre agregados graúdos e miúdos é de 4,75 mm).

O cimento em contato com a água, resulta nas reações de hidratação que conferem resistência ao concreto com o tempo, e os agregados contribuem principalmente pela estabilidade dimensional, massa unitária e módulo de elasticidade do concreto (2).

Entre os parâmetros inseridos no projeto de mistura do concreto, a relação água/cimento e a presença dos agregados exercem fundamental importância nas propriedades finais do concreto como resistência e durabilidade.

Na produção do concreto, a água adicionada à mistura exercerá função de hidratar o cimento, resultando no endurecimento da massa. Contribuirá também à trabalhabilidade da mistura, uma importante propriedade do concreto no estado fresco, e irá assegurar o espaço necessário na pasta para o desenvolvimento dos produtos da hidratação (3). É importante ressaltar que a água necessária ao alcance de trabalhabilidade adequada é maior que a necessária para a hidratação completa do cimento (3). Não é incomum a adição desmedida de água em canteiros de obras para a melhoria da trabalhabilidade. Tal prática pode ser prejudicial pois coloca em risco o alcance da resistência à compressão, que é especificada na fase de projeto.

Elevada relação a/c provoca o aumento da porosidade da pasta (2, 4), sendo no geral, uma propriedade inversamente proporcional à resistência (5). A água disponível para hidratação do cimento ocupará um espaço que após este processo, será ocupado pelos produtos da hidratação ou permanecerá vazio. Esse vazio impactará na resistência (4).

Agregados graúdos também podem comprometer a resistência do concreto, principalmente, por influenciarem nas características da zona de transição (4). Petrucci (5) afirma que agregados de pedra britada, em função do formato angular, oferecem melhor aderência com a pasta, comparando-se com o agregado de forma arredondada (5). Partículas agregadas com maior diâmetro máximo podem resultar em zonas de transição mais fracas, com tendência maior à microfissuração (4).

As características da zona de transição, bem como a aderência entre as duas fases são parâmetros que devem ser analisados durante a dosagem do concreto, pois sofrem influências da porção agregada e da relação a/c, e refletem nas propriedades mecânicas do concreto, com o surgimento de fissuras que influenciarão no desempenho final da estrutura (4).

Sendo assim, o monitoramento de estruturas de concreto através de técnicas de inspeções que analisem a estrutura internamente, contribui para detecção de descontinuidades internas, como vazios, fissuras e excesso de poros pela adição desmedida de água na mistura, que por não serem vistas em inspeções visuais, permanecem e, com o tempo, podem trazer problemas mais sérios.

Em meio aos métodos de END's utilizados em concreto, há destaque para a técnica ultrassônica, que através da propagação do pulso ultrassônico no interior do material, possibilita avaliação de sua compactidade, e verificação da presença descontinuidades. O principal parâmetro de análise da técnica é a velocidade do pulso ultrassônico (VPU), que apresenta valor fixo para cada meio de propagação.

A avaliação ultrassônica em materiais heterogêneos, como o concreto, no entanto, apresenta-se desafiadora em relação aos materiais homogêneos. Em função da presença de elementos refletivos, pois quando a onda atravessa descontinuidades, como a interface entre a pasta e os agregados, fissuras, vazios e poros naturalmente presentes, sofre dispersão, e conseqüente

perda de informação no sinal ultrassônico. A VPU sofre influência em meio às descontinuidades, mas pode não ser sensível a alterações de natureza microestrutural, e tal condição pode comprometer a confiabilidade da técnica, quando se deseja averiguar a influência da composição nas propriedades mecânicas, por exemplo.

A técnica ultrassônica consiste na propagação de ondas sonoras, cuja faixa de frequência está entre 20 e 150 kHz, no interior de um material, a fim de avaliar a presença de falhas (6, 7). A análise por ultrassom pode ser usada no concreto na avaliação da uniformidade, detecção de físsuras, obtenção de estimativas da resistência, avaliação dos níveis de deterioração, medição do módulo de elasticidade e monitoramento do ganho da resistência nos primeiros dias após a concretagem (8).

Os componentes do sistema de inspeção consistem de um gerador de sinais elétricos, transdutores piezoelétricos que convertem pulsos elétricos em ondas mecânicas e vice-versa, e um sistema de aquisição de sinais elétricos (6). A partir da distância entre os transdutores e do tempo de trajeto da onda, é possível estabelecer a Velocidade de Propagação do Pulso (VPU), sendo esta influenciada pelas propriedades elásticas e a densidade do meio, sendo diretamente e inversamente proporcional, respectivamente (9). A figura 1 representa o mecanismo do ensaio de ultrassom.

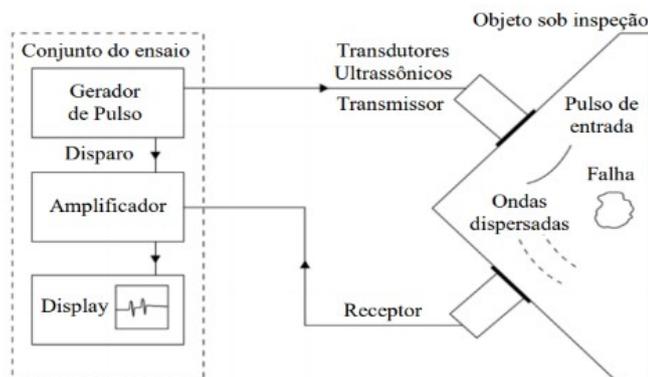


Figura 1: Mecanismo de um ensaio por ultrassom. (10)

A presença de descontinuidades internas, provoca alterações na VPU e gera ondas dispersivas, ou seja, ondas que refletem e viajam em várias direções, chegando ao receptor tardiamente e que compõem o sinal ultrassônico. Uma parcela dos pulsos atinge o transdutor receptor, que os converte em pulsos elétricos os quais são amplificados e exibidos em *displays* (6, 9). Além da dispersão, as partículas absorvem energia de modo que a oscilação durante a propagação da onda é desacelerada. Esses dois fenômenos provocam a atenuação do sinal ou o decaimento da amplitude em função do tempo (11). A figura 02 mostra um sinal ultrassônico obtido através de análise em uma peça de concreto, cujas formas de onda são expressas em amplitude de tensão, em função do tempo.

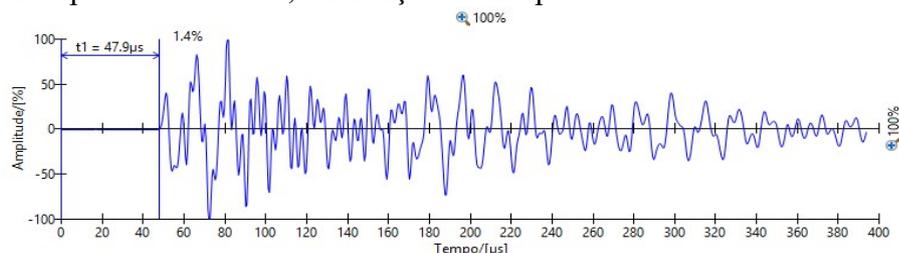


Figura 2: Formato de onda ultrassônica obtida de uma peça de concreto. (Fonte: Autor)

Alguns dos principais fatores que influenciam no comportamento da onda no concreto são as características da porção agregada, a zona de transição e a porosidade, por serem fontes de descontinuidades e contribuírem na dispersão da onda e em alterações na VPU (9). Além destes fatores, VPU cresce com a idade do concreto, visto que o módulo de elasticidade aumenta com o endurecimento do material (9). A presença de vazios provenientes de adensamento inadequado também influenciará na propagação da onda.

De acordo com Bungey (8) um desafio na avaliação de concretos através da VPU é que o material possui duas fases, cujas propriedades elásticas e as resistências são distintas, e que não devem ser analisadas de maneira separada. Isso porque o formato das partículas dos agregados, as características da zona de transição e a variabilidade da distribuição das partículas também exercem influência nas propriedades finais do concreto, como também no comportamento da onda (8).

Inspecções em estruturas de concreto que levam em consideração apenas a VPU podem ser insensíveis à variação microestrutural do material, sendo necessário a utilização de mais recursos da técnica para melhorar tal sensibilidade. O sinal ultrassônico pode trazer informações do comportamento dispersivo da onda que, em inspecções em materiais de natureza heterogênea, são valiosas.

Sendo assim, o presente estudo objetiva avaliar a influência da composição do concreto na VPU e nas formas de onda ultrassônicas, sendo estas muitas vezes desconsideradas por profissionais em inspecções em campo.

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

---

As amostras cilíndricas foram confeccionadas utilizando sete composições, sendo cinco delas fixando-se a relação água/cimento ( $a/c$ ) em 0,45 e variando a porção agregada em brita 0 e brita 1, cuja dimensão máxima de cada uma é respectivamente 12,5 mm e 19 mm, de acordo com a ABNT NBR 7211 (1). As proporções da parte dos agregados graúdos variou da seguinte forma: 70% de brita 1 e 30% de brita 0 (composição 1), 30% de brita 1 e 70% de brita 0 (composição 2), 50% de brita 1 e 50% de brita 0 (composição 3), 100% de brita 1 e 0% de brita 0 (composição 4), e 0% de brita 1 e 100% de brita 0 (composição 5). Também foram usadas mais duas variações de relação  $a/c$ , sendo elas 0,55 e 0,65, fixando-se a proporção agregada em 70 % de brita 1 e 30% de brita 0, sendo: 70% de brita 1 e 30% de brita 0 com relação  $a/c$  de 0,55 (composição 6) e 70% de brita 1 e 30% de brita 0 com relação  $a/c$  de 0,65 (composição 7) totalizando sete composições.

Os moldes cilíndricos de alumínio para a confecção das amostras tinham dimensões de 100 mm x 200 mm. Os corpos de provas foram moldados de acordo com os parâmetros de moldagem e cura da ABNT NBR 5738:2015 (12). Após a confecção, foram submetidos à cura úmida em que ficaram submersos durante os primeiros 7 dias a partir da confecção.

Aos 7 dias contados a partir da confecção das amostras, foi realizado o ensaio ultrassônico. Para cada composição foram moldados e ensaiados 9 corpos de provas, para minimizar erros de leituras, contribuindo assim para a confiabilidade do ensaio.

A figura 3 mostra a execução do ensaio com a aparelhagem utilizada durante o procedimento.



Figura 3: Execução do ensaio ultrassônico.

O equipamento de ultrassom utilizado foi o *Pundit Lab* + da *Proceq* e transdutores piezoelétricos com frequência de 54kHz.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as amostras foram submetidas ao ensaio ultrassônico aos 7 dias contados a partir da confecção. Essa análise teve como objetivo verificar a VPU nas primeiras idades. Os desvios padrão referente às velocidades não ultrapassou 2%.

A figura 4 mostra a média da velocidade obtida em cada composição.

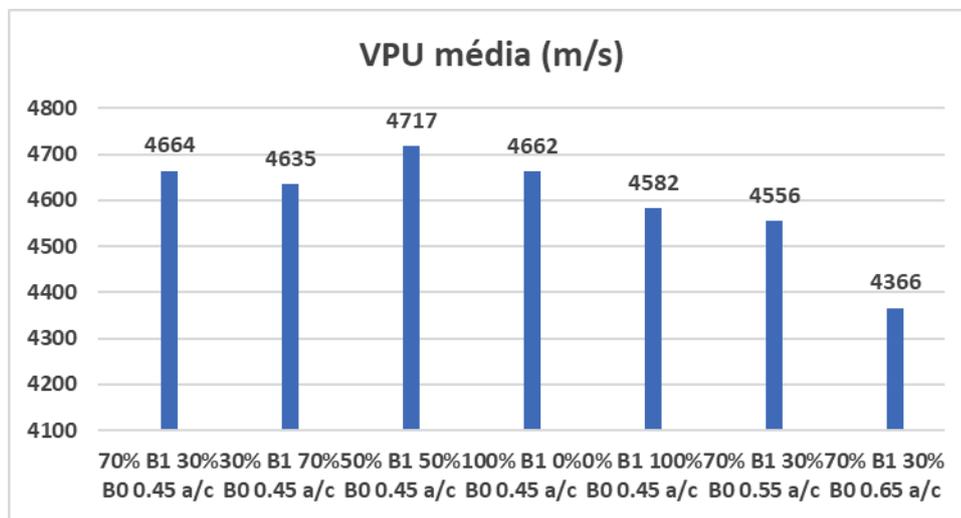
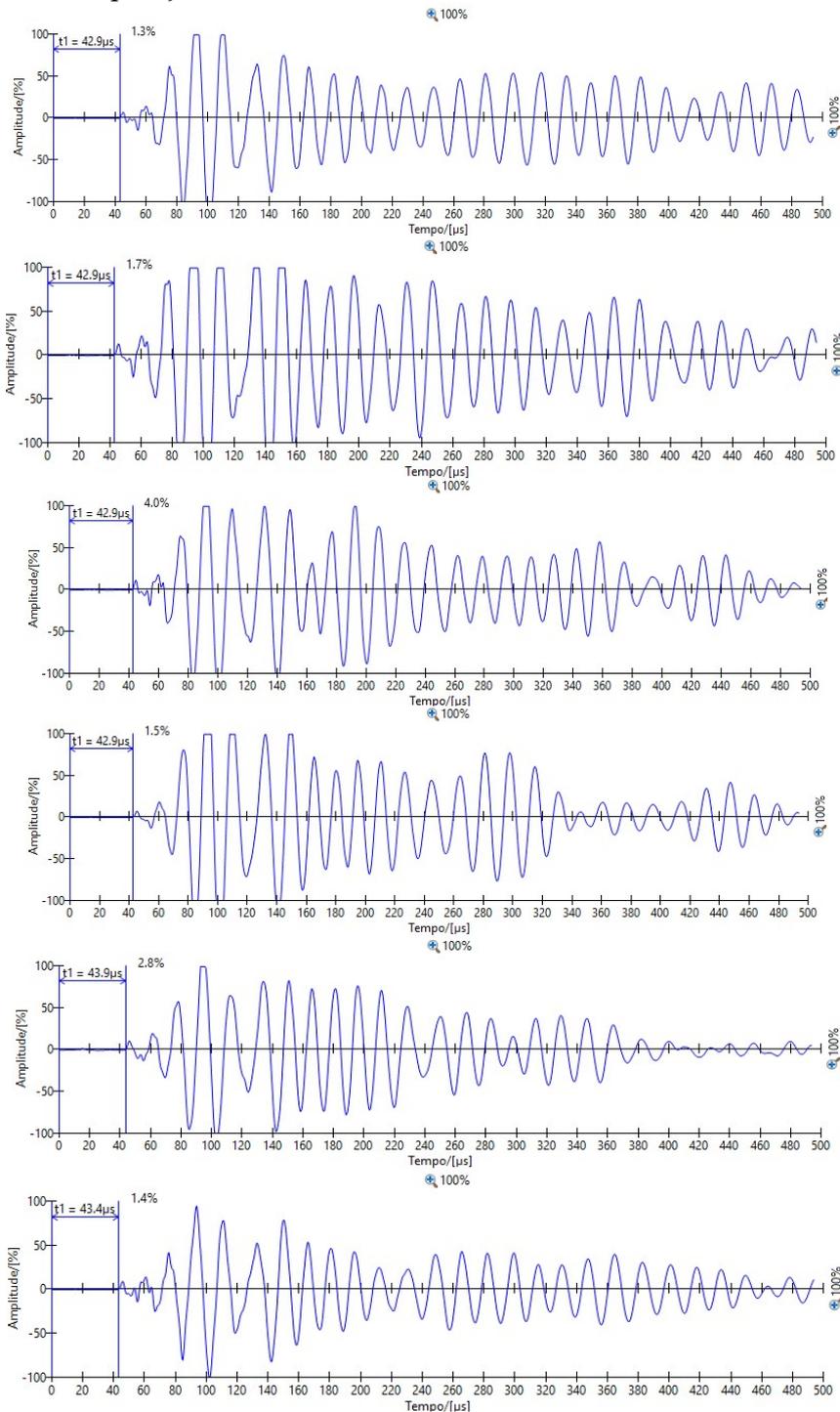


Figura 4: Velocidade média do pulso ultrassônico para todos os traços analisados.

Os resultados encontrados para composições com elevadas relações a/c, como o caso principalmente da composição 7 (C7) corroboram com a literatura, visto que quanto maior o teor de água em relação à massa de cimento, um maior número de poros ou vazios o concreto vai apresentar (9). Tal característica contribuirá para a redução da VPU por esta ser menor no ar que no concreto (13). É possível observar também que a composição 5, contendo 100% de brita 0 apresentou menor velocidade se comparando apenas com as demais proporções de britas. Esse fato pode ser explicado pela dimensão desse agregado ser menor e por isso resulta em maior área de zona interfacial (região entre pasta de cimento e agregados), que por sua vez

aumenta os obstáculos que a onda cruzará durante a sua propagação (14). As composições 1, 2, 3 e 4 apresentaram VPU muito próximas, sendo necessário aprofundamento do estudo do sinal para obter dados precisos.

Durante as leituras ultrassônicas, o software fornece ondas pré processadas que contém informações sobre as características construtivas do material. A figura 5 mostra as ondas extraídas de cada composição.



a)

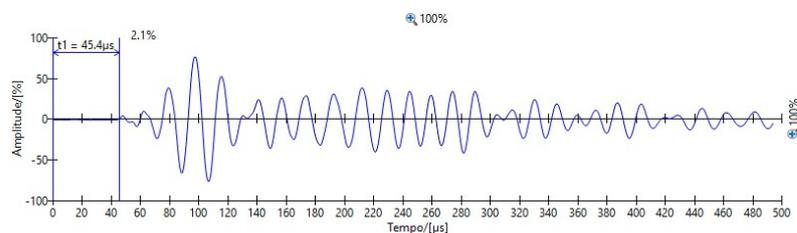
b)

c)

d)

e)

f)



g)

Figura 5: Ondas ultrassônicas extraídas de cada composição – composição 1 (a), composição 2 (b), composição 3 (c), composição 4 (d), composição 5 (e), composição 6 (f) e composição 7 (g).

Como mencionado anteriormente, a atenuação resulta da perda de energia da onda ao transitar pelas discontinuidades presentes no material. Esse fenômeno resultará na redução da amplitude da onda (11). Nas composições com maiores relações a/c, ou seja, as composições 6 e 7 (figuras 5.f e 5.g), esse padrão pode ser observado. Em função da maior incidência de poros, a onda atenua e tem sua amplitude reduzida. O mesmo comportamento acontece com a composição 5, com 100% de brita 0 (figura 5.e), em função de uma maior área interfacial, a onda também atravessa mais discontinuidades, resultando em sua atenuação. O comportamento da onda resultante das composições 1 a 4 (figuras 5.a, 5.b, 5.c e 5.d) em função de apresentarem um perfil mais específico, em comparação às demais, devem ser analisados de maneira rigorosa, utilizando ferramentas de auxílio como modelos matemáticos e computacionais.

#### 4. CONCLUSÃO

---

A VPU é um fator importante, mas não absoluto, exigindo mais parâmetros do sinal ultrassônico, bem como métodos de processamento dos dados para melhorar a confiabilidade da técnica. Dessa forma, para ampliar o potencial da técnica em materiais heterogêneos, o comportamento do sinal deve ser estudado, pois nele contém informações valiosas sobre o comportamento dispersivo da onda e que podem melhor caracterizar o material.

Os resultados obtidos ratificam a literatura recente, entretanto, há a necessidade de estudos aprofundados do sinal ultrassônico com auxílio de modelos matemáticos que permitam a melhoria da sensibilidade da técnica.

#### 5. AGRADECIMENTOS

---

Os autores agradecem a Fapitec-SE pelo apoio fornecido.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. NBR 7211: Agregados para o concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
2. Mehta, P. K., “Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais”, São Paulo, Pini, 1994, 573 p.

3. Popovics, S., “Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing” – II Second Edition, Philadelphia, Pennsylvania, Noyes Publications, 1992, 673 p.
4. Neville, A. M., “Tecnologia do Concreto” - II Second Edition, Porto Alegre, Bookman, 2013, 448 p.
5. Petrucci, E. G. R., “Concreto de Cimento Portland” – XIV Edition, São Paulo, Editora Globo, 2005, 307 p.
6. Chen, C. H., “Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, Iowa, World Scientific, 2007, p. 3-31.
7. Hellier, C. J., “Handbook of Nondestructive Evaluation”, USA, Mcgraw-hill, 2003, 594 p.
8. Bungey, J. H.; Millard, Stephen G.; Grantham, M. G. “Testing of Concrete in Structures, IV Edition, Abingdon, Taylor & Francis Group, 2006, 339 p.
9. Malhotra, V. M.; Carino, N. J., “Handbook on Nondestructive Testing in Concrete, II Second Edition, Conshohocken, Crc Press, 2004, 365 p.
10. Ensminger, D.; Bond, L., “Ultrasonics: Fundamentals Technologies and Applications” III Edition, T & F Group, London, CRC Press.
11. Hofmann, M. A., “Atenuação Da Energia Do Sinal Ultrassônico Na Detecção De Danos Por Fissuração No Concreto”, Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
12. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
13. Andreucci, R., “Aplicação Industrial Ensaio por Ultrassom”, ABENDI, 2016.
14. Mohammed, T. U.; Mahmood, A. H., “Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete”, Ultrasonics, Bangladesh, 2016, p. 129-136.